

VDI ZRE Kurzpapier Nr. 2: Abfallwirtschaft und Recycling in der Metallindustrie

Autorin:

Mareike Carolin Taube, VDI ZRE

Wir danken dem Arbeitsbereich Recyclingrohstoffe der Deutschen Rohstoffagentur (DERA) in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), für die fachliche Unterstützung.

Das Kurzpapier wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) erstellt.

Die Kurzpapiere des VDI ZRE geben einen Überblick über aktuelle Entwicklungen zu den Themen Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft in Forschung und industrieller Praxis. Sie enthalten eine Zusammenstellung relevanter Forschungsergebnisse, neuer Technologien und Prozesse sowie Gute-Praxis-Beispiele. Damit verschaffen die Kurzpapiere einem breiten Publikum aus Wirtschaft, Forschung und Verwaltung einen Einstieg in ausgewählte Themenfelder.

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Tel. +49 30-27 59 506-505
zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

Titelbild: © VDI ZRE

**VDI ZRE Publikationen:
Kurzpapier Nr. 2**

**Abfallwirtschaft und Recycling
in der Metallindustrie**

INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	3
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	4
1 EINLEITUNG	5
2 ZIRKULÄRES WIRTSCHAFTEN IN DER METALLINDUSTRIE - STAND DER TRANSFORMATION	7
2.1 Massenmetalle	7
2.1.1 Eisen und Stahl	7
2.1.2 Kupfer	8
2.1.3 Aluminium	10
2.2 Schlüsselmetalle für Zukunftstechnologien	10
2.2.1 Seltene Erden	11
2.2.2 Sondermetalle	12
2.2.3 Batteriematerialien	14
2.2.4 Platingruppenelemente	15
2.2.5 Metalle für die Solarenergieerzeugung	18
3 PRAKTISCHE, RECHTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN EINER ZIRKULÄREN METALLINDUSTRIE	22
3.1 Praktische Herausforderungen	22
3.2 Rechtliche Herausforderungen	23
3.3 Wirtschaftliche Herausforderungen	25
4 ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE POTENZIALE EINER ZIRKULÄREN METALLINDUSTRIE	27
4.1 Ökonomische Potenziale	27
4.2 Ökologische Potenziale	28
5 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUR ZIRKULARITÄTSSTEIGERUNG FÜR KMU IN DER METALLINDUSTRIE	29
6 FAZIT	31
LITERATURVERZEICHNIS	32

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Gemischter Metallschrott auf einem Schrottplatz.	7
Abbildung 2:	Kabelschrott, eine bedeutende Rohstoffquelle für das Kupferrecycling.	9
Abbildung 3:	Bestückte Leiterplatten enthalten neben Kupfer eine Vielzahl verschiedener Wertmetalle.	9
Abbildung 4:	Die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus den Generatoren ausgedienter Windkraftanlagen gewinnt zunehmend an Bedeutung.	11
Abbildung 5:	Ganzheitliche Recyclingansätze ausgedienter PV-Module sind derzeit Thema der Forschung.	18

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
CCUS	Carbon Capture, Utilisation and Storage
CEAP	Circular Economy Action Plan
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CRMA	Critical Raw Materials Act
DPP	Digitaler Produktpass
EE	Erneuerbare Energien
EU	Europäische Union
EoL	End-of-Life
ERMA	Europäische Raw Materials Alliance
EuRIC	European Recycling Industries' Confederation
ITO	Indiumzinnoxid
NdFeB	Neodym-Eisen-Bor
OER	Sauerstoffentwicklungsreaktion
PEM	Polymer-Elektrolyt-Membran
PEMFC	Protonenaustauschmembranbrennstoffzelle
PGE	Platingruppenelemente
PV	Photovoltaik
RIR	Recyclinginputrate
SE	Seltene Erden
SMAP	European Steel and Metals Action Plan
t	Tonnen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VDI TZ	VDI Technologiezentrum GmbH
VDI ZRE	Kompetenzzentrum für zirkuläre Wirtschaft und Ressourceneffizienz
WV Metalle	Wirtschaftsvereinigung Metalle

1 EINLEITUNG

Die nachhaltige Transformation der deutschen Wirtschaft hin zu mehr Zirkularität ist im gesellschaftspolitischen Diskurs fest etabliert. Sowohl die Europäische Union (EU) als auch die Bundesregierung streben die langfristige Schaffung einer Kreislaufwirtschaft unter Berücksichtigung der R-Strategien¹ an. Hierbei nimmt die Abfall- und Recyclingwirtschaft eine Schlüsselrolle ein. Einen wichtigen Beitrag zur Einsparung klimaschädlicher Emissionen kann u. a. die Sekundärrohstoffgewinnung leisten. Auf internationaler Ebene kann der Zerstörung von Naturflächen und dem Biodiversitätsverlust infolge der Primärrohstoffgewinnung und Deponierung von Abfällen effektiv entgegen gewirkt werden. Zudem verringern Sekundärrohstoffe den Import von Metallen und tragen gleichzeitig zur Resilienz von Produktionsprozessen bei.

Das Potenzial der Abfall- und Recyclingwirtschaft zur Schaffung einer Kreislaufwirtschaft ist noch nicht ausgeschöpft: Der Sekundärrohstoffanteil der weltweit erzeugten Güter liegt bei lediglich 7,2 % (Stand 2023), wobei dieser Wert laut Circularity Gap Report seit 2018 (Sekundärrohstoffanteil = 9,1 %) sogar rückläufig ist.² Im globalen Vergleich erreicht die deutsche Wirtschaft einen Sekundärrohstoffanteil von 13 %³; die materialbezogenen Anteile unterscheiden sich hier jedoch deutlich. So beträgt der Sekundärrohstoffanteil von Kunststoff 12 %⁴, während bei Metallen bereits 32 %⁵ erreicht werden. Nichtsdestotrotz ist Deutsch-

land derzeit weit davon entfernt, die Ziele der EU (25 % Sekundärrohstoffanteil bis 2030)⁶ zu erreichen.

Die Recycling- und Abfallwirtschaft steht somit vor der Aufgabe, die Abfälle resp. Reststoffe des produzierenden Gewerbes und der privaten Haushalte einer möglichst hochwertigen stofflichen Verwertung zuzuführen und die Verbrennung bzw. Deponierung von Abfällen weitestgehend zu eliminieren. Der Sammlung und Erfassung sowie Sortierung von Abfällen kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Insbesondere die Entfernung von Stör- und Fremdstoffen im Zuge der Sortierung wirkt sich maßgeblich auf die Reinheit der Fraktionen und damit auf die Qualität des späteren Rezyklats aus.

Sortierprozesse können jedoch mit einem so hohen Aufwand bzw. Energieverbrauch verbunden sein, dass für den betroffenen Recyclingprozess keine Wirtschaftlichkeit besteht. Selbst hochwertige Rezyklate können sich gegenüber den oft preiswerteren Primärrohstoffen nur durchsetzen, wenn die Kundschaft bereit ist, den Mehrpreis für nachhaltigere Produkte zu zahlen. Die Abfall- und Recyclingwirtschaft steht daher ebenfalls vor der Herausforderung, Recyclingprozesse zu entwickeln, die nicht nur wirtschaftlich, sondern auch effektiv umsetzbar sind. Hierzu bedarf es der Unterstützung durch politische Entscheidungsträger in Form einer übergreifenden Strategie, um alle Agierenden entlang der Wertschöpfungskette in der Schaffung einer echten Kreis-

¹ R0 - Refuse, R1 - Rethink, R2 - Reduce, R3 - Reuse, R4 - Repair, R5 - Refurbish, R6 - Remanufacture, R7 - Repurpose, R8 - Recycle, R9 - Recover

² Vgl. Fraser, M.; Conde, Á. und Haigh, L. (2024), S. 8.

³ Vgl. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2024), S. 8.

⁴ Vgl. Bayern Innovativ GmbH (2023).

⁵ Vgl. Dittrich, M. et al. (2021), S. 4.

⁶ Vgl. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2024), S. 37.

laufwirtschaft zu bestärken, sowie eines gesellschaftlichen Umdenkens hin zu mehr Zirkularität.

Eine Gesamtbetrachtung der Recycling- und Abfallwirtschaft im Kontext der zirkulären Transformation ginge über den Umfang dieses Kurzpapiers hinaus. Daher wird der thematische Fokus auf das Recycling von Metallen gelegt. So soll u. a. geklärt werden, inwieweit die Metallindustrie bereits zirkulär wirtschaftet und wo konkrete Potenziale sowie praktische, rechtliche und wirtschaftliche Herausforderungen bei der Umsetzung zirkulärer Wirtschaftsweisen bestehen. Die Status-quo-Analyse wird durch Handlungsempfehlungen für KMU ergänzt, um eine inner- und außerbetrieb-

liche Zirkularität zu erreichen bzw. diese zu steigern.

Neben den Massenmetallen Eisen (Stahl), Kupfer sowie Aluminium werden insbesondere diejenigen Metalle diskutiert, die für die derzeit relevanten Zukunftstechnologien (E-Mobilität, erneuerbare Energien, Digitalisierung) von Relevanz sind. Hierzu gehören u. a. Seltene Erden, die Sondermetalle Indium, Gallium und Germanium, aber auch Nickel, Kobalt und Lithium für die Batterieproduktion. Darüber hinaus werden die Platingruppenelemente (Katalysatormaterial u. a. für die Wasserstoffherzeugung) sowie Silber und Silizium im Kontext der Solarenergieerzeugung näher betrachtet.

2 ZIRKULÄRES WIRTSCHAFTEN IN DER METALLINDUSTRIE – STAND DER TRANSFORMATION

Metalle sind aus rohstofflicher Sicht optimal für die Kreislaufführung geeignet, da sie in der Regel nicht verbraucht (Ausnahmen sind u. a. mechanischer Abrieb oder Korrosion) und daher in der Theorie nahezu verlustfrei wiederverwendbar sind. Leider spiegelt das – abgesehen von den Massenmetallen – zumeist nicht die Realität wider. So ist das Recycling von Metallen aufgrund fehlender Sammelsysteme, unzureichender Sortierung, unausgereifter Recyclingprozesse oder durch ein nicht recyclinggerechtes Produktdesign erschwert. Zudem tragen nicht ausreichend vorhandene Recyclinginputströme zur aktuellen Nichtumsetzbarkeit bei. Folgend wird der Stand der Transformation zur Kreislaufwirtschaft für die in diesem Kurzpapier betrachteten Metalle dargestellt.

2.1 Massenmetalle

Die Produktion der Massenmetalle Eisen (Stahl), Kupfer und Aluminium ist aufgrund ihrer vielfältigen Anwendungsbereiche und des bereits langen Zeitraums der technischen Nutzung schon weitestgehend zirkulär. Wirtschaftlich etablierte Recyclingrouten existieren bereits, inklusive weitreichender Sammel- und Sortiersysteme.

Jedoch stehen auch die Massenmetalle vor der Herausforderung, die derzeitigen Recyclingquoten, aber ebenso die Qualität (mit Ausnahme von Kupfer) der produzierten Sekundärmetalle noch zu steigern.

2.1.1 Eisen und Stahl

Stahl und Gusseisen bilden die Eckpfeiler moderner Industrie- und Technikanwendungen (z. B. Bau- und Infrastrukturprojekte, Automobilindustrie, Maschinenbau, Energieerzeugung). Im Kontext der Energiewende sind Stahlkonstruktionen u. a. essenziell für den Bau von Windkraftanlagen, Wasserstoffherstellungsanlagen (Elektrolyseure, Druckbehälter, Rohrleitungen und Speicher), aber auch bezogen auf elektrische Übertragungs- und Verteilnetze (Masten, Türme, Transformatoren etc.). Im Mobilitätssektor gewährleisten hochfeste Stähle die strukturelle Integrität und Sicherheitsanforderungen moderner (Elektro-)Fahrzeuge. Zudem finden Stahl und Gusseisen breite Anwendung im Maschinenbau, indem sie langlebige, präzise und belastbare Bauteile z. B. für die Industrieautomation realisieren.



Abbildung 1: Gemischter Metallschrott auf einem Schrottplatz. © Fotolia/Michael Wilkens

Das Recycling nimmt eine tragende Rolle für die nachhaltige Transformation der Eisen- und Stahlerzeugung in Deutschland ein: Durch den Einsatz einer Tonne Stahlschrott (vgl. Abbildung 1) lassen sich – im Vergleich zur Primärerzeugung – bis zu 1,67 Tonnen (t) CO₂ einsparen. Im Falle der Edeltahlerzeugung fällt diese Menge mit bis zu 6,7 t CO₂ pro Tonne Schrott

sogar noch höher aus.⁷ Der Einsatz von Schrott wirkt sich ebenfalls positiv auf den Energiebedarf der Stahlerzeugung aus. So lassen sich im Vergleich zu einem auf Basis von Primärrohstoffen produzierten Stahl ca. 72 % der benötigten Energie einsparen.⁸

Im Jahr 2023 wurden in der deutschen Stahlproduktion ca. 17 Millionen Tonnen Stahl- und Eisenschrott eingesetzt. Das entspricht etwa 46,6 % des Gesamtrohstoffeinsatzes.⁹ Der Recyclinganteil der deutschen Edelstahlproduktion beträgt hingegen > 50 % mit steigender Tendenz¹⁰, die deutschen Eisengießereien sind mit einem Recyclingmaterialanteil von bis zu 90 %¹¹ weitestgehend zirkulär aufgestellt.

Ein hoher Schrottanteil bei der Stahlerzeugung birgt jedoch verfahrenstechnische Herausforderungen: So geht bspw. mit steigendem Schrottanteil die Gefahr einher, störende Legierungselemente wie Nickel, Kupfer, Kobalt oder auch Zinn, die sich lediglich über das Verdünnen mit Primärmaterial kompensieren lassen, in den Schmelzprozess einzutragen. Die Schrotteinsatzquote für die Hochofenroute ist daher auf max. 30 % limitiert.¹²

Die schrottbasierte Elektrostahlerzeugung (Sekundärstahlerzeugung) gilt neben der Direktreduktion mit Wasserstoff derzeit als Schlüsseltechnologie für eine klimafreundliche Stahlproduktion. Der Anteil von Sekundärstahl an der deutschen Stahlerzeugung beträgt zurzeit ca. 30 %. Eine weitere Steigerung dieses Anteils ist jedoch nur bedingt möglich, da bspw. der Elektrostahlerzeugung aufgrund fehlender

Schrottverfügbarkeiten in benötigter Qualität und des spezifischen Produktportfolios verfahrenstechnische Grenzen gesetzt sind.¹³ Um den bisherigen Schrotteinsatz in der Eisen- und Stahlproduktion weiter zu erhöhen, sind vor allem die getrennte Sammlung, aber auch legierungsspezifische und effiziente Sortierprozesse zur Gewährleistung sortenreiner Legierungsschrotte essenziell. Dies bedarf allerdings innovativer Analyseverfahren bzw. der eindeutigen Rückverfolgbarkeit von Schrotten, inklusive umfassender Informationen zur Legierungszusammensetzung und Stahlsorte sowie etwaig vorhandener Stör- und Gefahrenstoffe.

2.1.2 Kupfer

Kupfer ist aufgrund seiner hervorragenden elektrischen Leitfähig- und Korrosionsbeständigkeit ein unverzichtbarer Werkstoff für die moderne Energieinfrastruktur und Elektronik sowie für das Bauwesen und die (Elektro-)Mobilität.¹⁴ Der Energiebedarf für die Erzeugung einer Tonne Sekundärkupfer beträgt außerdem nur 10 – 30 Gigajoule, sodass über das Recycling ca. 70 – 90 % der für die Primärerzeugung erforderlichen Energie eingespart werden.¹⁵

Durch diese erhebliche Energieeinsparung geht die Sekundärkupfererzeugung auch mit einem Rückgang des Carbon Footprints auf 0,2 bis 1,9 Kilogramm CO₂-Äquivalente¹⁶ pro Tonne Kupfer einher. Die Sekundärkupfergewinnung liefert somit einen wichtigen Beitrag zum Ressourcen- und Klimaschutz. Laut Aussage des deutschen Kupferverbandes lassen sich über das Recycling von Kupfer jährlich bis zu

⁷ Vgl. Pothen, F. und Brock, L. V. (2021), S. 5.

⁸ Vgl. EuRIC AISBL (2020), S. 5.

⁹ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024), S. 2; 6.

¹⁰ Vgl. WOTech GbR (2019), S. 10.

¹¹ Vgl. Mischler, G. (2022).

¹² Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2024a), S. 2.

¹³ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Stahl (o. D..).

¹⁴ Vgl. Kupferverband e.V. (2025b).

¹⁵ Vgl. Verlag Holzhausen GmbH (2024).

¹⁶ Vgl. Ekman Nilsson, A. et al. (2017), S. 5.

40 Millionen Tonnen der globalen CO₂-Emissionen einsparen.¹⁷

Die deutsche Recyclinginputrate (RIR) für Kupfer ist mit 40 %¹⁸ vergleichsweise hoch. So verfügen deutsche Kupferproduktionsunternehmen nicht nur über effiziente Produktions- und Verarbeitungsprozesse, sondern auch über umfangreiche Closing-the-Loop-Konzepte sowie breit aufgestellte Lieferketten, die eine ausreichende Versorgung mit Recyclinginputmaterial (vgl. Abbildung 2) sicherstellen. Auch die nationale End-of-Life-(EoL-)Recyclingrate fällt in Deutschland mit 80 % bereits vergleichsweise hoch aus, sodass derzeit vor allem Potenzial in der Intensivierung der bisherigen Sammelaktivitäten im Bereich Elektro- und Elektronikschrott (Kupferrecyclingrate: 50 %) gesehen wird.¹⁹



Abbildung 2: Kabelschrott, eine bedeutende Rohstoffquelle für das Kupferrecycling.
© Fotolia/Indigo

Trotz der hohen Recyclingrate ist die Menge an verfügbarem Recyclinginputmaterial begrenzt. Circa 50 % der Kupferproduktion werden in der Baubranche eingesetzt, die Rückgewinnung von Kupfer aus langlebigen Produkten wie Gebäuden kann jedoch aufwendig sein. Darüber hinaus gelangt dieses Kupfer gewissermaßen

zeitverzögert in den Kreislauf, sodass die Nachfrage nicht allein über EoL-Material wie Altkupfer und Legierungsschrotte gedeckt werden kann.²⁰

Weitere Herausforderungen für das Recycling von Kupfer bestehen in der Zusammensetzung der Stoffströme. Verbundmaterialien (z. B. Leiterplatten, vgl. Abbildung 3) oder sehr heterogene Stoffströme (Schredderfraktionen aus der Altfahrzeugaufbereitung) lassen sich nur unter hohem verfahrenstechnischen Aufwand aufbereiten.

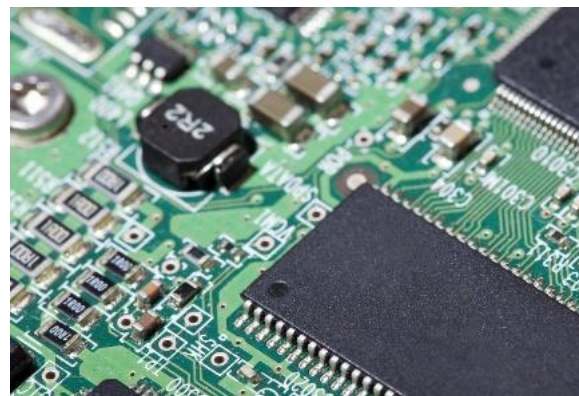


Abbildung 3: Bestückte Leiterplatten enthalten neben Kupfer eine Vielzahl verschiedener Wertmetalle. © Fotolia/eldadcarin

Durch die Elektromobilität – ein Elektrofahrzeug benötigt im Schnitt die dreifache Kupfermenge²¹ eines Verbrenners – und den Ausbau der erneuerbaren Energien (EE) ist nach Schätzungen des DIW Berlin²² in den nächsten 20 Jahren zudem mit einer Verdopplung des globalen Kupferbedarfs zu rechnen.

Um der künftigen Nachfrage gerecht zu werden und das volle Potenzial des Kupferrecyclings vollständig auszuschöpfen, bedarf es daher einer Optimierung der bestehenden Recyclinginfrastruktur und -verfahren, z. B. durch die

¹⁷ Vgl. Kupferverband e.V. (2025c).

¹⁸ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2024d), S. 1.

¹⁹ Vgl. Liesegang, M. und Bookhagen, B. (2023), S. 39 f.

²⁰ Vgl. Deutsches Kupferinstitut (2019), S. 3 f.

²¹ Vgl. Kupferverband e.V. (2025a).

²² Vgl. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (2022).

verstärkte Erhebung und Digitalisierung von Stoffstromdaten, aber auch der Entwicklung effizienterer Sammel- und Sortierverfahren sowie Aufbereitungstechnologien.²³

2.1.3 Aluminium

Aluminium ist aufgrund seines geringen Gewichts und seiner hohen Festigkeit ein wichtiger Werkstoff für den Leichtbau. Durch den Einsatz von Aluminium in der Elektromobilität lässt sich bspw. die Reichweite von Elektrofahrzeugen signifikant verbessern. In der EE-Erzeugung wird Aluminium u. a. für die Herstellung stabiler und korrosionsbeständiger Rahmen von Solarmodulen sowie Strukturkomponenten von Windkraftanlagen eingesetzt. Ferner wird Aluminium für Gehäuse und Kühlkörper von Elektronik genutzt, da es Wärme effizient ableitet und zugleich leicht ist. Des Weiteren ermöglicht es durch seine Flexibilität und Robustheit den Bau präziser und langlebiger Maschinenteile, z. B. im Bereich der Industrieautomation.

Aluminium lässt sich nahezu unbegrenzt recyceln. Voraussetzung für ein qualitativ hochwertiges Recycling ist jedoch die Sortenreinheit (Trennung von Knet-/Gusslegierung) der eingesetzten Schrotte. Die Gewinnung von Sekundäraluminium spart 95 % der für die Primärproduktion benötigten Energie ein. Herausforderungen bestehen jedoch u. a. in der ausreichenden Schrottverfügbarkeit. So befindet sich der Großteil des verfügbaren Aluminiums noch in der Nutzung (z. B. Fahr- und Flugzeuge, Gebäude, Maschinen) und kann daher nicht als

Rohstoff für das Recycling dienen.²⁴ Des Weiteren ist die Sekundäraluminiumerzeugung im Rahmen des Schmelzprozesses auf günstige Energiepreise angewiesen.²⁵

Deutschland gehört zu den führenden Aluminiumproduzenten in Europa: Die Aluminiumproduktion aus Sekundärmaterial betrug im Jahr 2024 ca. 2.741.000 t.²⁶ Die Recyclingquote von Aluminium liegt in Deutschland je nach Branche bei > 90 %²⁷. Aluminiumverpackungen erreichen eine Recyclingquote von 93,5 % (Stand 2019)²⁸, Aluminiumdosen sogar 99 %²⁹. Im Bau- und Verkehrssektor beträgt die produktbezogene Recyclingrate 95 %.³⁰

Verbesserungspotenziale hinsichtlich der Kreislaufführung von Aluminium bestehen derzeit vor allem im Bereich komplexer Aluminiumlegierungen und heterogener Stoffströme. Insbesondere feinteilige Materialien stellen aufgrund ihres Oxidationsverhaltens neben metallischen Verunreinigungen und anhaftender Organik kritische Komponenten für die Sekundäraluminiumgewinnung dar.³¹

2.2 Schlüsselmetalle für Zukunftstechnologien

Zukunftstechnologien wie die Elektromobilität, EE-Erzeugung, Digitalisierung und Industrieautomation sind auf eine Vielzahl unterschiedlicher „Schlüsselmetalle“ angewiesen. So sind u. a. Lithium, Kobalt und Nickel, Seltene Erden und Sondermetalle wie Gallium oder Germanium essenziell für die Herstellung von Traktionsbatterien, Permanentmagneten bzw.

²³ Vgl. Recycling magazin (2023).

²⁴ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2020), S. 2; 7.

²⁵ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2024b), S. 2.

²⁶ Vgl. Aluminium Deutschland e. V. (2025).

²⁷ Vgl. alu-verkauf GmbH (2025).

²⁸ Vgl. ella Verlag und Medien GmbH (2023).

²⁹ Vgl. Aluminium Deutschland e. V. (2022).

³⁰ Vgl. Liesegang, M. und Bookhagen, B. (2023), S. 35.

³¹ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2024b), S. 2.

Hochleistungselektronik. Angesichts begrenzter Ressourcen, einer wachsenden globalen Nachfrage und geopolitischer Ereignisse (z. B. Exportkontrolle/-stopp durch Erzeugungsländer) rücken zirkuläre Produktionsweisen zunehmend in den Fokus, um die Versorgungssicherheit Europas mit diesen u. a. kritischen/strategischen Metallen zu stärken, Umweltbelastungen zu reduzieren und den ökologischen Fußabdruck technologischer Innovationen nachhaltig zu minimieren. Nachfolgend werden daher für Zukunftstechnologien relevante Schlüsselmetalle im Kontext zirkulärer Wirtschaftsweisen betrachtet.

2.2.1 Seltene Erden

Die EU hat die strategische Notwendigkeit des Recyclings von Seltenen Erden (SE) erkannt und entsprechende Recyclingprojekte eingeleitet (z. B. SUSMAGPRO).³² Im Fokus stehen vor allem SE-Permanentmagnete. Sie enthalten leichte SE wie Neodym oder Praseodym bzw. schwere SE wie Dysprosium, Terbium oder Samarium. Am stärksten verbreitet sind Neodym-Eisen-Bor-(NdFeB-)Magnete. Als essenzieller Bestandteil von Elektromotoren (Elektrofahrzeuge, Robotik, Haushaltsgeräte, Werkzeugmaschinen) und Generatoren (z. B. Windkraftanlagen, vgl. Abbildung 4) sind sie u. a. für die Energie- und Mobilitätswende maßgeblich relevant. Weitere Anwendungsbereiche sind z. B. Audiogeräte wie Lautsprecher und Kopfhörer, Festplatten und Datenspeicher, Magnetlager und Kupplungen, aber auch Elektronik und Konsumgüter wie Mobiltelefone oder Tablets. NdFeB-Magnete werden außerdem in der

Mess-, Steuer- und Regeltechnik für Magnetventile und Sensoren sowie im medizinischen Bereich (z. B. MRT-Geräte, Implantate) eingesetzt.



Abbildung 4: Die Rückgewinnung von Seltenen Erden aus den Generatoren ausgedienter Windkraftanlagen erfährt zunehmend Bedeutung.
© PantherMedia/Susanne Krofta

Die EoL-RIR für SE ist mit ca. 1 %³³ quasi nicht existent. Gründe hierfür sind u. a. die Komplexität der Materialzusammensetzung von Permanentmagneten sowie die geringe Wertstoffkonzentration in den Endprodukten. Zudem fehlt es u. a. an inländischen Rücknahmestrukturen³⁴ und effizienten Sortierverfahren. Auf politischer bzw. wirtschaftlicher Ebene fördern die Rohstoffstrategie der Bundesregierung und die Europäische Raw Materials Alliance (ERMA) die Entwicklung und Skalierung innovativer Recyclingtechnologien, um die Abhängigkeit von Rohstoffimporten zu reduzieren und die Kreislaufwirtschaft zu stärken.^{35,36} Die EU strebt zudem an, die Sammlung, Rückführung und Aufbereitung von EoL-Produkten systematisch zu verbessern, um das SE-Recyclingpotenzial weiter auszuschöpfen (vgl. EU-Projekt „REEPRODUCE“)³⁷.

³² Vgl. Steinbeis 2i GmbH (o. D.).

³³ Vgl. Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (2023).

³⁴ Das Recycling der wertstoffhaltigen Komponenten findet aktuell größtenteils in China statt.

³⁵ Vgl. macondo publishing GmbH (2020).

³⁶ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019), S. 24 f.

³⁷ Vgl. Publications Office of the European Union (2021).

Praxisbeispiel: Rückgewinnung von SE-Magnetlegierungen aus Permanentmagneten

Heraeus Remloy hat in Bitterfeld-Wolfen eine Recyclinganlage für SE-Magnete eröffnet. Die neue Anlage kann jährlich bis zu 600 t magnetischer Materialien aus Altgeräten zu einem magnetischen Legierungspulver³⁸ verarbeiten, mit einer geplanten Erweiterung der Produktionskapazität auf 1.200 t. Die angewandte Recyclingtechnologie zeichnet sich nicht nur durch die hohe Qualität des Rezyklats aus, sondern ist dabei auch noch besonders ressourcenschonend. So lassen sich nach Aussage des Unternehmens durch die Aufbereitung der Altmagnete im Vergleich zur Primärproduktion bis zu 80 % der produktionsbedingten CO₂-Emissionen einsparen.³⁹

2.2.2 Sondermetalle

Die Sondermetalle Gallium, Germanium und Indium sind essenziell für die Produktion von Hightechkomponenten wie Halbleitern, Laser-/Photodioden bzw. Displays/Touchscreens. Im Zuge der globalen Digitalisierung, aber auch des Ausbaus von Hochgeschwindigkeitsdatenübertragungsnetzen (5G) ist mit einer Bedarfssteigerung dieser Metalle zu rechnen, so dass deren Recycling zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Gallium

Verbindungshalbleiter auf Basis von Galliumarsenid bzw. -nitrid werden vor allem in der Mikro- bzw. Optoelektronik eingesetzt. Als Laserdioden und LEDs dienen sie u. a. zur Datenkommunikation (z. B. Faseroptik-Kommunikationssysteme). Gallium-LEDs finden außerdem in der Allgemeinbeleuchtung, Displaytechnik oder auch der Infrarot-Kommunikation Anwendung.⁴⁰

Der Recyclinganteil der deutschen Galliumproduktion beträgt 50 % des Einsatzmaterials. Das Recyclinginputmaterial beschränkt sich dabei vor allem auf Produktionsabfälle (z. B. Waferindustrie); ein Recycling von EoL-Geräten findet derzeit noch nicht statt.⁴¹

Da Gallium nur in sehr geringer Konzentration in den Endgeräten enthalten ist, gestaltet sich das EoL-Recycling grundsätzlich schwierig. Demnach würde die in der Zeitspanne von 2017 bis 2030 aus EoL-LEDs zurückgewonnene Galliummenge den jährlichen Bedarf der deutschen Industrie nur zu ca. 0,1 %⁴² decken. Forschungsprojekte konzentrieren sich daher auf alternative Stoffströme zur Galliumrückgewinnung wie bspw. industrielle Abwässer (vgl. hierzu Verbundprojekt „EcoGalN“ zur biologischen Galliumrückgewinnung aus Abwässern der Halbleiterproduktion).⁴³

³⁸ Vgl. Onstad, E. (2024).

³⁹ Vgl. DETAIL Architecture GmbH (2024).

⁴⁰ Vgl. Liedtke, M. und Huy, D. (2018), S. 7; 20 f.

⁴¹ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2022), S. 1.

⁴² Vgl. Nikulsk, J. S.; Ritthoff, M. und Gries, N. v. (2021), S. 11.

⁴³ Vgl. Helmholtz-Zentrum Dresden - Rossendorf e. V. (2021).

Germanium

Germanium ist ein zentraler Rohstoff für die Herstellung von Glasfaserkabeln. Es erhöht den Brechungsindex des Glasfaserkerns, wodurch der Signalverlust minimiert und die Effizienz der Datenübertragung verbessert wird. Germanium ist daher essenziell für den Ausbau des Hochgeschwindigkeitsinternets und der 5G-Mobilfunknetze. Als Halbleiter wird Germanium zudem in Transistoren, Dioden, Hochfrequenzbauteilen und speziellen Computerchips (z. B. Sensorik von Elektrofahrzeugen) verwendet.^{44 45}

Die Rückgewinnung von Germanium aus EoL-Produkten wie Elektronik oder Glasfaserkabeln ist zwar technisch möglich⁴⁶, aber wegen der geringen Wertstoffkonzentrationen und fehlender Sammelstrukturen bislang wirtschaftlich kaum relevant.⁴⁷ Die Kreislaufführung von Germanium beschränkt sich daher vor allem auf die Rückführung von Produktionsabfällen in den Produktionsprozess (Inhouse-Recycling).⁴⁸ Aktuelle Prognosen gehen jedoch davon aus, dass die Germaniumnachfrage insbesondere im Bereich Glasfaserkabel⁴⁹ zunehmen wird. Da Deutschland stark von Importen (u. a. aus China)⁵⁰ abhängig ist, steigt auch hier der wirtschaftliche Druck, Kreislaufösungen zu etablieren.

Indium

Indium wird vor allem im Bereich der Hochtechnologie eingesetzt. Zu den wirtschaftlich bedeutendsten Verbindungen zählt Indiumzinnoxid (ITO). In Flüssigkristallanzeigen (z. B. LCD-Bildschirme), Touchscreens und Dünnschichtsolarzellen bildet ITO einen transparenten leitfähigen Film, der für die Funktionsfähigkeit dieser Technologien von elementarer Bedeutung ist. Darüber hinaus findet Indium für Weichlote sowie hochreine Niedrigtemperaturlegierungen (z. B. Lötmittel) Verwendung.⁵¹

Die Indiumproduktion ist stark auf die Primärgewinnung von Indium als Nebenprodukt der Zink- und Bleiverhüttung angewiesen, wobei das Metall häufig aus den anfallenden Flugstäuben via Laugung gewonnen wird. Die EoL-Recyclingquote ist mit < 1 % sehr niedrig, großtechnische Verfahren zur Rückgewinnung von Indium aus Endprodukten wie LCD-Bildschirmen⁵² sind bisher kaum etabliert. Lediglich indiumhaltige Sputtertargets werden in Deutschland zu 70 % recycelt.⁵³

Die Forschung setzt auf innovative Verfahren wie die selektive Extraktion⁵⁴, um Indium aus Produktionsabfällen resp. Elektroschrott zurückzugewinnen. Zudem bieten spezialisierte Dienstleistungsunternehmen⁵⁵ Recycling für Sputtertargets, Legierungsschrotte (z. B. Draht), Krätze aus der Lotproduktion oder auch Produktionsabfälle wie Folien oder Pulver an.

⁴⁴ Vgl. Mischler, G. (2023).

⁴⁵ Vgl. Breithaupt, T. (2023).

⁴⁶ Vgl. Zheng, K.; Benedetti, M. F. und van Hullebusch, E. D. (2023).

⁴⁷ Vgl. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2025).

⁴⁸ Vgl. Mrotzek-Blöß, A. et al. (2015), S. 15 f.

⁴⁹ Vgl. Mischler, G. (2023).

⁵⁰ Vgl. Gelowicz, S. (2023).

⁵¹ Vgl. Marscheider-Weidemann, F. et al. (2016), S. 257.

⁵² Vgl. Verlag 320° (2014).

⁵³ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2024c), S. 1.

⁵⁴ Vgl. bvse-Fachverband Schrott, E-Schrott und Kfz-Recycling (2023).

⁵⁵ Vgl. Indium Corporation (2025).

2.2.3 Batteriematerialien

Mit der Mobilitätswende kommt auch dem Recycling von Traktionsbatterien eine zunehmend wichtige Rolle zu, um den steigenden Bedarf an Batteriematerialien wie Lithium, Kobalt und Nickel langfristig zu sichern und damit eine von Rohstoffimporten unabhängige Versorgung der europäischen Batterieproduktion sicherzustellen.

Lithium

Ein Mischoxid aus vornehmlich Lithiumoxid bildet das Kathodenmaterial der Batterie. Beim Laden und Entladen der Batterie ermöglichen Lithiumionen als Ladungsträger den eigentlichen Energieaustausch. Da Lithium viel Energie pro Gewichtseinheit speichern und übertragen kann, ist es von maßgeblicher Bedeutung für die Energiedichte der Batterie.⁵⁶

Die Zirkularität von Lithium steht noch am Anfang, wird aber durch die Entwicklung innovativer Recyclingverfahren sowie gesetzlicher Vorgaben wie der EU-Batterieverordnung⁵⁷ vorangetrieben. Demnach soll die Rezyklateinsatzquote von Lithium ab 2025 von 65 % auf 70 % bis 2030 steigen. Bis zum Jahr 2023 gaben die gesetzlichen Rahmenbedingungen lediglich gewichtsbasierte Sammelquoten vor, sodass kein gesetzlicher Anreiz bestand, Lithium gezielt zurückzugewinnen. Zudem ist die hydrometallurgische Rückgewinnung von Lithium vergleichsweise kostenintensiv, sodass aufgrund der kostengünstigen Primärrohstoffe bisher keine Wirtschaftlichkeit gegeben war.

Konkrete Angaben zur tatsächlichen Recyclingquote von Lithium liegen für Deutschland derzeit nicht vor. Jedoch werden zunehmend effiziente Recyclingverfahren entwickelt, um nicht nur Kobalt und Nickel, sondern auch Lithium aus Altbatterien – insbesondere Traktionsbatterien – zurückzugewinnen. Hierfür werden die Batterien in der Regel zunächst tiefenentladen, zerlegt und geschreddert. Die Wertmetalle werden dabei in der sogenannten „Schwarzmasse“ aufkonzentriert, die anschließend mithilfe verschiedener metallurgischer Extraktionsverfahren⁵⁸ aufgetrennt wird. Auf diese Weise lassen sich über 90 % des enthaltenen Lithiums zurückgewinnen, das anschließend für die Produktion neuer Batterien eingesetzt werden kann.⁵⁹

Kobalt

Kobaltoxid wird der Kathode zugegeben, um die thermische Stabilität zu erhöhen und damit die Lebensdauer der Batteriezelle zu verlängern. Zudem verbessert es die Energiedichte und damit die Gesamtleistung der Batterie.⁶⁰ Derzeit werden ca. 57 %⁶¹ der globalen Kobaltproduktion im Batteriesektor eingesetzt. Die EoL-Recyclingrate der EU für Kobalt beträgt 32 %, die EoL-RIR liegt hingegen bei 22 %.⁶²

Das Recycling von Kobalt als kritischem Rohstoff ist nicht nur ökologisch, sondern auch ökonomisch relevant, da es im Rahmen der Batterieherstellung einen der teuersten⁶³ Rohstoffe und somit einen Hauptkostentreiber darstellt. Das bisher recycelte Kobalt stammt aus

⁵⁶ Vgl. Dorrman, L. et al. (2021), S. 9.

⁵⁷ Vgl. hesselmann service GmbH (2024).

⁵⁸ Vgl. Duesenfeld GmbH (o. D.).

⁵⁹ Vgl. VDI Technologiezentrum GmbH (o. D.).

⁶⁰ Vgl. Köllner, C. (2023).

⁶¹ Vgl. Liesegang, M. und Bookhagen, B. (2023), S. 57.

⁶² Vgl. Matos, C. T.; Ciacci, L. und Godoy León, M. F. (2020), S. 10.

⁶³ Vgl. Vekić, N. (2020), S. 8.

anderen Anwendungen wie z. B. Katalysatoren⁶⁴. Das Recycling von Batteriematerialien gewinnt aber auch in Deutschland zunehmend an Bedeutung, wobei das Recycling in diesem Bereich noch nicht skaliert stattfindet.

Innovative Recyclingverfahren laugen die Kobaltverbindungen unter Verwendung stark eutektischer Lösungsmittel aus der Schwarzmasse. Die hieraus resultierende kobalthaltige Lösung wird anschließend anhand einer Flüssig-flüssig-Extraktion aufkonzentriert und das gewonnene Konzentrat zwecks Aufreinigung einer Elektrolyse unterzogen.⁶⁵ Substitutionsbestrebungen für Kobalt gefährden jedoch mitunter die Wirtschaftlichkeit besagter Recyclingverfahren.

Nickel

Nickeloxid ist ein zentraler Bestandteil der Kathode von Lithiumionenbatterien. Es dient zur Erhöhung der Energiedichte und damit zur Steigerung der Kapazität. Jedoch birgt ein hoher Nickelanteil auch eine gewisse Instabilität in der Elektrodenstruktur, die aber über die Beimengung von Mangan und Kobalt ausgeglichen werden kann (NMC-Kathode).⁶⁶ Über 95 % des in Lithiumionenbatterien enthaltenen Nickels⁶⁷ lassen sich mit modernen Recyclingverfahren bereits zurückgewinnen.

Deutschland ist im Hinblick auf die Recyclingkapazitäten von Lithiumionenbatterien führend in Europa.⁶⁸ Mit dem kontinuierlichen Ausbau der bisherigen Recyclingkapazitäten und dem technologischen Fortschritt des Recyclings ist

in den kommenden Jahren daher eine signifikante Steigerung des Recyclingvolumens zu erwarten. Im Jahr 2030 wird sich der Anteil Deutschlands an der europäischen Gesamtreyclingkapazität voraussichtlich auf 34 %⁶⁹ belaufen.

2.2.4 Platingruppenelemente

Die Platingruppenelemente (PGE) tragen als Katalysatormaterial in Elektrolyseuren und Brennstoffzellen maßgeblich dazu bei, EE in Form von Wasserstoff speicher- und transportierbar zu machen. PGE sind damit von essenzieller Bedeutung für den Erfolg der Energiewende und die Dekarbonisierung von Industrie und Verkehr. Wegen Preis- und Lieferrisiken sowie der hohen Importabhängigkeit werden PGE von der EU jedoch als kritische Rohstoffe geführt. Die Zirkularitätssteigerung dieser Metalle rückt daher zunehmend in den Fokus von Politik, Wirtschaft und Forschung.

Platin

Platin dient im Kontext der Wasserstoff- und Energiewirtschaft vor allem als Katalysatormaterial für Protonenaustauschmembranbrennstoffzellen (PEMFC, derzeitiger Platinbedarf $\approx 0,3$ kg pro MW)⁷⁰ und Polymer-Elektrolyt-Membran-(PEM-)Elektrolyseure. Die EoL-RIR der EU für Platin liegt bei 11 % (Stand 2022)⁷¹. Die deutsche Recyclingquote für Platin aus Post-Consumer-Abfällen beträgt ca. 30 %.⁷² Zu diesen Abfällen zählen vor allem Katalysatoren aus dem Kfz-Bereich.⁷³ Mit Etablierung der E-Mobilität wird diese Sekundär-

⁶⁴ Vgl. Aromaa-Stubb, R.; Rinne, M. und Lundström, M. (2024), S. 1796.

⁶⁵ Vgl. Publications Office of the European Union (2023).

⁶⁶ Vgl. Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (2025).

⁶⁷ Vgl. MSV Mediaservice & Verlag GmbH (2024).

⁶⁸ Vgl. Hartmann, S. (2022).

⁶⁹ Vgl. Peter, M. et al. (2022), S. 27.

⁷⁰ Vgl. International Energy Agency (2021), S. 113.

⁷¹ Vgl. Eurostat (2023).

⁷² Vgl. Wilts, H. (2015), S. 21.

⁷³ Vgl. Kuchta, K. und Schön, F. (2014), S. 140.

materialquelle für das Recycling jedoch langfristig nicht mehr zur Verfügung stehen. Im Industriebereich liegen die produktbezogenen Recyclingquoten (z. B. Platinnetze, Schüttgutkatalysatoren) mit > 90 % bereits deutlich höher.⁷⁴

Das Recycling von Platin spart im Vergleich zur Primärgewinnung bis zu 95 % der CO₂-Emissionen⁷⁵. Die Sekundärrohstoffgewinnung ist neben der Versorgungssicherheit aus diesem Grund auch aus Sicht des Klima- und Ressourcenschutzes von hoher Relevanz. Mit der Energiewende steht das Recycling künftig vor der Herausforderung, Brennstoffzellen und Elektrolyseure am Ende ihrer Nutzungsdauer zu verwerten. Aktuelle Forschungsprojekte setzen genau dort an.

So konnten im Rahmen des Forschungsprojekts „ReNaRe“⁷⁶ zum Recycling von PEM- und Hochtemperaturelektrolyseuren 90 % des Katalysatormaterials zurückgewonnen werden.

Platin ist ein äußerst effizienter Katalysator bei der Wasserstoffentwicklungsreaktion und daher maßgeblich für die Performance von Elektrolyseuren.

Aufgrund der steigenden Nachfrage⁷⁷ und des damit verbundenen Kostendrucks wird vermehrt an günstigeren Katalysatormaterialien (z. B. Nickel) geforscht, um Platin (teilweise) zu substituieren.⁷⁸

Praxisbeispiel: Rückgewinnung von Platin aus Brennstoffzellen

Die Robert Bosch GmbH hat eine Kooperation mit dem Kölner Start-up Hylane GmbH zur Rückgewinnung von Platin aus ausgedienten Brennstoffzellen verabschiedet.⁷⁹ Das Start-up vermietet wasserstoffbetriebene LKW, die mit Brennstoffzellen-Antriebssystemen von Bosch ausgestattet sind. Am Ende ihrer Lebensdauer regelt Hylane den Rückkauf der Brennstoffzellenstacks durch Bosch. Das eigentliche Recycling erfolgt anschließend durch externe Firmen. Mit einem Anteil von 80 % am CO₂-Fußabdruck stellt Platin einen wichtigen Hebel zur Verbesserung der Ökobilanz von Brennstoffzellen dar. Bosch gibt wiederum an, durch die Rückgewinnung des Platins 95 % der durch die Primärförderung bedingten CO₂-Emissionen einzusparen. Nach Aussage von Bosch ließe sich dieses Geschäftsmodell auch auf weitere Brennstoffzellenanwendungen sowie Elektrolysestacks ausweiten. Da sich bis zu 95 % des enthaltenen Platins aus Brennstoffzellen zurückgewinnen lassen, entstünde auf diese Weise eine planbare und stabile Lieferkette und damit eine bessere Verfügbarkeit der global gefragten Ressource Platin. Nach Schätzung von Bosch werden ausgediente Brennstoffzellen jedoch erst ab dem Jahr 2030 in einer für das Recycling ausreichenden Menge zur Verfügung stehen.^{80,81}

⁷⁴ Vgl. innoscripta AG (2015).

⁷⁵ Vgl. Circular Valley Stiftung (2023).

⁷⁶ Vgl. Schwarz, M. (2025).

⁷⁷ Vgl. Fraunhofer UMSICHT (2021).

⁷⁸ Vgl. Karaca, A. (2022), S. 37.

⁷⁹ Vgl. Jenke, S. (2023a).

⁸⁰ Vgl. Circular Valley Foundation (2023).

⁸¹ Vgl. Siebel, T. (2023).

Palladium

Palladium wird als wasserstoffdurchlässige Membran⁸² zur Wasserstoffseparation/-reinigung z. B. in PEM-Elektrolyseuren⁸³ eingesetzt. Im Kontext der Energiewende ist Palladium zudem ein vielversprechendes Material zur Wasserstoffspeicherung⁸⁴, da es in der Lage ist, Wasserstoff reversibel zu binden. Bei Palladium handelt es sich zudem, ähnlich wie bei Platin, um ein bedeutendes Katalysatormaterial. Seine großflächige Anwendung in der Wasserstoffsynthese, z. B. in Form von Palladium-Nanoblättern⁸⁵, ist derzeit jedoch noch Gegenstand der Forschung.⁸⁶ Die EoL-Recyclingrate der EU für Palladium beträgt 10 % (Stand 2022)⁸⁷.

Iridium

Iridium ist aufgrund seiner katalytischen Aktivität und Korrosionsbeständigkeit unter sauren Bedingungen derzeit alternativlos als Anoden-Katalysator für die Sauerstoffentwicklungsreaktion (OER) der PEM-Elektrolyse (derzeitiger Iridiumbedarf $\approx 0,7$ kg pro Megawatt)⁸⁸ und damit von hoher Bedeutung für die Erzeugung von grünem Wasserstoff.⁸⁹ Mit einer durchschnittlichen globalen Jahresproduktion von lediglich 7 – 9 t ist Iridium jedoch ein äußerst seltener und kostenintensiver Rohstoff.⁹⁰

Die EoL-Recyclingquote für industriell genutztes Iridium beträgt 25 %⁹¹, kreislaufwirtschaftliche Ansätze gewinnen vor dem

Hintergrund der Wasserstoffwirtschaft jedoch zunehmend an Bedeutung.⁹² Aktuelle Schätzungen gehen für das Jahr 2030 von einem Marktanteil der PEM-Elektrolyse in Höhe von 40 % aus, womit eine signifikante Erhöhung des Iridiumbedarfes auf 27 t einhergehen würde.⁹³ Diese Bedarfserhöhung ließe sich derzeit jedoch nicht decken, da das Beiprodukt Iridium stark von der Platingewinnung abhängig ist. Gegenwärtige Forschungsprojekte (vgl. „IRE-KA“, „IRIDIOS“)⁹⁴ arbeiten deshalb daran, den Iridiumbedarf von Elektrolyseuren durch effizientere Nutzung, neue Katalysatormaterialien sowie innovative Herstellungsverfahren zu senken und damit Rohstoffengpässe zu verhindern.

Ruthenium

Ruthenium wird wie Iridium als Beiprodukt von Platin gewonnen. Aufgrund seiner größeren jährlichen Produktionsmenge von 35 t (Stand 2023)⁹⁵ – die jährliche Produktionsmenge von Iridium betrug im Jahr 2023 lediglich 7 t – ist Ruthenium bei vergleichbaren Katalyseigenschaften besser verfügbar und damit günstiger als Iridium.⁹⁶ Ruthenium wird deshalb als aussichtsreiche Alternative zu Iridium als Katalysator für die PEM-Elektrolyse gehandelt. Derzeit vielversprechende Ansätze sind mit Nickel dotiertes Rutheniumoxid⁹⁷ bzw. Iridium-Ruthenium-Kombinationskatalysatoren. Letztere haben nicht nur das Potenzial, die Materialkosten um bis zu 90 % zu senken, sondern

⁸² Vgl. Altaf, C. T. et al. (2024), S. 23139.

⁸³ Vgl. International Energy Agency (2021), S. 111.

⁸⁴ Vgl. Klatt, R. (2022).

⁸⁵ Vgl. Hochwarth, D. (2025).

⁸⁶ Vgl. WESTFALEN-BLATT Vereinigte Zeitungsverlage GmbH & Co. KG (2023).

⁸⁷ Vgl. Eurostat (2023).

⁸⁸ Vgl. International Energy Agency (2021), S. 113.

⁸⁹ Vgl. Henke, J. (2023).

⁹⁰ Vgl. H2News (2023).

⁹¹ Vgl. Nationaler Wasserstoffrat (2023), S. 1.

⁹² Vgl. Hochschule Mittweida (2024).

⁹³ Vgl. Nationaler Wasserstoffrat (2023), S. 2.

⁹⁴ Vgl. Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2024).

⁹⁵ Vgl. Market Growth Reports (2025).

⁹⁶ Vgl. Li, L. et al. (2023), S. 2.

⁹⁷ Vgl. Mook, I. (2022).

auch die Abhängigkeit von Iridium zu reduzieren und damit Versorgungsrisiken entgegenzuwirken.⁹⁸

Eine weitere Schlüsseltechnologie ist der Transport von grünem Wasserstoff in Form von Ammoniak. Ruthenium stellt hier einen vielversprechenden Katalysator dar, um Ammoniak am Zielort selektiv in Wasserstoff und Stickstoff zu spalten. Ruthenium ist im Vergleich zu anderen Katalysatormaterialien wie Nickel, Eisen oder Kobalt im Vorteil, da es die vollständige Spaltung von Ammoniak bereits bei vergleichsweise niedriger Temperatur ($\approx 500\text{ }^{\circ}\text{C}$) ermöglicht, sodass thermische Energie und damit Energiekosten eingespart werden.⁹⁹

Die globale EoL-RIR für Ruthenium beträgt 11 %.¹⁰⁰ Mit dessen zunehmender Bedeutung z. B. im Rahmen der PEM-Elektrolyse steigt auch die Notwendigkeit effizienter Recyclingverfahren. So forscht u. a. die TU Bergakademie Freiberg an einem Verfahren zur vollständigen Rückgewinnung von Ruthenium aus den Elektroden von PEM-Elektrolyseuren.^{101 102}

Es lässt sich festhalten, dass die Kreislaufführung von PEM gesteigert werden muss, um den künftig zunehmenden Bedarfen im Rahmen der Wasserstoff- und Energiewirtschaft gerecht zu werden. Vor allem für das geologisch seltene Iridium und Ruthenium muss weiter an geeigneten Substituten geforscht werden, da selbst bei einer EoL-Recyclingquote von 100 % der zu erwartende Bedarf an Katalysatormaterialien nicht gedeckt werden kann.

⁹⁸ Vgl. Deutsche Messe (2024).

⁹⁹ Vgl. Jenke, S. (2025).

¹⁰⁰ Vgl. Ferro, P. und Bonollo, F. (2019), S. 5.

¹⁰¹ Vgl. Jenke, S. (2023b).

2.2.5 Metalle für die Solarenergieerzeugung

Die Solarindustrie steht zunehmend vor der Herausforderung, geschlossene Materialkreisläufe zu etablieren, um Ressourcen effizienter zu nutzen und den ökologischen Fußabdruck von Photovoltaik-(PV-)Modulen weiter zu reduzieren. Innovative Recyclingtechnologien sind für die langfristige Sicherung des wachsenden Materialbedarfs essenziell. Zu den Schlüsselementen moderner PV-Module zählen insbesondere Silizium und Silber, die einerseits die Energieumwandlung ermöglichen und andererseits eine verlustarme Stromabfuhr gewährleisten.



Abbildung 5: Ganzheitliche Recyclingansätze ausgedienter PV-Module sind derzeit Thema der Forschung. © PantherMedia/Andrew Lozovyi

Silizium

Siliziumhableiter sind ein zentrales Funktionsmaterial in Solarzellen, da sie die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom ermöglichen. Obwohl auch andere geeignete Halbleitermaterialien existieren, ist das Gros der weltweit eingesetzten Solarzellen ($\approx 90\%$)¹⁰³ noch immer siliziumbasiert. Gründe hierfür sind nicht nur die hervorragenden physikalischen

¹⁰² Vgl. Sandig-Predzymirska; L. et al. (2025).

¹⁰³ Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2018).

Eigenschaften (Dotierbarkeit, Kristallstruktur) von Silizium, sondern auch seine gute und kostengünstige Verfügbarkeit.¹⁰⁴

Für die Halbleiter- und Photovoltaikindustrie wird hochreines Silizium benötigt. So sind nur etwa 10 % der jährlich produzierten Siliziummenge für diese Anwendung geeignet.¹⁰⁵ Aufgrund der technischen Bedeutung hochreinen Siliziums und der derzeitigen Importabhängigkeit von China¹⁰⁶ hat die EU Silizium als kritischen Rohstoff eingestuft. Das Recycling nimmt so eine Schlüsselrolle ein, um die unabhängige Versorgung Europas sicherzustellen. Zudem schont das Recycling die Umwelt, da die Herstellung von Reinstsilizium sehr energie- und damit CO₂-intensiv ist.¹⁰⁷ Mit Blick auf die wachsenden Mengen ausgedienter PV-Module (vgl. Abbildung 5), die ab 2029 durch

das Auslaufen der Einspeisevergütung der ersten Ausbauwelle (2009 – 2011) in Deutschland anfallen werden, gewinnt auch das Recycling zunehmend an Bedeutung.

Bislang wurde sich beim Recycling von PV-Modulen vor allem auf Glas, Aluminium und Kupfer fokussiert, da die Siliziumrückgewinnung noch wirtschaftlich unattraktiv war.

Nach aktuellen Schätzungen werden daher jährlich nur etwa 10.000 t Silizium recycelt.¹⁰⁸ Neue Recyclingverfahren sind jedoch zunehmend in der Lage, Silizium aus kristallinen PV-Modulen ohne nennenswerte Qualitätseinbußen zurückzugewinnen, um es anschließend für die Produktion neuer Solarzellen einzusetzen.¹⁰⁹

Praxisbeispiel: Siliziumrückgewinnung aus Solarmodulen

Die Solar Materials GmbH hat ein Verfahren für ein möglichst sortenreines und damit qualitativ hochwertiges Recycling von Solarmodulen entwickelt. Das Verfahren unterscheidet sich elementar von bisherigen Recyclingverfahren, da es vollständig auf das Schreddern der PV-Module verzichtet.¹¹⁰ Stattdessen wird das PV-Modul nach der Demontage von Rahmen und Anschlussdose energieeffizient in eine Glasfraktion und die eigentlichen Solarzellen inklusive Laminatestruktur getrennt. Nach der Delamination der Modulvorderseite durch Infrarotstrahlung wird das Silber mechanisch von der Oberfläche der Solarzellen abgetragen.¹¹¹ Die Wertstoffrückgewinnung aus dem abgetragenen Silber-Silizium-Gemisch erfolgt über externe Scheideanstalten. Der restliche Verbund aus Laminat, Kunststofffolie und Modulrückseite wird thermisch verwertet. Das entwickelte Verfahren wird am Standort Magdeburg industriell umgesetzt. Die geplante Anlage verfügt über eine jährliche Recyclingkapazität von ca. 10.000 t Solarmodulen.¹¹²

¹⁰⁴ Vgl. Schiestel, S. (2024).

¹⁰⁵ Vgl. Mischler, G. (2017).

¹⁰⁶ Vgl. Deigner, S. (2022).

¹⁰⁷ Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2025).

¹⁰⁸ Vgl. Lücke, N. (2022).

¹⁰⁹ Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2022).

¹¹⁰ Vgl. pv magazine group GmbH & Co. KG (2021).

¹¹¹ Vgl. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (k. A.).

¹¹² Vgl. Investitions- und Marketinggesellschaft Sachsen-Anhalt mbH (2024).

Silber

Silber ist ein wertvoller Bestandteil von Solarmodulen, der insbesondere in den elektrischen Leiterbahnen zu finden ist. Die hohe Leitfähigkeit von Silber ermöglicht geringe Widerstandsverluste und damit hohe Wirkungsgrade der Solarzellen. Das ist wiederum entscheidend für die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit von PV-Modulen. Kupfer wird zwar als Ersatz erforscht, ist aber technisch anspruchsvoller in der Verarbeitung und kann Defekte im Silizium verursachen¹¹³, sodass Silber noch nicht vollständig substituiert werden kann. Obwohl Silber nur etwa 0,1 % des Gesamtgewichts eines Moduls ausmacht, repräsentiert es ca. 50 % des Materialwerts.¹¹⁴ Trotz technischer Fortschritte und der Reduzierung des Silberverbrauchs pro Zelle entfielen im Jahr 2020 etwa 12,7 % der weltweiten Silberproduktion auf die Solarindustrie.¹¹⁵

Mit zunehmendem PV-Ausbau wird erwartet, dass der technische Silberbedarf und damit auch der Silberpreis weiter ansteigen. In Deutschland werden für neue PV-Anlagen bis zum Jahr 2030 rund 14.500 t Silber¹¹⁶ benötigt. Ein effizientes Recycling von Silber aus ausgedienten PV-Modulen ist daher entscheidend, um die Ressourcennutzung zu optimieren und die Primärrohstoffabhängigkeit zu verringern.

Eine großflächige Rückgewinnung von Silber aus Altmodulen findet zwar noch nicht statt, es existieren jedoch Forschungsvorhaben (z. B. nasschemische Aufbereitung von Altmodulen zur Rückgewinnung der Wertmetalle)¹¹⁷ sowie erste Recyclinganlagen im Rahmen von Start-ups (vgl. Solar Materials GmbH)¹¹⁸. Das Potenzial zur Rückgewinnung von Wertmetallen ist enorm: Prognosen für das Jahr 2030 gehen aktuell von ca. einer Million Altmodulen in Deutschland aus.

Der Status quo der deutschen Metallindustrie zeigt, dass sowohl die Unternehmen als auch die politischen Entscheidungstragenden die Notwendigkeit zirkulärer Wirtschaftsweisen erkannt haben. Im Bereich der Massenmetalle werden bereits hohe Recyclingquoten erreicht. Auch im Sektor der Zukunftstechnologien (Traktionsbatterien, PV-Module, Elektrolyseure) sind vielversprechende Projekte ange laufen, sodass ebenso hier mit einer baldigen Steigerung der Recyclingquoten zu rechnen ist.

Verbesserungsbedarf besteht insbesondere bei den Technologiemetallen, deren Recycling aufgrund niedriger Sammelquoten und geringer Wertstoffgehalte in den Endprodukten grundsätzlich erschwert ist.

¹¹³ Vgl. Forschungszentrum Jülich GmbH (2024).

¹¹⁴ Vgl. Ristau, O. (2025).

¹¹⁵ Vgl. Bayern Innovativ GmbH (2024).

¹¹⁶ Vgl. Life Coaching Finance (2024).

¹¹⁷ Vgl. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2025).

¹¹⁸ Vgl. Hannen, P. (2021).

Praxisbeispiel: Ganzheitliches End-of-Life-Recycling von Solarmodulen

Die LuxChemtech GmbH hat ein innovatives Recyclingverfahren für EoL-Solarmodule entwickelt. Das Unternehmen verfolgt dabei einen ganzheitlichen Ansatz, der neben Glas auch strategische Metalle wie Silizium, Silber und Indium berücksichtigt. Das Recyclingverfahren kombiniert mechanische und chemische Aufbereitungsverfahren. Die gewonnenen Sekundärrohstoffe lassen sich ohne nennenswerte Qualitätseinbußen erneut für industrielle Anwendungen nutzen. Oberstes Ziel ist ein ressourcenschonendes Recycling mit gleichzeitig hoher Reinheit der erzeugten Rezyklate.^{119 120} Das Unternehmen plant im Anschluss an die Pilotphase die industrielle Umsetzung in Tangermünde (Sachsen-Anhalt).¹²¹ Zudem wurde eine strategische Partnerschaft mit dem französischen Start-up-Unternehmen Rosi Solar eingegangen, um ein ganzheitliches Recycling von PV-Modulen in Deutschland voranzutreiben. Rosi Solar zählt zu den führenden französischen PV-Recyclingunternehmen.¹²² Um die Wertstoffe Silizium, Silber und Kupfer aus ausgedienten Modulen zurückzugewinnen, setzt das Unternehmen auf eine Pyrolysebehandlung. Die Rezyklate können im Anschluss ohne Qualitätsverlust erneut in der Solarindustrie eingesetzt werden.¹²³

¹¹⁹ Vgl. Herwarth-Molland, V. von (2022).

¹²⁰ Vgl. LuxChemtech GmbH (2025).

¹²¹ Vgl. Vallero, C. (2025).

¹²² Vgl. LuxChemtech GmbH (2023).

¹²³ Vgl. Greenhouse Media GmbH (2024).

3 PRAKTISCHE, RECHTLICHE UND WIRTSCHAFTLICHE HERAUSFORDERUNGEN EINER ZIRKULÄREN METALLINDUSTRIE

Die Metallindustrie sieht sich auf dem Weg zu mehr Zirkularität mit komplexen praktischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen konfrontiert. So gilt es aus praktischer Sicht, Recyclingverfahren zu optimieren und Materialkreisläufe zu schließen, während rechtliche Rahmenbedingungen und Umweltauflagen an Umfang zunehmen.

So stellt u. a. der europäische resp. deutsche Absatzmarkt aus wirtschaftlicher Sicht einen wichtigen Hebel dar, um recycelte Metalle in die Produktion zurückzuführen. Der volatile Rohstoffmarkt sorgt jedoch für Unsicherheiten, die wiederum innovative Geschäftsmodelle erfordern.

3.1 Praktische Herausforderungen

Die Umsetzung zirkulärer Wirtschaftsweisen stellt die Metallindustrie vor eine Vielzahl praktischer Herausforderungen wie z. B. die ineffiziente Sammlung von Recyclingmaterial bzw. wertstoffhaltiger EoL-Produkte, aufwendige Trenn- und Sortierprozesse, Wertstoffverluste im Recyclingprozess oder auch die unzureichende Rückverfolgbarkeit von Stoffströmen entlang (globaler) Lieferketten. Nachfolgend ist eine Auswahl zentraler praktischer Herausforderungen für die Kreislaufführung von Metallen aufgeführt:

- **Stoffströme nicht ausreichend verfügbar:** Recyclingprozesse sind auf eine zuverlässige Sekundärrohstoffversorgung angewiesen. Reine Abhängigkeiten vom Schrotthandel, aber auch internationale Handelsrestriktionen können jedoch die Versorgungssicherheit gefährden. Kooperationen entlang der Wertschöpfungskette helfen, etwaige Versorgungsengpässe durch z. B. lokale Quellen zeitweise zu überbrücken.¹²⁴ Die effiziente Sammlung, Aufbereitung und Rückführung von Schrotten sind dabei genauso vonnöten wie die separate Erfassung von Produktströmen mit höherem Wertstoffgehalt (Batteriematerialien, wertstoffhaltige Komponenten z. B. von Elektrolyseuren usw.), die wiederum einer angepassten Rücknahme- und Sammellogistik bedarf.
- **Komplexität von Recyclinginputströmen:** Mit zunehmender Materialvielfalt sinkt auch tendenziell der Wertstoffgehalt der Recyclinginputströme. Mit der Verdünnung des Wertstoffgehaltes geht jedoch ebenfalls ein höherer Recyclingaufwand einher. So können z. B. technische oder thermodynamische Hürden in Form eines material- bzw. energieintensiven Recyclingprozesses das wirtschaftliche Aus für die Wertstoffrückgewinnung bedeuten.¹²⁵
- **Fehlen eines recyclinggerechten Produktdesigns:** Komplexe Legierungszusammensetzungen oder auch Verbundmaterialien wirken sich erschwerend auf die Zirkularität von Metallen aus. Materialverbunde lassen sich teils nicht zerstörungsfrei (z. B. Klebeverbindungen in Elektronik) oder nur unter hohem (Energie-)Aufwand (z. B. Schweißverbindungen) voneinander trennen. Die De-

¹²⁴ Vgl. Siebel, T. (2022).

¹²⁵ Vgl. Siebel, T. (2022).

montierbarkeit wertstoffhaltiger Komponenten bzw. die Entfernung von Störstoffen ist jedoch Grundvoraussetzung für möglichst sortenreine Recyclinginputströme. Komplexen Legierungszusammensetzungen liegen hingegen effiziente Sortierverfahren zugrunde, um die Sortenreinheit von Schrotten sicherzustellen und im sich anschließenden Schmelzprozess die gewünschte Sekundärlegierung zu erhalten.

- **Fehlende Sortenreinheit von Recyclinginputströmen:** Die Rückgewinnung von Metallen in hoher Reinheit kann durch bestimmte Verunreinigungen (z. B. Kupferanhaftungen in Stahlschrott) erschwert sein. Bestimmte Legierungselemente können aus Gründen der Thermodynamik über metallurgische Verfahren nicht mehr aus dem Trägermetall entfernt werden¹²⁶, die Zusammensetzung der angestrebten Sekundärlegierung lässt sich dann nur noch über die Verdünnung mit Primärmaterial erzielen. Das stellt jedoch kein „echtes“ Recycling dar. Effiziente Sortierverfahren sind daher obligatorisch, um Metallschrott sortenrein zu trennen und Störstoffe frühzeitig zu entfernen.
- **Kein eindeutiger Herkunftsnachweis von Stoffströmen:** Sind keine Daten bezüglich der Produktzusammensetzung¹²⁷, eingesetzten Materialien und wiederverwertbaren Bestandteile vorhanden, werden die gezielte Rücknahme, Trennung und stoffliche Verwertung von Metallen am EoL erschwert. Die Einführung eines Digitalen Produktpasses (DPP) kann helfen, diese Informationslücke zu schließen. Außerdem sollten Marktindizes für Metalle neben Details zum Herstel-

lungsprozess auch Informationen über die Herkunft der eingesetzten Rohstoffe beinhalten, um mehr Transparenz für Investierende resp. die Kundschaft hinsichtlich der Nachhaltigkeit von Metallen zu schaffen. Auf diese Weise ließen sich neue Recyclingprojekte leichter finanzieren und das unternehmerische Risiko für die Ergreifung zirkulärer Maßnahmen reduzieren.¹²⁸

- **Organisatorische und strukturelle Herausforderungen:** Die effektive Gestaltung zirkulärer Maßnahmen erfordert einen erheblichen Abstimmungsbedarf entlang der Liefer- und Wertschöpfungskette. Fehlendes Know-how, Zeitmangel und nicht vorhandene Alltagsprioritäten in Unternehmen ergeben zusätzliche Hemmnisse für eine zirkuläre Metallindustrie.¹²⁹

3.2 Rechtliche Herausforderungen

Die Transformation hin zu einer zirkulären Metallindustrie bringt zahlreiche rechtliche Herausforderungen, vor allem im Bereich des Abfall- und Umweltrechts, mit sich. Eine kohärente Gesetzgebung ist jedoch entscheidend, um Unternehmen bei Investitionen in zirkuläre Maßnahmen rechtliche Sicherheit zu geben. So können unklare Definitionen, regulatorische Hürden und fehlende Standardisierungen die Umsetzung innovativer zirkulärer Geschäftsmodelle erheblich verlangsamen. Nachfolgend ist eine Auswahl der zentralen rechtlichen Herausforderungen auf EU-Ebene als übergeordnetem Rechtsrahmen aufgeführt.¹³⁰

¹²⁶ Vgl. Siebel, T. (2022).

¹²⁷ Vgl. Flöer, L. et al. (2025), S. 4.

¹²⁸ Vgl. Siebel, T. (2022).

¹²⁹ Vgl. Kubitz, D. und Schmied, A. (2025), S. 9.

¹³⁰ Auf eine Betrachtung rechtlicher Herausforderungen auf nationaler Ebene wird an dieser Stelle verzichtet

Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG)

Eine der elementaren Gesetzgebungen für das Recycling von Metallen ist die Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG). Sie regelt u. a., wann die Abfalleigenschaft eines Stoffstroms endet und dieser als Sekundärrohstoff für das Metallrecycling eingesetzt werden kann. Diese Kriterien werden vom Europäischen Bund der Recyclingindustrien (EuRIC)¹³¹ als zu streng empfunden, sodass in der Praxis oft Anreize fehlen, zirkulär zu wirtschaften. Die umfangreichen Genehmigungsverfahren und der damit verbundene Geld- und Zeitaufwand für den grenzüberschreitenden Abfalltransport stellen ein weiteres Hindernis zur Schaffung zirkulärer Wertschöpfungsketten dar. Eine stärkere Regulierung des Exports von Schrotten und metallischen Abfällen kann jedoch dazu beitragen, dass mehr Schrotte in Europa Anwendung finden, was die Dekarbonisierung des Metallsektors positiv beeinflussen würde.¹³²

European Green Deal

Der europäische Green Deal verfolgt die Etablierung einer klimaneutralen Kreislaufwirtschaft mit dem übergeordneten Ziel, in der EU bis zum Jahr 2050 Klimaneutralität zu erreichen. Im Fokus stehen u. a. die Vermeidung von Abfall, eine längere Nutzung von Produkten, z. B. durch die Förderung eines kreislaufgerechten Produktdesigns, eine verbesserte Sammlung und Behandlung von Abfällen (z. B. Batterien, Fahrzeuge) sowie der Einsatz nachhaltiger Verpackungsmaterialien.¹³³ Der Green

Deal stellt Unternehmen damit vor komplexe Anforderungen im Bereich Klima- und Ressourceneffizienz (z. B. „Europäisches Klimagesetz“, EU-Verordnung 2021/1119)¹³⁴, Produktregulierung, Recycling, Transparenz und internationale Wettbewerbsfähigkeit. Es gilt, Prozesse, Produkte und Dokumentation umfassend anzupassen, um den neuen Vorschriften zu genügen. Das ist in der Regel mit hohen Investitions- und Umstrukturierungsaufwänden verbunden. Die Wirtschaftsvereinigung Metalle (WV Metalle)¹³⁵ fordert, Berichtspflichten im Hinblick auf die Nachhaltigkeitsberichterstattungsrichtlinie und das EU-Lieferkettengesetz auf ein praxisorientiertes Niveau zu reduzieren, um Personal- sowie finanzielle Aufwände zu minimieren: Wettbewerbsfähigkeit, Innovation und Resilienz dürften sich nicht gegenseitig ausschließen. Gewerkschaften wie die IG Metall¹³⁶ begrüßen das europäische Lieferkettengesetz, da es gleiche Wettbewerbsbedingungen für europäische Firmen schafft und die Sorgfaltspflicht schärft. Eine intensive Auseinandersetzung mit der Lieferkette bietet Unternehmen zudem die Chance, sich resilienter aufzustellen.

Circular Economy Action Plan (CEAP)

Der CEAP wurde im Jahr 2020 von der Europäischen Kommission verabschiedet, um die im Rahmen des europäischen Green Deals verfolgten Ziele aktiv voranzutreiben.¹³⁷ Kernpunkte des CEAP¹³⁸ sind u. a. die Förderung von Ökodesign, inkl. eines Rechts auf Reparatur, verbindliche Rezyklateinsatzquoten und die limitierte Verwendung gefährlicher Stoffe.

¹³¹ Vgl. Europäischer Bund der Recyclingindustrien (2021), S. 1.

¹³² Vgl. Blenkinsop, P. und Payne, J. (2025).

¹³³ Vgl. Europäische Kommission (2020), S. 1 f.

¹³⁴ Vgl. Behrend Institut (2025), S. 12.

¹³⁵ Vgl. Wirtschaftsvereinigung Metalle (2024), S. 2 f.

¹³⁶ Vgl. Heisig, A. (2024).

¹³⁷ Vgl. Behrend Institut (2025), S. 13.

¹³⁸ Vgl. Europäische Kommission (2020), S. 3 f.; 17.

Rechtliche Herausforderungen für eine zirkuläre Metallindustrie ergeben sich vor allem durch neue Standards für Produktdesign und Recycling (z. B. DPP, vgl. Ökodesign-Richtlinie¹³⁹), erweiterte Nachweis- und Dokumentationspflichten sowie strengere Exportregeln für Recyclingrohstoffe und ein verschärftes Chemikalienrecht.

European Steel and Metals Action Plan (SMAP)

Der im März 2025 vorgestellte SMAP ist eine Initiative der Europäischen Kommission, die das Ziel verfolgt, Europas Metallsektor resilient, zukunftsfähig und klimafreundlich aufzustellen. Sie baut auf den Clean Industrial Deal der EU¹⁴⁰ auf und adressiert aktuelle Herausforderungen der Stahl- und Metallindustrie wie globale Überkapazitäten, unfairen Wettbewerb, hohe Kosten für Energie und CO₂-Zertifikate sowie die Notwendigkeit einer nachhaltigen Transformation.¹⁴¹

Critical Raw Materials Act (CRMA)

Der CRMA wurde 2023 verabschiedet, um die Versorgung Europas mit kritischen sowie strategischen Rohstoffen zu sichern. So soll einerseits die Abhängigkeit von Drittstaaten reduziert werden, während andererseits eine widerstandsfähige, nachhaltige und eigenständigere Rohstoffversorgung aufgebaut wird. Der CRMA setzt Förderziele für den Abbau und die Verarbeitung von Rohstoffen sowie das Recycling in der EU und soll Genehmigungsverfahren für strategische Projekte erleichtern. Eines der Ziele des CRMA besteht darin, min. 25 % des

jährlichen Verbrauchs an strategischen Rohstoffen durch Recycling zu decken.¹⁴²

Batterieverordnung (EU 2023/1542)

Die im Jahr 2023 verabschiedete Batterieverordnung schafft verbindliche Rezyklateinsatzquoten und Recyclingeffizienzen für Batteriematerialien in der EU, um eine nachhaltige Nutzung der Materialien zu gewährleisten. Im Fokus stehen u. a. die Metalle Lithium, Kobalt und Nickel. Neubatterien sollen demnach bis 2036 einen Rezyklatanteil von 26 % (Kobalt), 12 % (Lithium) bzw. 15 % (Nickel) enthalten. Zudem ist ab 2027 die Einführung eines digitalen Batteriepasses für Traktionsbatterien vorgesehen. Dieser soll über die Bereitstellung umfassender Informationen die Zweitverwertung von Batterien vereinfachen, mehr Transparenz in der Wertschöpfungskette schaffen und zur Nachhaltigkeitssteigerung der Batterieproduktion beitragen.¹⁴³

3.3 Wirtschaftliche Herausforderungen

Zirkuläre Wirtschaftsweisen eröffnen vielfältige Chancen für ein nachhaltiges Wachstum bei einer ressourceneffizienteren Produktion. Dieser Wandel kann Unternehmen jedoch auch vor wirtschaftliche Herausforderungen stellen. So ist die Einführung einer komplexen Sammel- und Rücknahmelogistik, aber auch die Etablierung innovativer Recyclingprozesse oft mit hohen Investitionskosten verbunden. Finanzielle Risiken bestehen zudem, wenn z. B. innovative Geschäftsmodelle auf eine geringe

¹³⁹ Vgl. Europäische Union (2009).

¹⁴⁰ Der Clean Industrial Deal wurde im Februar 2025 als Erweiterung des EU Green Deals vorgestellt. Sein Schwerpunkt liegt auf der finanziellen Unterstützung der europäischen Industrie hinsichtlich einer nachhaltigen

Transformation bei gleichzeitiger Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit.

¹⁴¹ Vgl. Europäische Kommission (2025), S. 1.

¹⁴² Vgl. Rat der Europäischen Union (2024), S. 1.

¹⁴³ Vgl. Lichtenthäler, S. und Bähr, C. (2024), S. 107; 109; 111.

Marktakzeptanz treffen. Es folgen einige wesentliche wirtschaftliche Herausforderungen für eine zirkuläre Metallindustrie:

- **Unzureichende Wirtschaftlichkeit von Recyclingprozessen sowie zirkulären Geschäftsmodellen:** Zirkuläre Wirtschaftsweisen wie das Recycling oder die Wiederverwendung von Metallen können aufgrund des Energiebedarfs oder aufwendiger Logistikprozesse im Vergleich zur Primärproduktion mit einem höheren Kostenaufwand verbunden sein. Ein weiteres Hemmnis für Unternehmen, zirkulär zu wirtschaften, stellen hohe Investitionskosten für moderne Trenn- und Sammelsysteme, aber auch Preisschwankungen hinsichtlich der benötigten Sekundärrohstoffe dar.¹⁴⁴
- **Unzureichende Sammel- und Rücknahmelogistik von Altgeräten bzw. wertstoffhaltigen Komponenten:** Die effiziente Rückführung und Aufbereitung von EoL-Geräten resp. wertstoffhaltigen Komponenten ist auf umfassende Sammel- und Sortiersysteme angewiesen. Eine effiziente Rücknahmelogistik ist daher von elementarer Bedeutung, um eine ausreichende Sekundärrohstoffversorgung zirkulärer Produktionsprozesse sicherzustellen und damit rohstoffbedingten Produktionsausfällen vorzubeugen.
- **Versorgungsrisiko bei Sekundärrohstoffangebot:** Für eine zirkuläre Metallwirtschaft ist eine zuverlässige Sekundärrohstoffversorgung essenziell. So können u. a. die alleinige Abhängigkeit vom Schrotthandel oder auch

internationale Handelsrestriktionen die Versorgungssicherheit mit Sekundärrohstoffen und damit die Produktionskapazität von Unternehmen gefährden. Branchenübergreifende Kooperationen, aber auch eine verbesserte getrennte Erfassung von Wertmetallen können jedoch dazu beitragen, die Versorgung mit Sekundärmaterial durch lokale Quellen weiter zu diversifizieren und Lieferengpässe zu überbrücken.¹⁴⁵

- **Geringe Akzeptanz für nachhaltig produzierte Metalle:** Höhere Preise für nachhaltig erzeugte Metalle, insbesondere in der Übergangsphase zu einer klimaneutralen Metallindustrie, können ein Hemmnis für die Nachfrage bzw. Akzeptanz auf Seiten der Kundschaft darstellen.¹⁴⁶ Es fehlt oft noch an Anreizen, zirkuläre Produkte zu wählen und damit aktiv zu einer nachhaltigeren Wirtschaft beizutragen.¹⁴⁷ Hier kann u. a. der Vertrieb durch die Bereitstellung umfassender Informationen ansetzen, um die Kundschaft in einer nachhaltigeren Kaufentscheidung zu bestärken.¹⁴⁸
- **Fachkräftemangel:** Auch die Metallindustrie ist von einem akuten Fachkräftemangel bedroht. Das trifft insbesondere auf zirkuläre Wirtschaftsweisen zu. So fehlt es nach Einschätzung der Bundesregierung¹⁴⁹ bereits heute an ausreichenden Lehrangeboten im Bereich Recycling und Reparatur. Hier gilt es, gezielte Förder- und Weiterbildungsmaßnahmen zu schaffen, um Mitarbeitende als Fachleute im Bereich Zirkularität zu schulen und weiter zu qualifizieren.

¹⁴⁴ Vgl. Flöer, L. et al. (2025), S. 4.

¹⁴⁵ Vgl. Siebel, T. (2022).

¹⁴⁶ Vgl. Siebel, T. (2023).

¹⁴⁷ Durch eine CO₂-Bepreisung stiege beispielsweise der Preis klimaschädlicher Produkte, während klimafreundliche Alternativen in Relation günstiger würden.

¹⁴⁸ Vgl. Kubitzka, D. und Schmied, A. (2025), S. 41.

¹⁴⁹ Vgl. Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2024), S. 39.

4 ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE POTENZIALE EINER ZIRKULÄREN METALLINDUSTRIE

Die Etablierung einer zirkulären Metallindustrie kann einen erheblichen Mehrwert für Wirtschaft und Umwelt leisten. Durch die Wiederverwertung und effiziente Ressourcennutzung erschließen sich neue Geschäftsmodelle, während Produktionskosten reduziert werden. Zudem sinken Umweltbelastungen, da natürliche Ressourcen geschont und im Vergleich zur Primärproduktion (indirekte) CO₂-Emissionen eingespart werden. Folgend sind die wichtigsten ökonomischen und ökologischen Potenziale zusammengefasst.

4.1 Ökonomische Potenziale

- Importunabhängigkeit von Produktionsprozessen:** Die Wiederverwertung von (Produktions-)Abfällen und anschließende Nutzung als Sekundärrohstoff tragen zu einer signifikanten Reduzierung von Rohstoffimporten bei – mit positiven Auswirkungen auf die Krisenresilienz der Metallindustrie. Findet die Sekundärrohstoffaufbereitung zudem lokal statt, steigt auch die inländische Bruttowertschöpfung.¹⁵⁰
- Höhere Wertschöpfung und Beschäftigung:** Zirkuläre Wirtschaftsweisen wirken sich positiv auf die deutsche Wertschöpfung sowie Beschäftigungszahlen aus. So geht der Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI) bis zum Jahr 2030 von einer zusätzlichen Bruttowertschöpfung von jährlich zwölf Milliarden Euro sowie Netto-Beschäftigungseffekten von 177.000 Arbeitsplätzen aus.¹⁵¹ Zirkulär agierende Unternehmen der Metallindustrie würden ebenfalls zu diesen positiven Effekten beitragen.
- Höhere Wettbewerbsfähigkeit:** Die Metallindustrie sieht sich auch 2025 mit einer anhaltenden Marktvolatilität und tendenziell steigenden Rohstoffpreisen konfrontiert. Der Anstieg der Beschaffungskosten sowie die wachsende Planungsunsicherheit¹⁵² nehmen direkten Einfluss auf die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen. Zirkuläre Geschäftsmodelle und der gezielte Einsatz von Recyclingtechnologien können dazu beitragen, das wirtschaftliche Bestehen der Metallindustrie in Europa zu sichern.¹⁵³
- Kostenreduktion:** Durch Recyclingprozesse lassen sich im Vergleich zur Primärproduktion oft erhebliche Mengen thermischer resp. elektrischer Energie einsparen. Beispielhaft ist hier die Sekundäraluminiumherzeugung, die – verglichen mit der Primärherstellung – einen ca. 95 %¹⁵⁴ geringeren Energiebedarf aufweist. Die erzielten Einsparungen wirken sich wiederum positiv auf die Produktionskosten aus. Deren Weitergabe an die Kundschaft bedingt für produzierende Unternehmen einen wichtigen Wettbewerbsvorteil. Kosteneinsparpotenziale ergeben sich zudem aus den in der Regel geringeren CO₂-Emissionen, da die Notwendigkeit kostenintensiver Carbon-Capture-

¹⁵⁰ Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. und Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2021), S. 12.

¹⁵¹ Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. und Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2021), S. 8.

¹⁵² Vgl. Hüsken, G.-M. (2022).

¹⁵³ Vgl. ZEG Informationszentrum Entwässerungstechnik Guss e.V. (o. D.).

¹⁵⁴ Vgl. Umweltbundesamt (2024).

Verfahren inkl. Nutzung und Speicherung von CO₂ (CCUS) verringert wird.¹⁵⁵

4.2 Ökologische Potenziale

- **Ressourcenschonung:** Die Anwendung zirkulärer Wirtschaftsweisen hilft, den Primärrohstoffbedarf der Metallindustrie¹⁵⁶ und damit den Gesamtressourcenverbrauch sowie den CO₂-Fußabdruck der Metallproduktion zu reduzieren. Der Einsatz von Sekundärrohstoffen trägt zudem dazu bei, die durch den Rohstoffabbau bedingte Umweltzerstörung zu verhindern, biologisch wertvolle Flächen zu schützen und die Biodiversität zu erhalten.¹⁵⁷
- **Emissionseinsparung und Klimaschutz:** Der Sekundärrohstoffeinsatz wirkt sich positiv auf die Klimabilanz der Metallgewinnung aus. Durch den Schrotteinsatz in pyrometallurgischen Prozessen lassen sich neben Energie auch prozessbedingte CO₂-Emissionen einsparen. Werden zudem Sekundärrohstoffe aus regionalen Quellen eingesetzt, sinken durch reduzierte Rohstoffimporte transportbedingte CO₂-Emissionen¹⁵⁸. Die Emissionen der EU-Grundstoffindustrie, einschließlich der Metallindustrie, könnten laut Material Economics¹⁵⁹ durch kreislaufwirtschaftliche Maßnahmen bis 2050 um ca. 56 % gesenkt werden. Einen zentralen Hebel stellt der verstärkte Schrotteinsatz in der Stahl- und Aluminiumerzeugung dar. So ließen sich 2019 durch den Schrotteinsatz in

der Stahlindustrie global ca. 950 Millionen Tonnen CO₂¹⁶⁰ einsparen.

- **Abfallvermeidung:** Eine zirkuläre Metallindustrie leistet einen entscheidenden Beitrag zur Abfallvermeidung. Durch die konsequente Aufbereitung metallischer Abfälle und Schrotte sowie die anschließende Nutzung als Sekundärrohstoff in Produktionsprozessen reduzieren sich sowohl die Menge der zu deponierenden Abfälle als auch die Menge der Abfallexporte.¹⁶¹ Recyclinggerechtes Produktdesign und die gezielte Herstellung langlebiger Produkte (z. B. robuste Legierungen) verlängern die Nutzungsdauer. Hieraus resultiert ein geringeres Abfallaufkommen und Primärrohstoffe werden geschont.¹⁶² Fortschrittliche Sortier- und Recyclingtechnologien bilden die Basis für eine sortenreine und damit hochwertige Aufbereitung metallischer Abfälle und Schrotte.

Eine zirkuläre Metallindustrie trägt durch eine nachhaltige Diversifizierung zur Stärkung der Wirtschaft bei und reduziert schädliche Umwelteinflüsse. Es werden neue Arbeitsplätze geschaffen und Kosten bei einer insgesamt importunabhängigeren Produktion eingespart. Eine zirkuläre Metallindustrie kann als zentraler Hebel beim Klimaschutz fungieren. Limitierend wirken derzeit infrastrukturelle, technische und regulatorische Hürden wie z. B. das Fehlen effektiver Rücknahme- bzw. Sammelsysteme sowie der Sortenreinheit von Legierungsschrotten oder komplexe Genehmigungsverfahren.

¹⁵⁵ Vgl. Kick, M.; Okatz, J. und Herrmann, S. (2025), S. 10.

¹⁵⁶ Vgl. Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. und Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2021), S. 31.

¹⁵⁷ Vgl. Europäisches Parlament (2023).

¹⁵⁸ Vgl. Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V (bvse). und Verband deutscher Metallhändler und Recycler e.V. (2025), S. 31.

¹⁵⁹ Vgl. Material Economics (2018), S. 23.

¹⁶⁰ Vgl. ZEG Informationszentrum Entwässerungstechnik Guss e.V. (o. D.).

¹⁶¹ Vgl. European Environment Agency (2019), S. 14.

¹⁶² Vgl. Europäische Kommission (2024), S. 2.

5 HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN ZUR ZIRKULARITÄTSSTEIGERUNG FÜR KMU IN DER METALLINDUSTRIE

Zirkuläres Wirtschaften – im Rahmen der Metallindustrie vor allem „Recycling“ gemäß R-Strategien – lässt sich durch eine Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen umsetzen. Nachfolgend werden zentrale Maßnahmen für KMU der Metallbranche vorgestellt, die entweder übergeordnet, d. h. in mehreren Handlungsfeldern angesiedelt sind bzw. Synergien zwischen den verschiedenen Agierenden der Wertschöpfungskette schaffen oder einen eher verfahrenstechnischen Ansatz (z. B. innovative Sortierverfahren) verfolgen.

- **Optimierung von Stoffstrommanagement und Datenerfassung:** Eine möglichst sortenreine Erfassung der Recyclinginputströme – inklusive der systematischen Dokumentation von Inputmenge und Legierungszusammensetzung z. B. durch den Einsatz von Produktpässen¹⁶³ und digitalen Tools – trägt zu einer qualitativ hochwertigen Aufbereitung bei. Die präzise Erfassung und Nachverfolgung der verschiedenen Recyclinginputströme wirken sich damit positiv auf die Qualität des späteren Produkts und auch auf dessen Rückführbarkeit am EoL in den ursprünglichen Produktionsprozess aus.
- **Sortier- und Analysetechnologien weiterentwickeln:** Moderne Sortier- und Analysetechnik liefert die Grundlage für eine sortenreine Trennung der verschiedenen Wertmetalle bzw. Legierungszusammensetzungen.

Eine möglichst zerstörungsfreie Demontage werthaltiger Komponenten trägt ebenso wie die kontinuierliche Weiterentwicklung von Sortierprozessen zur Qualitätssicherung und damit zu einem höheren wirtschaftlichen Wert des späteren Rezyklats bei.^{164 165}

- **Verbindliche und einheitliche Sammel- und Separationsstandards etablieren:** Interne Abläufe sind so anzupassen, dass wertstoffhaltige Reststoffe effizient gesammelt und getrennt werden. Die Schaffung einheitlicher betrieblicher sowie branchenweiter Standards für die Sammlung, Trennung und Aufbereitung trägt dazu bei, Metalle am EoL möglichst vollständig in den Kreislauf zurückzuführen.¹⁶⁶
- **Sekundärrohstoffeinsatz in Produktionsprozessen kontinuierlich steigern:** Bei ausreichendem Angebot sollten Sekundärrohstoffe Primärrohstoffen grundsätzlich vorgezogen werden. Ausnahmen bestehen, wenn der Aufbereitungsaufwand des Sekundärrohstoffs keinen ökologischen Mehrwert bietet oder aufgrund von Störelementen wie z. B. Kupfer in Stahlschrott Qualitätseinbußen beim späteren Produkt zu erwarten sind. Abhilfe können hier innovative Sortierverfahren schaffen, um Schrotte möglichst sortenrein zu trennen. Des Weiteren sollte regelmäßig geprüft werden, ob der Produktionsprozess eine Erhöhung des Sekundärrohstoffeinsatzes aus technischer Sicht zulässt. Gleichzeitig sollte die Kundschaft durch die Bereitstellung umfassender Informationen für die ökologischen und ökonomischen Vorteile eines Sekundärmaterialeinsatzes sensibilisiert werden.

¹⁶³ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2023), S. 12.

¹⁶⁴ Vgl. Mrotzek-Blöß, A. et al. (2015), S. 61.

¹⁶⁵ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2023), S. 12.

¹⁶⁶ Vgl. Deutsche Rohstoffagentur (2023), S. 12.

- **Recyclinggerechtes Produktdesign fördern:** Eine modulare Gestaltung, leichte Demontierbarkeit sowie der Verzicht auf Verbundmaterialien fördern die spätere Kreislaufführung von Produkten. So können die Vorteile recyclinggerechten Produktdesigns der Kundschaft bspw. über den unternehmenseigenen Vertrieb nähergebracht werden. Strategische Partnerschaften und Unternehmenskooperationen entlang der Wertschöpfungskette können zusätzlich dazu beitragen, Rücknahmesysteme und Demontagestrategien zwischen den verschiedenen Agierenden besser abzustimmen und zirkuläre Geschäftsmodelle so weiter zu stärken.
- **Prozessoptimierung durch technische Innovation und Weiterbildungsmaßnahmen:** Ein turnusmäßiges Monitoring aktueller Entwicklungen und Technologietrends, bspw. im Bereich innovativer Analyse- und Sortierverfahren, kann helfen, Optimierungspotenziale im Rahmen der eigenen Produktion zu identifizieren und den notwendigen Investitionsbedarf abzuschätzen. Mitarbeitende sollten zudem regelmäßig zu Themen wie Stoffstrommanagement und Qualitätssicherung geschult werden, um sie an der Entwicklung kreislaufwirtschaftlicher Maßnahmen zu beteiligen. So können Mitarbeitende wichtige Impulse geben, um z. B. auf innerbetrieblicher Ebene weitere Optimierungspotenziale für eine zirkuläre Produktion zu identifizieren.
- **Ressourceneffizienz im gesamten Betrieb:** Neben dem eigentlichen Recyclingprozess gilt es, die gesamte Produktion so ressourcenschonend wie möglich zu gestalten. Entscheidende Stellhebel sind hier die Abfallvermeidung, Maßnahmen zur Energieeinsparung, optimierte Transportwege oder der Einsatz nachhaltigen Verpackungsmaterials.
- **Förderprogramme nutzen:** Förderprogramme der EU, des Bundes, der Länder oder Brancheninitiativen können Unternehmen bei Investitionen in Technik, Datenerfassung oder Fachpersonal finanziell unterstützen und so zirkuläre Maßnahmen in der Metallindustrie weiter vorantreiben.

6 FAZIT

Die Etablierung zirkulärer Wirtschaftsweisen gilt als zentraler Schritt hin zu einer nachhaltigeren Metallindustrie, die nicht zuletzt auch durch resilientere Lieferketten im Stande ist, eine höhere Versorgungssicherheit der Produktion zu gewährleisten.

Das Schließen von Kreisläufen ist vor allem bei den Massenmetallen Eisen (Stahl), Kupfer und Aluminium bereits weit vorangeschritten. Die Notwendigkeit der Kreislaufführung kritischer bzw. strategischer Metalle rückt zunehmend in den Fokus von Politik und Wirtschaft. Seitens der politischen Entscheidungstragenden wurden daher entsprechende Initiativen (z. B. Europäischer Green Deal, CEAP, CRMA, SMAP), Gesetze und Verordnungen (z. B. Batterieverordnung) in die Wege geleitet.

Insbesondere im Bereich des Recyclings von SE-Magneten, Batteriematerialien und Solarmodulen existieren zahlreiche Pilotanlagen und vielversprechende Forschungsprojekte. Potenziale zur Kreislaufführung bestehen vor allem mit Blick auf sogenannte Technologiemetalle im Bereich der Digitalisierung und Hochleistungselektronik.

Zeitgleich steht die Metallindustrie trotz technologischer Fortschritte und politischer Ambitionen vor praktischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Diese betreffen unter anderem die sortenreine Sammlung und Sortierung metallischer Abfälle, den Verlust seltener Metalle im Recyclingprozess, fehlende wirtschaftliche Anreize für herstellende Unternehmen, zirkulär zu wirtschaften, sowie unzureichende regulatorische Rahmenbedingungen (z. B. unklare Definitionen hinsichtlich der End-of-Waste-Kriterien¹⁶⁷, langwierige und umfangreiche Genehmigungsverfahren, Restriktionen bei grenzüberschreitender Verwertung von Recyclingmaterial usw.). Außerdem wirken sich komplexe Produktdesigns, aber auch globale Lieferketten erschwerend auf die Rückgewinnung und Wiederverwertung von Metallen aus.

Eine erfolgreiche Transformation hin zu einer zirkulären Metallwirtschaft erfordert daher nicht nur technologische Innovationen, sondern auch systemische Veränderungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette sowie ein gesamtgesellschaftliches Umdenken hinsichtlich mehr Nachhaltigkeit, Umwelt- und Klimaschutz.

¹⁶⁷ Vgl. Ausführungen „Abfallrahmenrichtlinie (Richtlinie 2008/98/EG)“ auf S. 24 des vorliegenden Kurzpapiers.

LITERATURVERZEICHNIS

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V. (2025): Raus aus der Abhängigkeit – Wie sichern wir die Rohstoffversorgung für Deutschland? [online] [abgerufen am: 29.06.2025], verfügbar unter: <https://www.acatech.de/allgemein/aad-rohstoffversorgung-fuer-deutschland/>

Altaf, C. T.; Colak, T. O.; Karagoz, E.; Kurt, M.; Sankir, N. D. und Sankir, M. (2024): A Review of the Recent Advances in Composite Membranes for Hydrogen Generation Technologies. In: ACS Omega, **9**, S. 23138–23154 [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acsomega.4c00152?ref=article_openPDF

Aluminium Deutschland e. V. (2022): IAI-Studie unterstreicht wichtige Rolle von Aluminiumdosen in einer Circular Economy [online] [abgerufen am: 05.06.2025], verfügbar unter: https://www.aluminiumdeutschland.de/2022/03/15/iai-studie-unterstreicht-wichtige-rolle-von-aluminiumdosen-in-einer-circular-economy/?utm_source=chatgpt.com

Aluminium Deutschland e. V. (2025): Produktion von Rohaluminium – Statistik [online] [abgerufen am: 10.06.2025], verfügbar unter: <https://www.aluminiumdeutschland.de/statistiken/produktion-von-rohaluminium/>

alu-verkauf GmbH (2025): Recycling von Aluminium [online] [abgerufen am: 05.06.2025], verfügbar unter: <https://alu-verkauf.de/blogs/aluminium-basics/recycling-von-aluminium>

Aromaa-Stubb, R.; Rinne, M. und Lundström, M. (2024): Life Cycle Assessment of Cobalt Catalyst Production and Recycling. In: Journal of Sustainable Metallurgy, **10**, S. 1795–1806 [abgerufen am: 04.11.2025], verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-024-00897-0?utm>

Bayern Innovativ GmbH (2023): Kunststoffrecycling als Chance? [online] [abgerufen am: 31.10.2025], verfügbar unter: <https://www.bayern-innovativ.de/emagazin/detail/de/seite/kunststoff-recycling-als-chance>

Bayern Innovativ GmbH (2024): Gesucht: Recycling-Strategien für Solarmodule [online] [abgerufen am: 11.06.2025], verfügbar unter: <https://www.bayern-innovativ.de/emagazin/detail/de/seite/gesucht-recycling-strategien-fuer-solarmodule>

Behrend Institut (2025): Circular Economy – Chancen und Herausforderungen für den Wirtschaftsstandort Rheinland, Frankfurt am Main [abgerufen am: 31.03.2025], verfügbar unter: <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/6376148/7baf18ca63608b63f1376203ea309198/iir-broschuere-circular-economy-data.pdf>

Blenkinsop, P. und Payne, J. (2025): Trump tariffs fan calls by European metal producers for scrap export curbs [online] [abgerufen am: 11.11.2025], verfügbar unter: <https://www.reuters.com/sustainability/climate-energy/trump-tariffs-fan-calls-by-european-metal-producers-scrap-export-curbs-2025-06-24>

Breithaupt, T. (2023): Germanium Verwendung im Alltag und Hightech [online] [abgerufen am: 29.06.2025], verfügbar unter: <https://www.business-leaders.net/germanium-verwendung-im-alltag-und-hightech/>

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (2024): Die H2Giga-Projekte im Detail [online] [abgerufen am: 02.07.2025], verfügbar unter: <https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/leitprojekte/h2giga/projekte>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2019): Rohstoffstrategie der Bundesregierung – Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen, Berlin [abgerufen am: 17.06.25], verfügbar unter: https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland (2024): Kreislaufwirtschaft – Herausforderungen und Wege der Transformation [abgerufen am: 21.02.2025], verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975274/2267582/41d556399a506f2b1bf06fdeb80428d2/2024-03-27-transformationsbericht-kreislaufwirtschaft-data.pdf?download=1>

Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. und Deloitte GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft (2021): Zirkuläre Wirtschaft – Herausforderungen und Chancen für den Industriestandort Deutschland, München [abgerufen am: 05.08.2025], verfügbar unter: https://www.deloitte.com/content/dam/assets-zone2/de/de/docs/about/2024/Zirkul%C3%A4re%20Wirtschaft%20Studie_Deloitte%20und%20BDI.pdf

Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung e.V. (bvse). und Verband deutscher Metallhändler und Recycler e.V. (2025): Position der Recyclingverbände zu möglichen Exportrestriktionen von Stahl- und Metallschrotten [online] [abgerufen am: 24.03.25], verfügbar unter: https://media.licdn.com/dms/document/media/v2/D4D1FAQFKiqpCF4pnLQ/feedshare-document-pdf-analyzed/B4DZW3.e3IH4AY-/0/1742548369393?e=1743638400&v=beta&t=m9Wfq_QJXrQ0mPj0Us8s98-upJbHM1Pb06_7kC988_g

bvse-Fachverband Schrott, E-Schrott und Kfz-Recycling (2023): Technologiemetalle aus Elektroschrott gewinnen [online] [abgerufen am: 27.06.25], verfügbar unter: <https://www.bvse.de/schrottelektronikgeraete-recycling/nachrichten-schrott-eschrott-kfz/9986-technologiemetalle-aus-elektroschrott-gewinnen.html>

Circular Valley Foundation (2023): Kreislaufwirtschaft – Recycling von Platin [online] – Bosch schließt den Kreis und kauft Brennstoffzellenstacks zurück [abgerufen am: 16.07.2025], verfügbar unter: <https://www.solarify.eu/2023/09/17/038-kreislaufwirtschaft-recycling-von-platin/>

Circular Valley Stiftung (2023): Kreislaufwirtschaft – Recycling von Platin [online] [abgerufen am: 14.07.2025], verfügbar unter: <https://www.solarify.eu/2023/09/17/038-kreislaufwirtschaft-recycling-von-platin/>

Deigner, S. (2022): Silizium – ein risikobehafteter Rohstoff? [online] – Die Rolle der kritischen Rohstoffe für die Elektroindustrie [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/elektronik-fertigung/silizium-ein-risikobehafteter-rohstoff-780.html>

DETAIL Architecture GmbH (2024): Heraeus Remloy recycelt Seltene-Erden-Magnete [online] [abgerufen am: 16.07.2025], verfügbar unter: <https://www.recyclingmagazin.de/2024/05/14/heraeus-remloy-recycelt-seltene-erden-magnete>

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (o. D.): Rückgewinnung von Silber als Schlüssel für ein wirtschaftliches Recycling von kristallinen Silizium-Solarmodulen [online] [abgerufen am: 16.07.2025], verfügbar unter: <https://www.dbu.de/projektdatenbank/37555-01/>

Deutsche Messe (2024): Elementare Verbesserung [online] [abgerufen am: 31.07.2025], verfügbar unter: <https://www.hannovermesse.de/de/news/news-fachartikel/elementare-verbesserung>

Deutsche Rohstoffagentur (2020): Aluminium – Informationen zur Nachhaltigkeit [abgerufen am: 27.03.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/aluminium.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Deutsche Rohstoffagentur (2022): Factsheet Gallium [online] [abgerufen am: 18.06.2025], verfügbar unter: https://www.whymap.org/DERA/DE/Downloads/factsheet-ga.pdf?__blob=publicationFile&v=2

Deutsche Rohstoffagentur (2023): Abschlussbericht der Dialogplattform Recyclingrohstoffe, Berlin, DERA Rohstoffinformationen, 58 [abgerufen am: 12.08.2025], verfügbar unter: https://www.recyclingrohstoffe-dialog.de/Recyclingrohstoffe/DE/Downloads/58_DERA_Dialogplattform_Recyclingrohstoffe_Langversion.pdf;jsessionid=ED15999AFC5640ED08BD36CE98BBC00B.internet992?__blob=publicationFile&v=2

Deutsche Rohstoffagentur (2024a): Eisen – Factsheet [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/factsheet_Fe_24.pdf;jsessionid=E5CF35272B336AB094D14F21FE750A6A.internet991?__blob=publicationFile&v=1

Deutsche Rohstoffagentur (2024b): Factsheet Aluminium [online] [abgerufen am: 10.06.25], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Factsheet_AL_24.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Deutsche Rohstoffagentur (2024c): Factsheet Indium, Berlin [abgerufen am: 27.06.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/factsheet_In_24.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Deutsche Rohstoffagentur (2024d): Kupfer – Factsheet [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/factsheet_Cu_24.pdf;jsessionid=E5CF35272B336AB094D14F21FE750A6A.internet991?__blob=publicationFile&v=1

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (2022): Hohe Preise für Kupfer, Lithium, Nickel und Kobalt könnten Energiewende ausbremsen [abgerufen am: 04.06.2025], verfügbar unter: https://www.diw.de/de/diw_01.c.834112.de/hohe_preise_fuer_kupfer__lithium__nicke_l_und_kobalt_koenn-ten_energiewende_ausbremsen.html

Deutsches Kupferinstitut (2019): Recycling von Kupferwerkstoffen [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://kupfer.de/wp-content/uploads/2019/10/Recycling-von-Kupferwerkstoffen-final.pdf>

Dittrich, M.; Limberger, S.; Ewers, B.; Stalf, M.; Knappe, F. und Vogt, R. (2021): Sekundärrohstoffe in Deutschland, Heidelberg [abgerufen am: 31.10.2025], verfügbar unter: https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/konsumressourcenmuell/2104-22-ifeu-studie-sekundaerrohstoffe_in_deutschland.pdf

Dormann, L.; Sann-Ferro, K.; Heininger, P. und Mähliß, J. (2021): Kompendium: Li-Ionen-Batterien – Grundlagen, Merkmale, Gesetze und Normen, Frankfurt am Main [abgerufen am: 10.07.2025], verfügbar unter: <https://www.dke.de/resource/blob/933404/fa7a24099c84ef613d8e7afd2c860a39/kompendium-li-ionen-batterien-data.pdf>

Drobe, M. (2022): Platingruppenmetalle – Informationen zur Nachhaltigkeit, Hannover, verfügbar unter: https://www.pebs-eu.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/PGM.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Duesenfeld GmbH (o. D.): Ecofriendly Recycling of Lithium-Ion Batteries [online] [abgerufen am: 11.07.2025], verfügbar unter: https://www.duesenfeld.de/recycling_en.html

Ekman Nilsson, A.; Macias Aragonés, M.; Arroyo Torralvo, F.; Dunon, V.; Angel, H.; Komnitsas, K. und Willquist, K. A. (2017): A Review of the Carbon Footprint of Cu and Zn Production from Primary and Secondary Sources. In: Minerals, **7** (9) [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2075-163X/7/9/168>

ella Verlag und Medien GmbH (2023): Recyclingaluminium in der Verpackung – sinnvoll, ehrlich, verantwortungsbewusst? [online] [abgerufen am: 05.06.2025], verfügbar unter: <https://packaging-journal.de/recyclingaluminium-linhardt-verpackung/>

EuRIC AISBL (2020): Fakten Metallrecycling, Brüssel [abgerufen am: 02.06.2025], verfügbar unter: https://www.bvse.de/dateien2020/2-PDF/06-Publikationen/04-Broschueren/0608-EuRIC_Metal_Recycling_Factsheet_GER_002.pdf

Europäische Kommission (2024): EU-Verordnung 2024/1781 [abgerufen am: 11.08.2025], verfügbar unter: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401781ecodesign-sustainable-products-regulation_en

Europäische Kommission (2020): Änderung unserer Produktions- und Verbrauchsmuster: neuer Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft ebnet Weg zu klimaneutraler und wettbewerbsfähiger Wirtschaft mit mündigen Verbrauchern, Brüssel [abgerufen am: 31.03.2025], verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_20_420/IP_20_420_DE.pdf

Europäische Kommission (2025): Fragen und Antworten zum Aktionsplan für Stahl und Metalle [online] [abgerufen am: 08.09.2025], verfügbar unter: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/qanda_25_806/QANDA_25_806_EN.pdf

Europäischer Bund der Recyclingindustrien (2021): EuRIC-Strategie für Metalle in der Kreislaufwirtschaft [online] [abgerufen am: 11.03.2025], verfügbar unter: https://euric.org/images/Position-papers/2021_03_EuRIC_Circular_Metals_Strategy_DE.pdf

Europäisches Parlament (2023): Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile [online] [abgerufen am: 07.08.2025], verfügbar unter: https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2023/6/story/20151201STO05603/20151201STO05603_de.pdf/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile

Europäische Union (2011): Amtsblatt der Europäischen Union, Luxemburg, Rechtsvorschriften, 54 [abgerufen am: 12.08.2025], verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2011:094:FULL>

European Environment Agency (2019): Paving the way for a circular economy – Insights on status and potentials, Luxemburg, EEA report, 11 [abgerufen am: 11.08.2025], verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/circular-economy-in-europe-insights/circular-economy-in-europe-insights/@@download/file>

European Recycling Industries' Confederation (2025a): EU Recyclers' Circular Economy Action Plan for Recycled Metals [online] [abgerufen am: 08.09.2025], verfügbar unter: <https://euric.org/images/Reports-Studies/Print%20Version%20-%20EuRICs%20Circular%20Economy%20Action%20Plan%20for%20Recycled%20Metals.pdf>

European Recycling Industries' Confederation (2025b): Why the sliding scale is a slippery stone for defining green steel, Brüssel [abgerufen am: 08.09.2025], verfügbar unter: https://euric.org/images/Position-papers/EuRIC_Position_Paper_-_Sliding_Scale_2025.pdf

European Steel Association (2020): Circular Economy Action Plan a “step in the right direction”, says EUROFER [online] [abgerufen am: 10.09.2025], verfügbar unter: <https://www.eurofer.eu/assets/press-releases/circular-economy-action-plan-a-step-in-the-right-direction-says-eurofer/Press-Release-Circular-Economy-Action-Plan-a-step-in-the-right-direction-says-EUROFER-1.pdf>

Eurostat (2023): Contribution of recycled materials to raw materials demand – end-of-life recycling input rates (EOL-RIR) [online] [abgerufen am: 06.11.2025], verfügbar unter: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_srm010/default/table

Europäische Union (2009): RICHTLINIE 2009/125/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Neufassung) [abgerufen am: 03.03.2026], verfügbar unter: https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Downloads/P-R/oeko-design-richtlinie.pdf?__blob=publicationFile&v=1

Ferro, P. und Bonollo, F. (2019): Design for Recycling in a Critical Raw Materials Perspective. In: Recycling, 4 (4) [abgerufen am: 07.11.2025], verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2313-4321/4/4/44>

Flöer, L.; Gründig, D.; Langmaack, H.; Norpot, K.; Wilts, H.; Andree, P. und Goßlau, N. (2025): Kreislaufwirtschaft als Zukunftsstrategie – Neue Wege für die energieintensive Industrie in Deutschland am Beispiel der Stahl-, Kunststoff- und Zementindustrie, Berlin [abgerufen am: 04.08.2025], verfügbar unter: https://www.dena.de/fileadmin/dena/Publikationen/PDFs/2025/Kreislaufwirtschaft_als_Zukunftsstrategie_.pdf

Forschungszentrum Jülich GmbH (2024): Kupfer ist das neue Silber [online] [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.energieforschung.de/de/aktuelles/news/2023/kupfer-ist-das-neue-silber>

Fraser, M.; Conde, Á. und Haigh, L. (2024): The Circularity Gap Report 2024, Amsterdam [abgerufen am: 20.02.2025], verfügbar unter: <https://reports.circularity-gap.world/cgr-global-2024-37b5f198/CGR+Global+2024+-+Report.pdf>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2018): Ein Drittel des Sonnenlichts in Strom wandeln – 33,3 Prozent Mehrfachsolarzelle auf Siliciumbasis [online] [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2018/ein-drittel-des-sonnenlichts-in-strom-wandeln-33-komma-3-prozent-mehrfachsolarzelle-auf-silicium-basis.html>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2022): PERC-Solarzellen aus 100 Prozent recyceltem Silizium [online] [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2022/perc-solarzellen-aus-recyceltem-silizium-hergestellt.html>

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2025): EoL – Entwicklung eines industrietauglichen Recycling-Prozesses für PV-Module [online] [abgerufen am: 11.06.2025], verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/eol.html>

Fraunhofer UMSICHT (2021): David Tetzlaff über die Suche nach einem edelmetallfreien Katalysator [online] [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2021/edelmetallfreier-katalysator.html>

Gelowicz, S. (2023): Abhängigkeit bei Gallium und Germanium „Es gibt jetzt ein Strohfeuer von Bestellungen“ [online], verfügbar unter: <https://www.wiwo.de/unternehmen/industrie/abhaengigkeit-bei-gallium-und-germanium-es-gibt-jetzt-ein-strohfeuer-von-bestellungen/29244068.html>

**Graedel, T. E.; Allwood, J.; Birat, J.-P.; Reck, B. K.; Sibley, S. F.; Sonnemann, G.; Buchert, M. und Hage-
lücken, C. (2011):** Recycling Rates of Metals – A Status Report. A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel, Paris [abgerufen am: 01.08.2025], verfügbar unter: https://www.resourcepanel.org/file/381/download?token=he_rldvr

Greenhouse Media GmbH (2024): PV-Ratgeber: Solarmodule richtig recyceln [online] [abgerufen am: 17.07.2025], verfügbar unter: <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/recycling>

H2News (2023): Iridium [online], verfügbar unter: <https://h2-news.de/glossary/iridium/>

Hannen, P. (2021): Solar Materials will Rohstoffkreislauf von Photovoltaik-Modulen schließen [online] [abgerufen am: 11.06.2025], verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2021/11/10/solar-materials-will-rohstoffkreislauf-von-photovoltaik-modulen-schliessen>

Hartmann, S. (2022): Deutschland ist in Europa Vorreiter bei Recyclinganlagen für Lithium-Ionen-Batterien [online] [abgerufen am: 11.07.2025], verfügbar unter: <https://www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/deutschland-in-europa-vorreiter-bei-recyclinganlagen-fuer-lithium-ionen-batterien-240522/>

Heisig, A. (2024): IG Metall begrüßt Verabschiedung des europäischen Lieferkettengesetzes durch den Rat der EU [online] [abgerufen am: 12.11.2025], verfügbar unter: <https://www.igmetall.de/presse/pressemitteilungen/ig-metall-begruesst-verabschiedung-des-europaeischen-lieferkettengesetzes>

Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf e. V. (2021): Hightech-Abfall biologisch recyceln [online] – Innovatives biotechnologisches Verfahren löst Gallium aus Industrieabwässern [abgerufen am: 18.06.2025], verfügbar unter: <https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=63041&pNid=3438>

Henke, J. (2023): Iridium-Knappheit könnte Wasserstoff-Ausbau bremsen [online] [abgerufen am: 31.07.2025], verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/finanzen/maerkte/devisen-rohstoffe/energiewende-iridium-knappheit-koennte-wasserstoff-ausbau-bremsen/29352898.html>

Herwarth-Molland, V. von (2022): Recycling 4.0. – so gewinnt LuxChemtech kostbare Rohstoffe [online] [abgerufen am: 15.07.2025], verfügbar unter: <https://www.fuer-gruender.de/blog/luxchemtech/>

hesselmann service GmbH (2024): Die neue EU-Batterieverordnung 2023 (BATT2) [online] [abgerufen am: 10.07.2025], verfügbar unter: <https://www.batteriegesetz.de/themen/die-neue-batterieverordnung-batt2-2023/>

Hochschule Mittweida (2024): Fokus Forschung: Nebengruppenelement steht im Mittelpunkt [online] [abgerufen am: 02.07.2025], verfügbar unter: <https://www.forschung.hs-mittweida.de/news/aktuell/8391/>

Hochwarth, D. (2025): Palladium statt Platin: Günstiger Wasserstoff-Katalysator entdeckt [online] [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/palladium-statt-platin-guenstiger-wasserstoff-katalysator-entdeckt/>

Hüsken, G.-M. (2022): Supply Chain: Rohstoffschwankungen effizient managen [online] [abgerufen am: 06.08.2025], verfügbar unter: <https://live.handelsblatt.com/supply-chain-rohstoffschwankungen-effizient-managen/>

Indium Corporation (2025): Rückgewinnung und Wiederverwertung [online] [abgerufen am: 27.06.2025], verfügbar unter: <https://www.indium.com/de/products/reclaim-and-recycle/>

innoscripta AG (2015): Earth Day 2015 – Platin dreht sich immer im Kreis [online] [abgerufen am: 03.07.2025], verfügbar unter: <https://www.innovations-report.de/landwirtschaft-umwelt/oekologie-umwelt-naturschutz/earth-day-2015-platin-dreht-sich-immer-im-kreis/>

International Energy Agency (2021): The Role of Critical World Energy, Paris [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ffd2a83b-8c30-4e9d-980a-52b6d9a86fdc/TheRoleofCriticalMineralsinCleanEnergyTransitions.pdf>

Investitions- und Marketinggesellschaft Sachsen-Anhalt mbH (2024): SOLAR MATERIALS baut industrielle Recyclinganlage für Solarmodule [online] [abgerufen am: 06.11.2025], verfügbar unter: <https://hier-we-go.de/news-termine/news/artikel/solar-materials-baut-industrielle-recyclinganlage-fuer-solarmodule>

Jenke, S. (2023a): Bosch ermöglicht fast vollständige Platin-Rückgewinnung aus Stacks [online] [abgerufen am: 06.11.2025], verfügbar unter: <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/bosch-ermoeglicht-fast-vollstaendige-platin-rueckgewinnung-aus-stacks/>

Jenke, S. (2023b): TU Bergakademie Freiberg: Recycling von Edelmetallen der Elektrolyse [online] [abgerufen am: 31.07.2025], verfügbar unter: <https://h2-news.de/forschung/tu-bergakademie-freiberg-recycling-von-edelmetallen-der-elektrolyse/>

Jenke, S. (2025): Neuer Katalysator für Ammoniak-Cracking entwickelt [online] [abgerufen am: 31.07.2025], verfügbar unter: <https://h2-news.de/wirtschaft-unternehmen/neuer-katalysator-fuer-ammoniak-cracking-entwickelt/>

Karaca, A. (2022): Eignung von nickelhaltigen Katalysatorsystemen in sauren Medien zur Nutzung im Betrieb von Brennstoffzellen, Jülich [abgerufen am: 29.07.2025], verfügbar unter: <https://publications.rwth-aachen.de/record/856958/files/856958.pdf?version=1>

Kick, M.; Okatz, J. und Herrmann, S. (2025): Den Kreislauf in die Energieintensive Industrie bringen: – 10 Schlüsseltechnologien für die deutsche Stahl-, Zement- und Chemieindustrie, Berlin [abgerufen am: 07.08.2025], verfügbar unter: <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Klima/WWF-Kreislaufwirtschaftstechnologien.pdf>

Klatt, R. (2022): Nanoteilchen aus Palladium speichern Wasserstoff [online] [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: <https://www.forschung-und-wissen.de/nachrichten/chemie/nanoteilchen-aus-palladium-speichern-wasserstoff-13375695>

Köllner, C. (2023): Wie lässt sich Kobalt in E-Auto-Batterien reduzieren? [online] [abgerufen am: 10.07.2025], verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/batterie/rohstoffe/wie-laesst-sich-kobalt-in-e-auto-batterien-reduzieren-/26220782>

Kompetenznetzwerk Lithium-Ionen-Batterien e.V. (2025): Lithium-Ionen-Batterien [online] [abgerufen am: 11.07.2025], verfügbar unter: <https://www.batterieforum-deutschland.de/lexikon/lithium-ionen-batterien/>

Kresse, C.; Bastian, D.; Bookhagen, B. und Frenzel, M. (2022): Lithium-Ionen-Batterierecycling in Deutschland und Europa [online] [abgerufen am: 11.07.2025], verfügbar unter: https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/67_Lithium-Ionen-Batterierecycling.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Kubitz, D. und Schmied, A. (2025): Auf dem Weg zum zirkulären Produkt – Unterstützungsangebote für Unternehmen, Gütersloh [abgerufen am: 04.08.2025], verfügbar unter: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/user_upload/Final_Circo_Publikation.pdf

Kuchta, K. und Schön, F. (2014): Rückgewinnung von Platingruppenmetallen aus Abgaskatalysatoren [online]. In: Titel; Thomé-Kozmiensky, K.J. und Goldmann, D., Hg. Recycling und Rohstoffe, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, S. 138–145 [abgerufen am: 14.07.2025], verfügbar unter: https://books.vivis.de/wp-content/uploads/2023/03/2014_RuR_137_146_Kuchta.pdf

Kupferverband e.V. (2025a): Elektromobilität [online] [abgerufen am: 16.06.2025], verfügbar unter: <https://kupfer.de/anwendungen/elektrotechnik-und-energie/elektromobilitaet/>

Kupferverband e.V. (2025b): Kupfer und Circular Economy [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/kreislaufwirtschaft/>

Kupferverband e.V. (2025c): Ressourcenschonung dank Recycling [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://kupfer.de/kupferwerkstoffe/nachhaltigkeit/recycling>

Leibniz-Zentrum für Marine Tropenforschung (2023): Kreislaufwirtschaft für Seltene Erden [online] [abgerufen am: 17.06.2025], verfügbar unter: <https://www.leibniz-gemeinschaft.de/ueber-uns/neues/forschungsnachrichten/forschungsnachrichten-single/newsdetails/kreislaufwirtschaft-fuer-seltene-erden#:~:text=Nur%20etwa%201%20Prozent%20der%20Seltenen%20Erden,Recycling%20von%20Seltenen%20Erden%20aus%20Produkten%20gibt.>

Li, L.; Tian, F.; Qiu, L.; Wu, F.; Yang, W. und Yu, Y. (2023): Recent Progress on Ruthenium-Based Electrocatalysts towards the Hydrogen Evolution Reaction. In: *Catalysts*, **13** (1497) [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: <https://www.mdpi.com/2073-4344/13/12/1497/pdf?version=1701943246>

Lichtenthäler, S. und Bähr, C. (2024): Neue Batterien aus Recyclingmaterial, Köln, IW-Trends, 3/2024 [abgerufen am: 12.09.2025], verfügbar unter: https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/IW-Trends/PDF/2024/IW-Trends_2024-03-06_Lichtenth%C3%A4ler-B%C3%A4hr.pdf

Liedtke, M. und Huy, D. (2018): Rohstoffrisikobewertung – Gallium, Berlin, DERA Rohstoffinformationen, 35 [abgerufen am: 18.06.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_gallium-2018.pdf?__blob=publicationFile

Liesegang, M. und Bookhagen, B. (2023): Status Quo des Recyclings bei der Metallerzeugung und -verarbeitung in Deutschland – Recyclingatlas für die Metallerzeugung, Berlin, DERA Rohstoffinformationen, 57 [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/DERA_Rohstoffinformationen/rohstoffinformationen-57.pdf;jsessionid=E5CF35272B336AB094D14F21FE750A6A.internet991?__blob=publicationFile&v=6

Life Coaching Finance (2024): Silberverbrauch: Zahlen, Fakten & Prognosen bis 2030 [online] [abgerufen am: 02.07.2025], verfügbar unter: <https://www.kettner-edelmetalle.de/wissen/silberverbrauch>

Lücke, N. (2022): Silizium-Recycling: Aus Altmodulen werden neue Solarzellen [online] [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/werkstoffe/silizium-recycling-aus-altmodulen-werden-neue-solarzellen/>

LuxChemtech GmbH (2023): ROSI und LuxChemtech bündeln ihre Kräfte, um das Photovoltaik-Recycling in Deutschland zu revolutionieren [online] [abgerufen am: 29.07.2025], verfügbar unter: <https://lc-freiberg.de/wp-content/uploads/2023/11/Pressemitteilung-D.pdf>

LuxChemtech GmbH (2025): Verfahren zur zerstörungsfreien Aufbereitung gebrauchter Solarmodule [online], verfügbar unter: <https://lc-freiberg.de/produkte-und-leistungen/aufbereitung-von-solarmodulen/>

macondo publishing GmbH (2020): EU gründet European Raw Materials Alliance [online] [abgerufen am: 17.06.2025], verfügbar unter: <https://www.umweltdialog.de/de/Gesellschaft/Politik/2020/EU-gruendet-European-Raw-Materials-Alliance.php>

Market Growth Reports (2025): Ruthenium Metal Market Size, Share, Growth, and Industry Analysis, By Type (Pure Ruthenium, Ruthenium Alloys), By Application (Electronics, Automotive Catalysts, Electrical Contacts, Fuel Cells), Regional Insights and Forecast to 2033 [online] [abgerufen am: 07.11.2025], verfügbar unter: <https://www.marketgrowthreports.com/market-reports/ruthenium-metal-market-113622>

Marscheider-Weidemann, F.; Langkau, S.; Hummen, T.; Erdmann, L. und Espinoza, L. T. (2016): Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016, Berlin, DERA Rohstoffinformationen, 28 [abgerufen am: 26.03.2025], verfügbar unter: https://www.deutsche-rohstoffagentur.de/DERA/DE/Downloads/Studie_Zukunftstechnologien-2016.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Material Economics (2018): The Circular Economy – A Powerful Force for Climate Mitigation. Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry, Stockholm [abgerufen am: 08.08.2025], verfügbar unter: <https://www.sitra.fi/app/uploads/2018/06/the-circular-economy-a-powerful-force-for-climate-mitigation.pdf>

Matos, C. T.; Ciacci, L. und Godoy León, M. F. (2020): Material System Analysis of five battery- related raw materials: Cobalt, Lithium, Manganese, Natural Graphite, Nickel, Luxemburg [abgerufen am: 10.07.2025], verfügbar unter: https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC119950/material_system_analyses_battery_21102020_online.pdf

Mischler, G. (2017): Einkauf Silizium: Rohstoff im Überfluss vorhanden [online] [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/rohstoff-silizium-im-ueberfluss-vorhanden-292.html>

Mischler, G. (2020): Einkauf Iridium: Superharter Rohstoff der Neutronensterne [online] [abgerufen am: 02.07.2025], verfügbar unter: <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/einkauf-iridium-superharter-rohstoff-der-neutronensterne-215.html>

Mischler, G. (2022): CO₂-neutrale Industrie [online] – Wie Kreislaufwirtschaft in der Metallindustrie funktioniert [abgerufen am: 02.06.2025], verfügbar unter: <https://www.produktion.de/technik/co2-neutrale-industrie/wie-kreislaufwirtschaft-in-der-metallindustrie-funktioniert-250.html>

Mischler, G. (2023): Germanium in der Beschaffung: Verwendung, Preis & Vorkommen [online] [abgerufen am: 29.06.2025], verfügbar unter: <https://www.technik-einkauf.de/rohstoffe/kritische-rohstoffe/rohstoff-germanium-das-deutsche-element-250.html>

Mook, I. (2022): Ruthenium könnte Wasserstoffproduktion kostengünstiger machen [online] [abgerufen am: 31.07.2025], verfügbar unter: <https://rohstoff.net/ruthenium-koennte-wasserstoffproduktion-kostenguenstiger-machen/>

Mrotzek-Blöß, A.; Nühlen, J.; Pflaum, H.; Rettweiler, M.; Kroop, S.; Reh, K. und Franke, M. (2015): Recyclingpotenzial von Technologiemetallen und anderen kritischen Rohstoffen als wichtige Säule der Rohstoffversorgung. Kurzstudie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Oberhausen, verfügbar unter: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/publikationen/2015/recyclingpotenzial-technologiemetalle-endbericht.pdf>

MSV Mediaservice & Verlag GmbH (2024): Batterierecycling: Innovatives Verfahren für Schwarzmasse [online] [abgerufen am: 04.11.2025], verfügbar unter: <https://eu-recycling.com/Archive/44935>

Nationaler Wasserstoffrat (2023): 1. Papier zu Forschungs- und Entwicklungsbedarfen der Materialverfügbarkeit im Bereich Wasserstoff – Verfügbarkeit von Iridium – Informations- und Grundlagenpapier [abgerufen am: 31.07.2025], verfügbar unter: https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2023/2023-09-15_NWR-Grundlagenpapier_FuE-Bedarfe_Materialverfuegbarkeit_Iridium.pdf

Nikulsk, J. S.; Ritthoff, M. und Gries, N. v. (2021): The Potential and Limitations of Critical Raw Material Recycling: The Case of LED Lamps. In: Resources, **10** (37) [abgerufen am: 18.06.2025], verfügbar unter: https://www.researchgate.net/journal/Resources-2079-9276/publication/350987460-The_Potential_and_Limitations_of_Critical_Raw_Material_Recycling_The_Case_of_LED_Lamps/links/6814acfbfbfe974b23c1d31e/The-Potential-and-Limitations-of-Critical-Raw-Material-Recycling-The-Case-of-LED-Lamps.pdf?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7ImZpcnN0UGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uIiwicGFnZSI6InB1YmxpY2F0aW9uRG93bmxvYWQiLCJwcmV2aW91c1BhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbil9fQ

Onstad, E. (2024): Recycling to kick in as long-term solution to EU rare earths challenge [online] [abgerufen am: 15.07.2025].

Peter, M.; Angst, V.; Esche, C.; Buchert, M. und Dolega, P. (2022): Volkswirtschaftliche Bedeutung und Entwicklung von Batterieproduktion und -recycling in Deutschland – KSVE20302050, Zürich [abgerufen am: 11.07.2025], verfügbar unter: https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/batterieproduktion_recycling_kurzbericht.pdf

Pothen, F. und Brock, L. V. (2021): Schrottbonus konkret – Instrumente für fairen Wettbewerb in den globalen Wertschöpfungsketten der Stahlherstellung und mikrostrukturierender Herstellungsverfahren, Leipzig [abgerufen am: 02.06.2025], verfügbar unter: https://www.imw.fraunhofer.de/content/dam/moez/de/documents/220504_Fraunhofer%20IMW_BDSV_Schrottbonus%20Konkret%3%B6ffentlich.pdf

Publications Office of the European Union (2021): Dismantling and recycling Rare Earth Elements from End-of-life products for the European Green Transition [online] [abgerufen am: 17.06.2025], verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/101057733>

Publications Office of the European Union (2023): Tiefer graben: Neue Ansätze im Kobaltrecycling bahnen den Weg in eine grünere Zukunft [online] [abgerufen am: 10.07.2025], verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/article/id/443642-digging-deeper-new-cobalt-recycling-approaches-forge-a-path-to-a-greener-future/de>

pv magazine group GmbH & Co. KG (2021): Solar Materials will Rohstoffkreislauf von Photovoltaik-Modulen schließen [online] [abgerufen am: 16.07.2025], verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/2021/11/10/solar-materials-will-rohstoffkreislauf-von-photovoltaik-modulen-schliessen/>

Rat der Europäischen Union (2024): Strategische Autonomie: Rat gibt endgültig grünes Licht für Verordnung zu kritischen Rohstoffen [online] [abgerufen am: 11.09.2025], verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2024/03/18/strategic-autonomy-council-gives-its-final-approval-on-the-critical-raw-materials-act/pdf/>

Recycling magazin (2023): Kupferrecycling: Grundlage der Versorgungssicherheit von Schlüsselindustrien [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://www.recyclingmagazin.de/2023/03/23/kupferrecycling-grundlage-der-versorgungssicherheit-von-schluesselindustrien/>

REMONDIS SE & Co. KG (o. D.): Technologiemetalle [online] [abgerufen am: 02.07.2025], verfügbar unter: <https://www.recyclingrohstoffe.de/stoffstroeme-und-klimaschutzbeitraege/technologiemetalle/>

Ristau, O. (2025): Photovoltaik-Recycling [online] [abgerufen am: 11.06.2025], verfügbar unter: <https://www.solarserver.de/wissen/basiswissen/photovoltaik-recycling>

RWE Aktiengesellschaft (2022): PV-Ratgeber: Solarmodule richtig recyceln [online] [abgerufen am: 16.07.2025], verfügbar unter: <https://www.en-former.com/so-lassen-sich-solarmodule-recyceln>

Sandig-Predzymirska, L.; Veiga Barreiros, T.; Weigelt, A.; Pitscheider, S.; Mølleskov Pedersen, C.; Kallesøe, C.; Thiere, A.; Stelter, M. und Charitos, A. (2025): Recovery of Platinum and Ruthenium from PEM Electrodes via Hydrometallurgical Approach. In: Journal of Sustainable Metallurgy, **11**, S. 145–159 [abgerufen am: 11.06.2025], verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-025-01011-8>

Schiestel, S. (2024): Silizium: Eigenschaften und Anwendungsbereiche [online] [abgerufen am: 30.06.2025], verfügbar unter: <https://www.rct-online.de/magazin/silizium-eigenschaften-und-anwendungsbereiche/>

Schwarz, M. (2025): 90 % Rückgewinnung: Forscher recyceln Katalysatoren für die Elektrolyse [online] [abgerufen am: 14.07.2025], verfügbar unter: <https://h2-news.de/forschung/90-rueckgewinnung-forscher-recyceln-katalysatoren-fuer-die-elektrolyse/>

Siebel, T. (2022): Metallrecycling muss effizienter, sauber und wirtschaftlich werden [online] [abgerufen am: 10.03.2024], verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/recycling/metalle/metallrecycling-muss-effizienter--sauber-und-wirtschaftlich-werd/23022146>

Siebel, T. (2023): Bosch führt Platin aus Brennstoffzellen im Kreislauf [online] [abgerufen am: 17.07.2025], verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/brennstoffzelle/funktionswerkstoffe/bosch-fuehrt-platin-aus-brennstoffzellen-im-kreislauf/26068190>

Steinbeis 2i GmbH (o. D.): Rückgewinnung, Wiederaufbereitung und Wiederverwendung von Seltenerdmetallen in einer Kreislaufwirtschaft (SUSMAGPRO) [online] [abgerufen am: 12.06.2025], verfügbar unter: <https://steinbeis-europa.de/de/projekte/nachhaltige-rueckgewinnung-wiederaufbereitung-und-wiederverwendung-von-seltenerdmetallen-in-einer-kreislaufwirtschaft>

Taylor, B. (2024): Secondary copper output grows in 2023 [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://www.recyclingtoday.com/news/copper-recycling-secondary-output-2023-rising-icsg>

Umweltbundesamt (2024): Nichteisenmetallindustrie Nichteisenmetallindustrie [online] [abgerufen am: 07.08.2025], verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriebereiche/herstellung-verarbeitung-von-metallen/nichteisenmetallindustrie#die-nichteisenmetallindustrie-in-deutschland>

Vallero, C. (2025): Hightech-Recycling [online], verfügbar unter: <https://www.kfw.de/stories/wirtschaft/gruenden/luxchemtech/>

VDI Technologiezentrum GmbH (o. D.): Auf dem Weg in die Lithium-Zirkularität [online] – Wie durch das Recyceln von Li-Ionen-Batterien aus E-Autos der Kreislauf des limitierten Schlüsselrohstoffs geschlossen werden kann [abgerufen am: 01.07.2025], verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/aktuelles/news/detailseite/technologiefilm-auf-dem-weg-in-die-lithium-zirkularitaet/>

Vekić, N. (2020): Lithium-Ionen-Batterien: Status, Zukunftsperspektiven, Recycling – THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien, verfügbar unter: <https://egg.agw.kit.edu/img/Lithium-Ionen-Batterien%20f%C3%BCr%20die%20Elektrom.pdf>

Verlag 320° (2014): Recyclinglösung für Indium aus LCD-Bildschirmen [online] [abgerufen am: 27.06.2025], verfügbar unter: <https://320grad.de/2014/04/28/recyclingloesung-fuer-indium-aus-lcd-bildschirmen/>

Verlag Holzhausen GmbH (2024): Kupferrecycling eine Kreislaufwirtschaft zwischen... [online] [abgerufen am: 03.06.2025], verfügbar unter: <https://derinstallateur.at/kupferrecycling-eine-kreislaufwirtschaft-zwischen>

WESTFALEN-BLATT Vereinigte Zeitungsverlage GmbH & Co. KG (2023): Weltweit größter Palladium-Lieferant erforscht Anwendung von Wasserstoffenergie [online] [abgerufen am: 30.07.2025], verfügbar unter: <https://www.westfalen-blatt.de/freizeit/ratgeber/weltweit-grosster-palladium-lieferant-erforscht-anwendung-von-wasserstoffenergie-2726696>

Wilts, H. (2015): Recycling in Deutschland – Status quo, Potenziale, Hemmnisse und Lösungsansätze, Wuppertal [abgerufen am: 02.07.2025], verfügbar unter: <https://www.kfw.de/PDF/Download-Center/Konzernthemen/Research/PDF-Dokumente-Studien-und-Materialien/SuM-Recycling-in-Deutschland-Wuppertal-Institut-Januar-2015.pdf>

Wirtschaftsvereinigung Metalle (2022): Forderungen der WVMetalle zur EU-Batterieverordnung [online] [abgerufen am: 12.09.2025], verfügbar unter: https://cdn.prod.website-files.com/655b551b01553a978275f0e7/65cf35ba9388a835d711ea1f_2021-06-22_WVMetalle_ONEPAGER_Batterien.pdf

Wirtschaftsvereinigung Metalle (2023): EU Critical Raw Materials Act: Auswirkungen auf die deutsche Nichteisen-Metallindustrie [online] [abgerufen am: 11.09.2025], verfügbar unter: https://cdn.prod.website-files.com/655b551b01553a978275f0e7/65cf319cb8ebecca6244ea82_2023-02-02__WVMetalle_Dreiseiter_CRM.pdf

Wirtschaftsvereinigung Metalle (2024): Forderungen der deutschen Metallindustrie zu den Prioritäten der EU-Kommission 2024 bis 2029 [online] [abgerufen am: 15.08.2025], verfügbar unter: https://cdn.prod.website-files.com/655b551b01553a978275f0e7/66dfec3c6d2bfd7578a82c0d_WVMetalle-Stellungnahme_Priorit%C3%A4ten%20der%20EU-Kommission%202024-2029.pdf

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2024): Statistischer Bericht - Stahlschrott 2024, Berlin [abgerufen am: 02.06.2025], verfügbar unter: https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/20240114_Stahlschrott_Bericht_NEU.pdf

Wirtschaftsvereinigung Stahl (2025): Stellungnahme zum European Steel and Metals Action Plan [online], verfügbar unter: https://www.wvstahl.de/wp-content/uploads/20250321_Stn_Steel-and-Metals-Action-Plan.pdf

Wirtschaftsvereinigung Stahl (o. D.): Stahlproduktion in Deutschland [online] [abgerufen am: 02.06.2025], verfügbar unter: <https://www.wvstahl.de/stahlstandort-deutschland/>

WOTech GbR (2019): Weichschrott oder Stückschrott – Wie aus Schlamm- und Pulverabfällen Ressourcen entstehen. In: WOMAG, (8), S. 10 [abgerufen am: 04.06.2025], verfügbar unter: https://www.wotech-technical-media.de/womag/ausgabe/2019/04/WOMag_4_19_frei.pdf

ZEG Informationszentrum Entwässerungstechnik Guss e.V. (o. D.): Kreislaufwirtschaft in der europäischen Metallindustrie [online] [abgerufen am: 06.08.2025].

Zheng, K.; Benedetti, M. F. und van Hullebusch, E. D. (2023): Recovery technologies for indium, gallium, and germanium from end-of-life products (electronic waste) - A review. In: J Environ Manage, 347 (119043) [abgerufen am: 29.06.2025], verfügbar unter: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37776794/>

VDI ZRE
Bülowstraße 78
10783 Berlin
Tel. +49 30-2759506-505

zre-info@vdi.de
www.ressource-deutschland.de

