

Innovatives Polymetallrecycling – Herausforderungen und Lösungsansätze an Schnittstellen der Prozesskette

Elinor Rombach und Bernd Friedrich

1.	Randbedingungen moderner Metallrecyclingverfahren	453
2.	Ressourceneffizienzpotentiale beim stofflichen Metallrecycling	458
2.1.	Die Aufbereitung im Prozessverbund	460
2.2.	Die Metallurgie im Prozessverbund	462
2.3.	Die Schnittstelle Aufbereitung - Metallurgie im Prozessverbund	464
3.	Beispielansatz: Ressourceneffizientes Polymetallrecycling ausgedienter Li-Ionen Batterien.....	466
3.1.	Konventionelle Recyclingrouten.....	467
3.2.	Innovative, Schnittstellen-optimierte Recyclingrouten	469
4.	Zusammenfassung und Ausblick.....	472
5.	Literatur.....	473

Die hohe Nachfrage nach modernen metallischen Werkstoffen macht es erforderlich, ein umfassendes Recycling von Metallen zu realisieren – auch um einer nachhaltigen Nutzung der entsprechenden mineralischen und metallhaltigen Rohstoffe gerecht zu werden. Vor dem Hintergrund einer langfristigen Sicherung der Rohstoffbasis für Hightech-Produkte stehen hierbei neben Massenmetallen, wie Aluminium, Kupfer, Blei und Zink, insbesondere wirtschaftsstrategische Metalle, wie Kobalt, Tantal, Wolfram etc. im Fokus aktueller Forschungsarbeiten. Ausgangspunkt für die hier vorgestellten Beiträge zur Optimierung der Schnittstelle Aufbereitung/ Metallurgie innerhalb der Prozesskette zur Rückführung komplexer, metallhaltiger Abfallströme in die Metallproduktion ist die Idee einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft.

1. Randbedingungen moderner Metallrecyclingverfahren

Das Recycling von Metallen ist seit Beginn ihrer Nutzung eine wichtige Rohstoffquelle zur Metallversorgung. Hierbei hat es der wirtschaftliche Wert metallhaltiger Abfälle seit jeher lohnend gemacht, diese im Kreislauf zu führen.

Heute stehen neben dem wirtschaftlichen Interesse verstärkt ökologische Aspekte im Vordergrund:

- Schonung von Ressourcen,
- Verminderung von Emissionen und Abfällen,
- Entlastung von Deponien und
- Einsparung an Energie.

Von besonderer Bedeutung bei der Verwertung metallhaltiger Abfälle ist die Tatsache, dass in den meisten Fällen Metalle hergestellt werden können, die in ihrer Qualität den aus Primärrohstoffen hergestellten Metallen völlig entsprechen. Somit ist Metallrecycling im Gegensatz zu beispielsweise Kunststoffen oder Zellulose im Allgemeinen nicht mit einer Degradation der Eigenschaften verbunden. Dies gilt uneingeschränkt für Kupfer, Zink und Blei sowie eingeschränkt für Eisen und Aluminium. [7]

Tabelle 1: Metallqualität beim Recycling der wichtigsten Gebrauchsmetalle

Metalle	Raffinationsmöglichkeit im Recyclingkreislauf	Qualität des Sekundärmetalls
Kupfer	vollständig	wie Primärmetall
Blei	vollständig	wie Primärmetall
Zink	vollständig	wie Primärmetall
Aluminium	nur sehr begrenzt	vermindert*
Eisen und Stahl	nur begrenzt	leicht vermindert
Ferrolegerungen	Raffination nur im Ausnahmefall	stark vermindert

*bei Sortenreinheit wie Primärmetall

Zunehmend wird das Metallrecycling in die Diskussion um eine ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft in der Metallindustrie einbezogen. So zielt die aktuelle Rohstoffstrategie Europas (*Circular Economy*) auf Kreislaufsysteme ab, in denen [...] der Wert von Produkten, Materialien und Ressourcen in der Wirtschaft so lange wie möglich erhalten bleibt und die Erzeugung von Abfällen minimiert wird [...], um eine kohlenstoffarme, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft zu entwickeln. [4]. Die strukturellen Voraussetzungen dieser europäischen Strategie auf Metallrecyclingprozesse lassen sich wie folgt zusammenfassen [5]:

1. **Technisch:** Der Abfall muss seinen Weg in (neue) akzeptierte Produkte finden. Der Fokus wird damit auf Qualität und Leistung der angewandten Recyclingprozessrouten gelegt.
2. **Wirtschaftlich:** Die Verkaufserlöse müssen die Kosten der gesamten Recyclingkette decken. Neben einer umfassenden Abfallsammlung, Optimierung der Prozesskette sowie einer Berücksichtigung der economy of scale besteht die besondere Herausforderung darin, qualitativ hochwertiges Recycling für komplexe Abfallströme zu realisieren. Auch müssen angemessene Anreize zum Recycling generiert werden.

3. **Stofflich:** Stoffliches Metallrecycling gilt als Schlüsseltechnologie für Ressourceneffizienz. Auf der Versorgungsseite müssen die Sekundärrohstoffe den Primärrohstoffen gleichgestellt werden. Auf der Nachfrageseite müssen gleichzeitig Produktdesign und Materialnutzung einen möglichst hohen Beitrag zur Substitution primärer Rohstoffe leisten.

Was die Organisation der favorisierten Kreislaufwirtschaft angeht bedeutet dies auch, die Abfallströme stofflich sinnvoll zu trennen. Um eine Verdünnung von besonders wertvollen Metallinhalten zu vermeiden, sollten beispielsweise End-of-Life (EoL)-Produkte ohne dissipative Metallinhalte in einem möglichst frühen Stadium der Recyclingkette getrennt gesammelt werden. Zusätzlich erlaubt die produkttechnische Möglichkeit des *Design for Recycling* auf der Erzeugerseite eine frühzeitige Stoffgruppenentrennung.

Die klare und restriktive Linie mit der die Europäische Union aber auch die Bundesregierung die Verwirklichung der seit Jahren definierten Ziele verfolgt, lässt sich unter anderem an der Verankerung stetig konkreter werdender Gesetzesvorgaben auf den obersten rechtlichen Hierarchieebenen ablesen, die aktuell insbesondere auf komplexe metallhaltige EoL-Produkte abzielen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Idee der Produktverantwortung zunehmend als der Schlüssel zur Lösung des Abfallproblems erweist:

- das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) von 1996,
- das Elektro-/Elektronikgerätegesetz (ElektroG) von 2005,
- das Batteriegesetz (BattG) von 2009 und
- das Verpackungsgesetz (VerpackG), das ab Januar 2019, die seit 1991 geltende Verpackungsverordnung ersetzt.

Ist ein Reuse nicht möglich, wird von der Rechtsseite generell stoffliches Recycling favorisiert. Für die Zirkulation von Batteriewertstoffen wurden hierzu beispielsweise Mindestquoten auf verschiedenen Recyclingebenen eingeführt: *Sammelquoten* (> 45 %) für die logistische Stoffstromerfassung sowie *Recyclingquoten* (> 50 - > 75 %, je nach Batterietyp) für die technische Metallrückgewinnung. Der europäische zero-waste-Ansatz favorisiert sogar die Kreislaufwirtschaft im geschlossenen Produktionssystem und beinhaltet damit auch die Vision, ein abfallfreies Polymetallrecycling zu realisieren (Bild 1, links).

Dem Leitgedanken folgend, ein Maximum der in einer Wertschöpfungskette eingesetzten Metalle wirtschaftlich zu gewinnen und die damit verbundenen Umweltbelastungen so weit wie möglich zu reduzieren, beinhaltet Ressourceneffizienz alle zielgerichteten Maßnahmen, die der Realisierung von Nachhaltigkeit dienen. Vor diesem Hintergrund sind die aktuellen Herausforderungen an ein modernes, zukunftsgerichtetes Metallrecycling äußerst interdisziplinär und komplex.

In diesem Zusammenhang gewinnt die Analyse und Beurteilung der verschiedensten Recyclingkonzepte enorm an Bedeutung, insbesondere weil zahlreiche Faktoren das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand und damit die Effizienz des Recyclings begrenzen:

- Mindestmetallgehalte der Sekundärrohstoffe (Abfälle),
- Entstehung von (toxischen) Sekundärabfällen oder gasförmigen Emissionen,
- Vielzahl der verschiedenen Legierungstypen und Verunreinigungen,
- steigende Anzahl und Miniaturisierung von Verbundwerkstoffen und
- erreichbare Metallqualität.

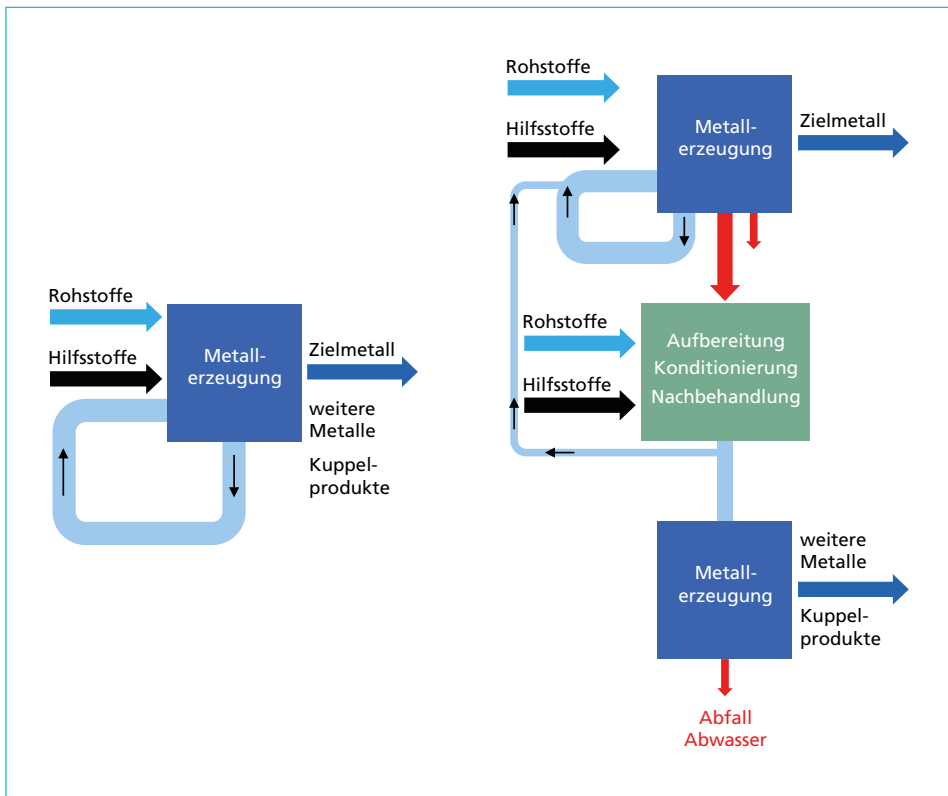


Bild 1: Kreislaufmodelle zum ressourceneffizienten Metallrecycling; links: abfallfrei, rechts: abfallarm

Im Bereich des Metallrecyclings sind die Bemühungen zur Verbesserung der Abfallvermeidung und -verwertung seit Jahren anhand eines stetig komplexer werdenden Stoffstroms erkennbar. So nahm die Zahl der Materialkreisläufe nicht nur werksintern sondern auch extern deutlich zu. Durch materialabgestimmte Zusatzmaßnahmen konnten immer komplexere metallhaltige Abfälle in konventionellen oder neuen Recyclingprozessen erfasst werden (Bild 2).

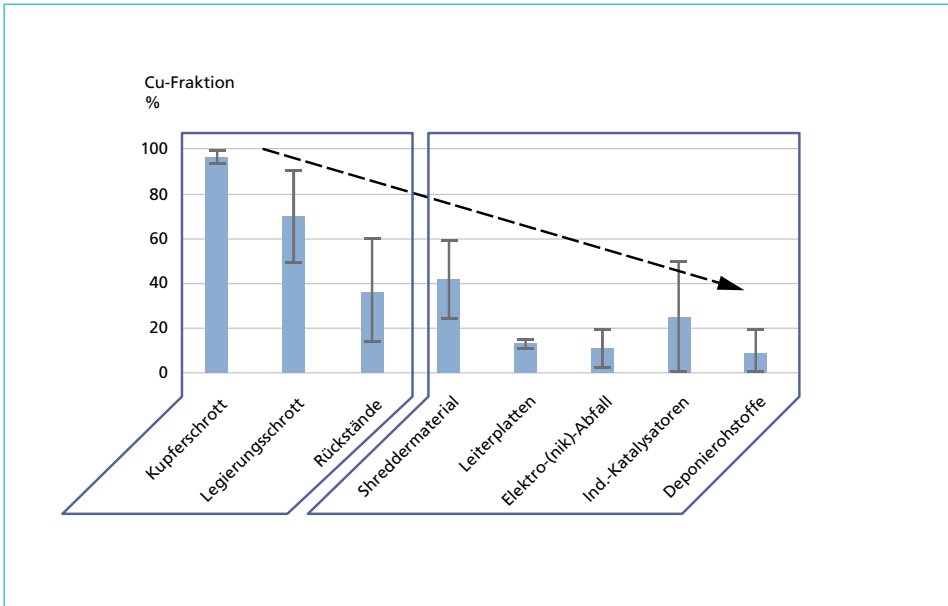


Bild 2: Typische Kupfersekundärrohstoffe; links: konventionell, rechts: modern

Hierbei beinhaltet der Begriff komplexer metallhaltiger Abfall nicht nur einen hohen Verunreinigungsgrad an nichtmetallischen Störstoffen, wie Kunststoffen und Organik in WEEE oder Alkalien und Halogenide in Stäuben und Shreddermaterial, sondern auch eine Zunahme an verschiedenen Metallinhaltsstoffen. Diese deutliche Erhöhung der Metallbandbreite in Hightech-Produkten ist am Entwicklungsverlauf für Energietechnologien klar erkennbar (Bild 3). Aber auch moderne EoL-Produkte wie Handys oder Computer(-chips) beinhalten bis zu 60 verschiedene Metalle, teils in geringsten Konzentrationen.

Die aktuellen Herausforderungen für moderne Recyclingverfahren sind insbesondere:

- Preisschwankungen auf den Energie-/Rohstoffmärkten:
 - Zunahme und Fluktuation bei Rohstoffpreisen, z.B. infolge politischer Konflikte und Rohstoffknappheit,
 - Monopolähnliche Situationen in verschiedenen Rohstoffmärkten, z.B. Seltene Erdelemente (SEE) in China und
- Zunehmende Dissipation von Metallen/Materialkomplexität in innovativen Produkten:
 - Für Technologiemetalle, wie Refraktärmetalle (Ta, W usw.), *Seltene Erd Elemente* (La, Ce, Dy usw.), Edelmetalle und Sondermetalle (Te, Ga, Sb usw.), bestehen oft noch keine hinreichenden Konzepte zu Recycling und Ressourceneffizienz [1]. Dies zeigt sich auch an den entsprechend niedrigen Recyclingraten von größtenteils unter 1 % [9].



Bild 3: Zeitliche Entwicklung des technologisch bedingten Elementeinsatzes am Beispiel Energietechnologie

Quelle: Angerer, G., Buchholz, P., Gutzmer, J., Hagelüken, C., Herzig, P., Littke, R., Thauer, R.K., Wellmer, F.-W.: Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft: Geologie-Märkte-Umwelteinflüsse (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). München 2016

2. Ressourceneffizienzpotentiale beim stofflichen Metallrecycling

Die derzeit gesetzlich geforderten Bemühungen zur Steigerung der Ressourceneffizienz sind seit Jahren Bestandteil unternehmerischen Handelns innerhalb der Metallrecyclingindustrie. Dies ist durch zahlreiche Verfahrensentwicklungen zur Verringerung von Massenbewegung, Energieeinsatz und Emissionen nachzuweisen, auch wenn – nach gängiger Meinung – ein Teil dieser Maßnahmen der Leistungssteigerung und nicht der Ressourceneffizienz zugerechnet wird. Einige Beispiele mögen dies verdeutlichen [6]:

- **Stoffspezifische Maßnahmen im Prozessverbund**, wie Sortierung der Einsatzmaterialien (z.B. metallische/nichtmetallische Schrotte, Reinelemente/Legierungen, Knet-/Gusslegierungen), Mehrfachnutzung von Stoffen (z.B. Laugelösungen/Elektrolyte), oder qualitätsbeeinflussende Maßnahmen für Kuppelprodukte durch Zusätze (Hochofenschlacken) oder Kreislaufführung (Filterstäube) sind wichtige Bestandteile zur Abfallvermeidung und -verwertung.
- Durch eine stetige **Verbesserung der Aufbereitungstechnik** (z.B. für Bleiakkus, Kabel-, Elektronik- oder Automobilschrott), durch den Einsatz materialabgestimmter Vorbehandlungsverfahren (z.B. Verflüchtigung, Agglomeration oder Entchlorung) und die Implementierung spezifischer Konditionierungsverfahren (z.B. Pyrolyse) wurde es möglich, immer komplexere Abfälle emissionsarm als Sekundärrohstoffe in die Metallgewinnung zurückzuführen.

- Mit der **Entwicklung abgasarmer Prozesse** wie Vakuum- oder Elektroofenverfahren sowie dem zunehmenden Einsatz der Sauerstofftechnologie wurden die fluiden, gasförmigen Trägermedien für Schadstoffe und die Schadstoffentstehung selbst gesenkt.
- Die **Nutzung chemischer Reaktionswärmen**, mit denen z.B. beim Verblasen von Metallschmelzen in Konvertoren der Kupfer- oder Eisen-Metallurgie Metallschrotte aufgeschmolzen werden, stellt einen wichtigen Schritt zur Brennstoffeinsparung dar.
- In endothermen pyrometallurgischen Prozessen wurden zahlreiche, teils sehr verschiedene **Effizienzmaßnahmen zur Optimierung des Energiehaushalts** durchgeführt, wie die Wahl der Brennstoffart, die Art der Rohstoffzuführung, wärme- und abgastechnische Systemabdichtungen sowie Verfahrensneuentwicklungen im Badschmelzbereich.

Die Implementierung von Ressourceneffizienzmaßnahmen selbst ist also nicht neu. Neu ist dagegen deren erweiterte technische Anwendbarkeit. Die Schwierigkeit liegt darin, dass ein effizientes und innovatives Metallrecycling einerseits nur über komplette Recyclingprozessrouten zu realisieren ist und andererseits die Ansatzpunkte zur Effizienzverbesserung den Einzelakteuren dieser Prozessrouten (Konsumenten, Aufbereiter, Metallurgen) weitgehend verborgen bleiben.

Meist ist der Transfer von der anthropogenen Ressource zur technisch-wirtschaftlich nutzbaren Reserve nur für elektrochemisch edlere Metallinhalte in relevanten Konzentrationen möglich. Allzu oft scheitert eine Nutzung dissipativ verteilter, unedler Metallbestandteile, da der hierzu notwendige Prozessaufwand in keinem sinnvollen Verhältnis zum Verkaufserlös steht. Zusätzlich können enthaltene Störstoffe zu unerwünschten Prozess- und Umweltproblemen sowie zu Metallverzettungen und Qualitätseinbußen bei den hergestellten (Recycling-)Produkten führen. Da also in der realen Kreislaufwirtschaft Auslassventile für Schadkomponenten der Sekundärrohstoffe unabdingbar sind, werden zusätzliche Prozessschritte und Anlagen zu deren Abtrennung benötigt. Dementsprechend muss ein ressourceneffizientes Metallrecycling für komplexe Abfallstoffströme in einem Produktionssystem mit Verwertungskaskade erfolgen (Bild 1, rechts).

Bedingt durch die enge Verzahnung im Recyclingprozessverbund sind Effizienzpotentiale insbesondere an der Schnittstelle Aufbereitung/Metallurgie zu finden. So kann z.B. ein aus wissenschaftlich-technischer Perspektive gesehen effizienter mechanischer Aufbereitungsprozess, der nicht auf die Anforderungen der nachfolgenden Metallgewinnung abgestimmt ist, deren Effizienz drastisch verringern. Hier gilt es, die techno-ökonomisch sinnvolle Aufbereitungstiefe und damit das Optimum für beide konsekutiven Prozessschritte zu ermitteln. Technische Neuerungen können den Aufwand in der jeweiligen Prozessstufe (Aufbereitung, Metallurgie) verringern; hierdurch wird das Optimum an der betrachteten Schnittstelle verschiebbar (Bild 4).

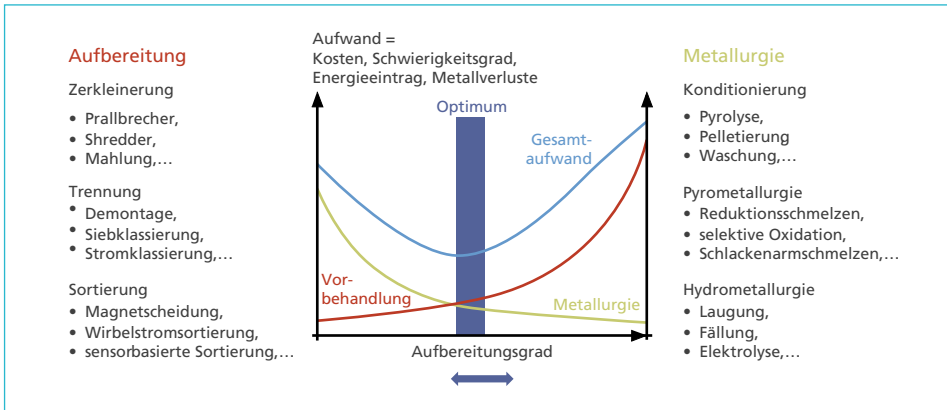


Bild 4: Recyclingaufwand in Abhängigkeit des Aufbereitungsgrades und möglicher Prozessmodule an der Schnittstelle Aufbereitung/Metallurgie

2.1. Die Aufbereitung im Prozessverbund

Die **klassische Aufbereitung** ist auf Primärrohstoffe mit lagerstättentypischen Merkmalen fokussiert. Die Aufschlusszerkleinerung zielt auf Korngrößen weit unter 1 mm ab. Die Sortierprozesse werden grundsätzlich mehrstufig geführt und maximieren das Wertstoffausbringen und den Wertstoffgehalt des Konzentrats. Die Hauptziele dieser primären Aufbereitung liegen in der Wertmetallkonzentrierung, einhergehend mit der Sicherstellung einer definierten Materialkonsistenz bei ausreichender Homogenisierung.

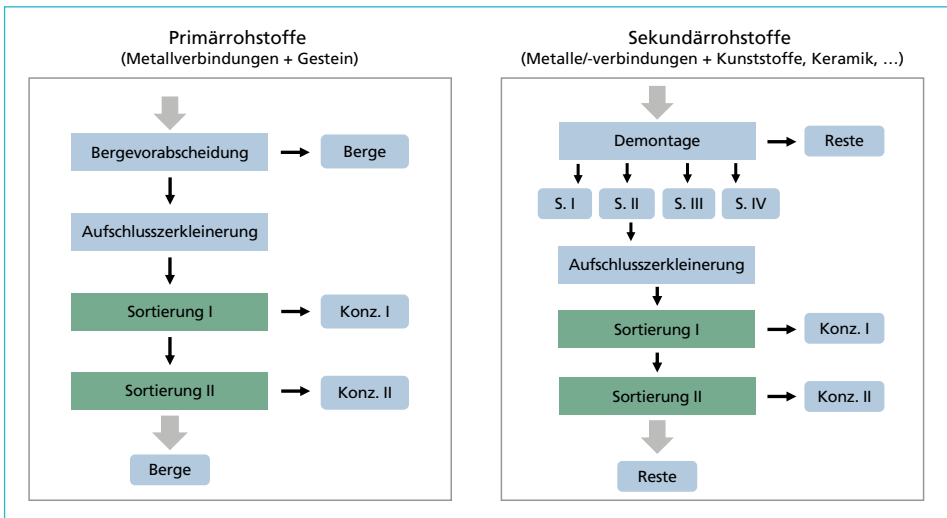


Bild 5: Vereinfachte Fließbilder der primären und sekundären Aufbereitung

Quelle: Friedrich, B., Pretz, T., Rombach, E.: Chancen und Herausforderungen einer intensivierten Zusammenarbeit der Aufbereitung und Metallurgie. Vortrag: Aufbereitungstechnisches Seminar, Leoben, Januar 2019. https://www.researchgate.net/publication/330798916_Chances_and_Challenges_of_Intensified_Cooperation_of_Processing_and_Metallurgy_-_Chancen_und_Herausforderungen_einer_intensivierten_Zusammenarbeit_der_Aufbereitung_und_Metallurgie

In **sekundären Aufbereitungsprozessen** werden Abfälle (Sekundärrohstoffe) mit ihren breiten Merkmalsverteilungen für das Metallrecycling vorbereitet. Komplexe Materialströme wie polymetallische Elektronikabfälle werden nach Sorten klassifiziert und demontiert, wobei Sorten mit jeweils begrenzter Heterogenität erzeugt werden. Jede Sorte wird einem angepassten mechanischen Aufschlussprozess zugeführt. Sortierprozesse werden häufig aufgrund geringer Durchsätze einstufig durchgeführt. Hierbei wird optional auf Wertstoffausbringen, Wertstoffgehalt des Konzentrats oder Massenausbringen optimiert. Generell ist der Sortieraufwand umgekehrt proportional zur Partikelgröße. Hauptziele der sekundären Aufbereitung liegen in der Materialhomogenisierung, verbunden mit einer Konzentrierung und einer Vorseparierung des Metallinhaltes.

Tabelle 2: Kenngrößen und Randbedingungen der Aufbereitung im Vergleich

	Primärrohstoffe	Sekundärrohstoffe
Durchsatz	> 10.000 t/d	< 100 t/d
Variabilität Rohstoff	gering	max. Heterogenität
Marktwert Konzentrat	immer positiv	positiv oder negativ (Verbunde)
Aufwand Restentsorgung	gering (Skalierungsfaktor)	hoch (negativer Marktwert)
staatlicher Lenkungseinfluss	gering	sehr hoch
Massenzugriff	sicher (Bindung an Bergbau)	riskant ((in-)formeller Wettbewerb)
Trennkorngröße	< 0,1 mm	> 1mm, (meist >10mm)
Konzentrat	Produktstatus	selten Produkt-, meist Abfallstatus
Energieaufwand	hoch (geringe Ausgangskonzentration)	gering (begrenzte Aufschlussfähigkeit)
Ausbringen	hoch (optimierte Nassaufbereitung)	niedrig (Verbunde, trockene Aufbereitung mit geringer Tiefe)
Metallverluste	gering	hoch (in Sortierresten und Stäuben)

Quelle: Friedrich, B., Pretz, T., Rombach, E.: Chancen und Herausforderungen einer intensivierten Zusammenarbeit der Aufbereitung und Metallurgie. Vortrag: Aufbereitungstechnisches Seminar, Leoben, Januar 2019. https://www.researchgate.net/publication/330798916_Chances_and_Challenges_of_Intensified_Cooperation_of_Processing_and_Metallurgy_-_Chancen_und_Herausforderungen_einer_intensivierten_Zusammenarbeit_der_Aufbereitung_und_Metallurgie

Aufgrund der äußerst variablen Menge und heterogenen Zusammensetzung von komplexen Abfallströmen, stoßen einzelne Aufbereitungsverfahren schnell an ihre technischen und wirtschaftlichen Grenzen. Dementsprechend werden insbesondere bei der Aufbereitung von Metall-Kunststoff-Verbunden Verluste in Konzentrat-Ausbringen und -Qualität in Kauf genommen (Bild 6). Bei Steigerung der Aufschlusstiefe – beispielsweise durch Erhöhung der Anzahl an Arbeitsstufen – besteht die Gefahr

der Wertmetallverzettelung. So wurden bei starken mechanischen Aufschlüssen von Abfällen aus dem Elektronikbereich (WEEE) deutliche Metallverluste in Feinkorn ($d < 10 \text{ mm}$) und Staub festgestellt (Au: 30 bis 75 %; In: 100 %).

Weitere Herausforderungen liegen in den qualitativen Restriktionen für erzeugte Konzentrate und angefallene Sortierreste. Zahlreiche unvorhersehbare Einflussfaktoren wie Verbraucherverhalten, gesetzliche Rahmenbedingungen und Marktakzeptanz führen hier zu großen Kalkulationsunsicherheiten.

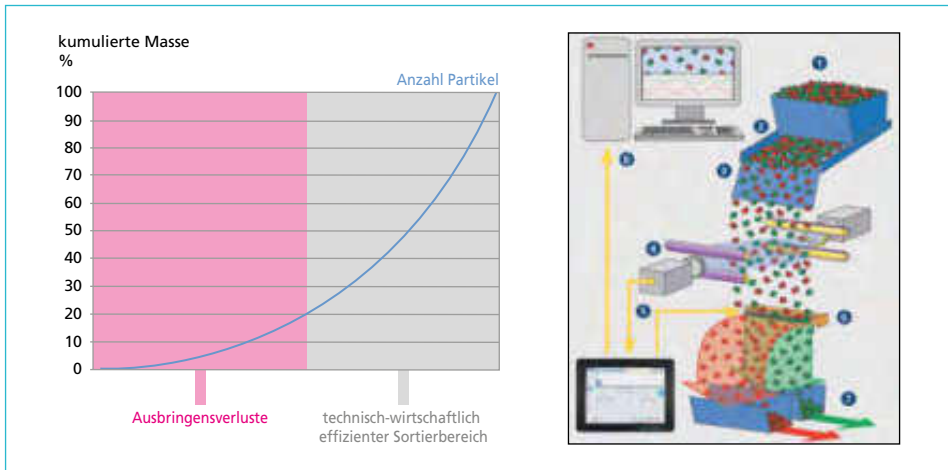


Bild 6: Gängiger Arbeitsbereich für eine technisch sinnvolle Sortierung

Quelle: Friedrich, B., Pretz, T., Rombach, E.: Chancen und Herausforderungen einer intensivierten Zusammenarbeit der Aufbereitung und Metallurgie. Vortrag: Aufbereitungstechnisches Seminar, Leoben, Januar 2019. https://www.researchgate.net/publication/330798916_Chances_and_Challenges_of_Intensified_Cooperation_of_Processing_and_Metallurgy_-_Chancen_und_Herausforderungen_einer_intensivierten_Zusammenarbeit_der_Aufbereitung_und_Metallurgie

2.2. Die Metallurgie im Prozessverbund

Die **klassische Metallurgie** zeichnet sich durch ein offenes Produktionssystem aus. Definierte Rohstoffe, d.h. homogenisierte Metallkonzentrate, werden mit hohen Durchsatzmengen in metallurgischen Reaktoren verarbeitet. Hierbei wird die gesamte metallurgische Arbeit auf ein klares Zielmetall fokussiert. Anfallende Kuppelprodukte weisen üblicherweise nicht zwingend das end-of-waste-Kriterium auf. So landen Schlacken, die als Senken für die Verunreinigungen des Zielmetalls fungieren, oft auf Deponien - bestenfalls in einfachen Verwertungen (z.B. im Straßenbau). In den letzten 50 Jahren wurden zunehmend Sekundärrohstoffe in die Reaktoren der Primärmetallurgie integriert. Derzeit gängige Schrottteile liegen bereits zwischen 15 und 50 % der Inputcharge zur Gewinnung von Kupfer, Blei oder Zink. Das unter solchen Bedingungen durchgeführte Metallrecycling ist jedoch für komplexe Abfallströme nur suboptimal. So gehen beispielsweise bei der Einschleusung von Leiterplattenschrott in die konventionelle Kupferverhüttung unedlere und/oder niedrig konzentrierte Metalle, wie Tantal und Wolfram, verloren. Zusätzlich verursachen Störkomponenten, wie Organik, Prozessprobleme infolge einer kaum kontrollierbaren Energie- und Kohlenstoffbilanz (Bild 7).

Metallurgische Recyclingprozesse werden typischerweise nur mit mittelgroßen bis kleinere Durchsatzmengen betrieben. Eine flexibel zusammengesetzte, heterogene Rohstoffpalette wird zu einem oder mehreren Zielmetallen so verarbeitet, dass dabei anfallende Kuppelprodukte, wie Schlacken, end-of-waste Eigenschaften aufweisen. Die Entfernung von Störkomponenten aus den eingesetzten Abfallstoffströmen hat gerade in reinen Recyclinghütten einen hohen Stellenwert. Nur so gelingt es, Störungen in den metallurgischen Aggregaten langfristig zu vermeiden (beispielhaft dargestellt in Bild 8).

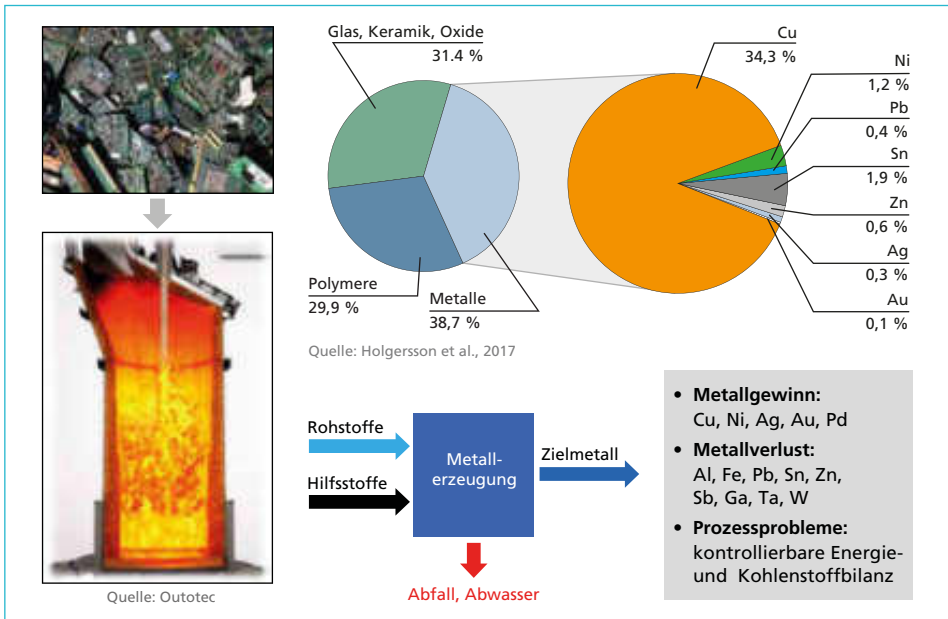


Bild 7: Metallrückgewinnung durch Integration von Leiterplattenschrott in Primäraggregate der Kupfergewinnung

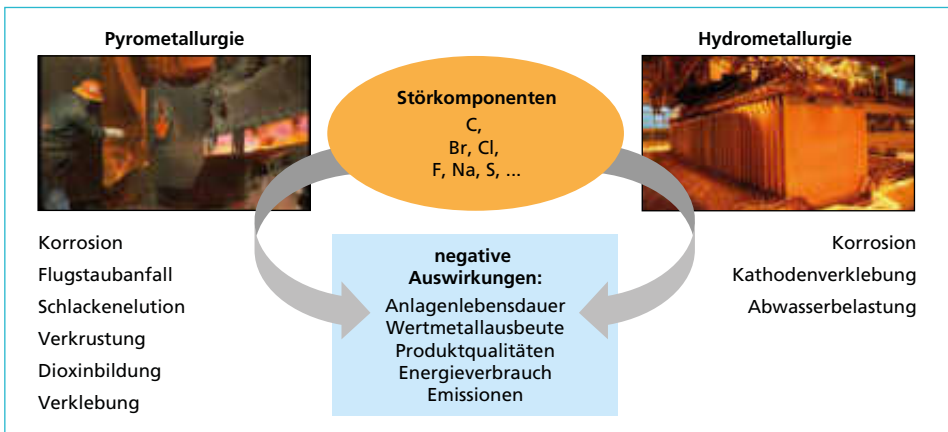


Bild 8: Prozesstechnische Auswirkungen ausgewählter Störkomponenten komplexer Sekundärrohstoffe auf die Metallurgie

2.3. Die Schnittstelle Aufbereitung - Metallurgie im Prozessverbund

Die Realisierung eines innovativen Polymetallrecyclings bedingt generell eine stärkere Verzahnung der Metallurgie mit der Aufbereitung (Bild 9). Im Wesentlichen geht es darum, Schadkomponenten aus Stoffströmen zu entfernen und/oder Inputmaterialien so vorzubereiten, dass nachfolgende Prozessschritte störungsfrei und effizient betrieben werden können. Lösungs- und Optimierungsansätze der modernen Aufbereitung liegen insbesondere in einer Flexibilisierung und damit in der modularen Auslegung der mechanischen Verfahrensschritte, angepasst an die Metallurgie. Aber auch die Metallurgie hat die Möglichkeit, durch Konditionierungsprozesse den Aufwand und das Ausbringen der Aufbereitung positiv zu beeinflussen. Ein Beispiel hierzu ist der Einsatz der Pyrolyse zur Abtrennung von Kunststoffen aus kleinteiligen Metall-Kunststoffverbunden (Leiterplattenschrott) [3]. Durch diese *Prä-Metallurgie* kann die nachgeschaltete Aufbereitung deutlich bessere Ergebnisse für *Entgiftung* und Metallanreicherung liefern.

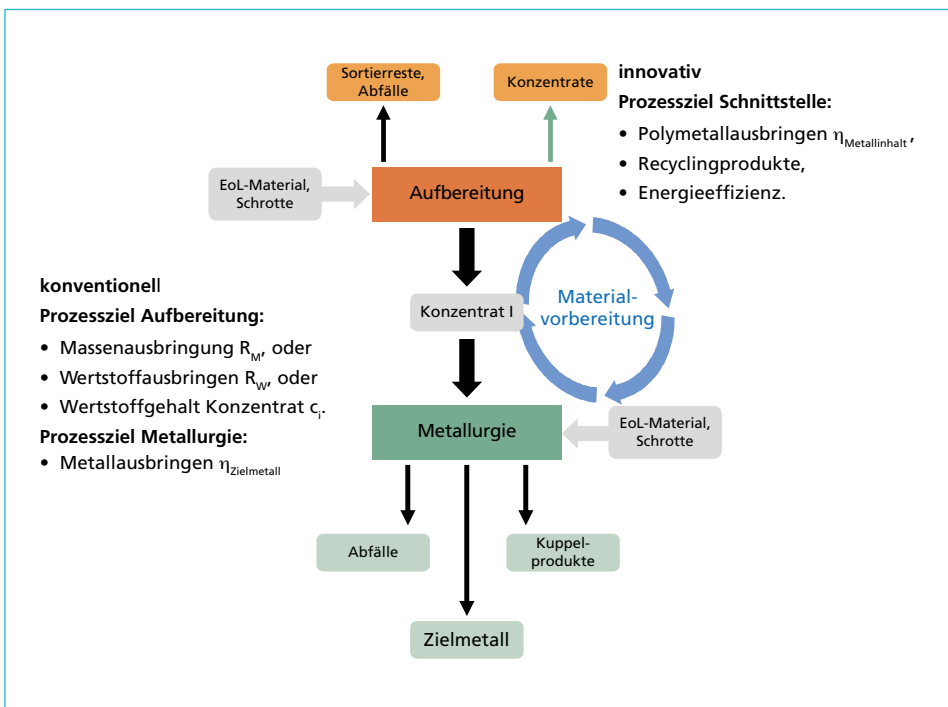


Bild 9: Verzahnung von Aufbereitung und Metallurgie im Prozessverbund des Recyclings

Um das gesetzlich geforderte ressourceneffiziente Optimum an der Schnittstelle zu finden, sind die Prozessingenieure beider Fachdisziplinen gleichermaßen gefordert (Bild 10).

Prinzipiell bietet die Aufbereitung die Möglichkeit, Störkomponenten abzutrennen, heterogene Stoffgemische zu homogenisieren, Metallgehalte zu konzentrieren und Materialkomponenten zu trennen. Allerdings führt der Erhalt bisher gewohnter Kon-

zentrationen bei komplexen Materialströmen zu Verlusten im Wertstoffausbringen. Bei Abreicherung von Störkomponenten müssen Chargier-Eigenschaften erhalten werden. Zur Vermeidung wertvoller Metallverluste sollte die Staubentwicklung der Aufschlusszerkleinerung minimiert werden. Innovative Prozessmodule, wie sensorgestützte Verfahren zur Klassifikation von Abfällen *ähnlicher* Eigenschaften oder trockene Feinkornsartierung zur Vermeidung von Abwasser müssen in der Praxis weiterentwickelt werden und stärker zum Einsatz kommen.

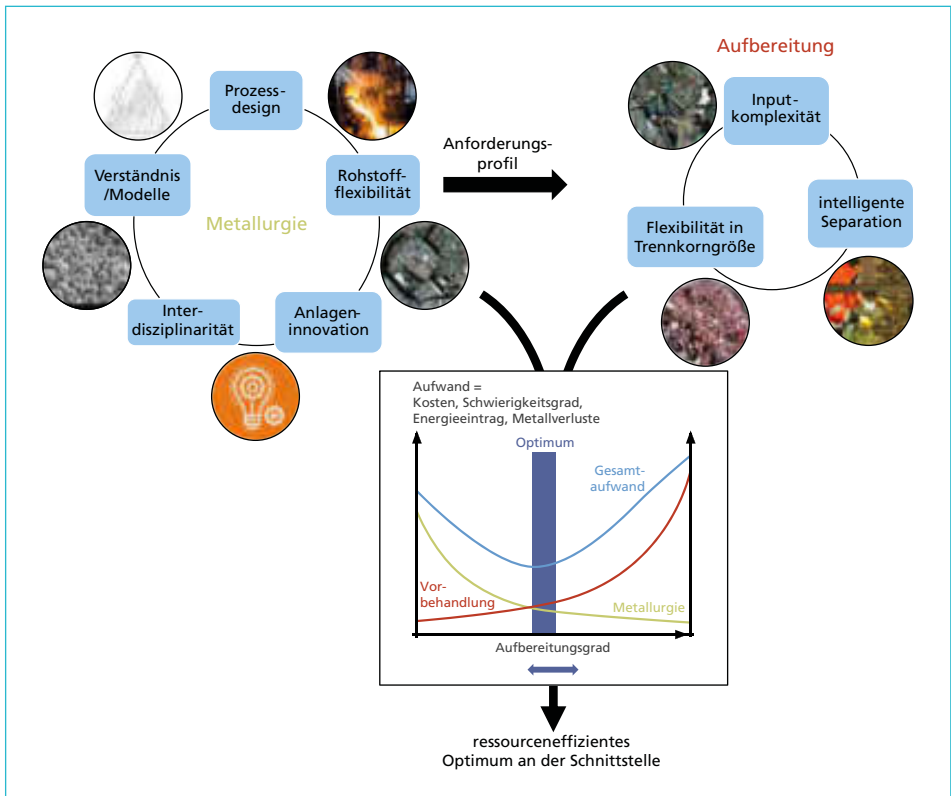


Bild 10: Anforderungsprofil an Prozessingenieure zur Realisierung innovativer Recyclingverfahren

Prinzipiell bietet die Metallurgie die Möglichkeit aus vorhomogenisierten Stoffgemischen, Metalle anzureichern, zu trennen und zu raffinieren. Je nach Materialkonsistenz und physikalisch/chemischen Eigenschaften der Zielmetalle, werden diese in Rein- oder Verbindungsform ausgebracht. Um hierbei Verzettelungen zu vermeiden, müssen sowohl die Prozesse als auch die Kuppelprodukte (z.B. Schlacken) designt werden.

Generell muss die höhere Flexibilität der Aufbereitung für die Metallurgie besser nutzbar gemacht werden. Zur Realisierung innovativer Recyclingverfahren nach dem Multi-Metall-Ansatz sollte die Aufbereitung als Material-Dienstleister für zunehmend spezialisierte metallurgische Prozesse agieren.

3. Beispielansatz: Ressourceneffizientes Polymetallrecycling ausgedienter Li-Ionen Batterien

Von großer Bedeutung sind Lithium-Ionen-Akkus im Bereich Elektromobilität, wo sie als Energiequelle für die Motoren in Elektrofahrzeugen dienen. Aufgrund der zukünftig zu erwartenden vermehrten Einführung von Elektrofahrzeugen, ist auch mit einem steigenden Bedarf an Lithium sowie einem hohen Aufkommen an ausgedienten Lithium-Ionen-Batterien zu rechnen. Insofern wird für die kommenden Jahre eine deutlich höhere Nachfrage an Lithium, einhergehend mit einem starken Preisanstieg auf dem Weltmarkt prognostiziert. Aus diesem Grund wird die Möglichkeit, Lithium aus entsorgten Akkumulatoren zurückzugewinnen, immer attraktiver, zumal auch hier der Gedanke einer Kreislaufwirtschaft ohne Abfallprodukte eine wesentliche Rolle spielt.

Einer Roland Berger Studie [8] zu Folge entfallen auf die Rohmaterialien mindestens 13 % der Batteriekosten, während fast die Hälfte der Kosten in der Zellproduktion entsteht. Mit der anlaufenden Massenfertigung der Zellen, wird sich der Fertigungskostenanteil verringern, und sich dementsprechend der Rohmaterialkostenanteil proportional vergrößern. Eine Dämpfung der Rohstoffabhängigkeit und Kostensteigerung kann demgegenüber nur durch die Schließung inländischer Stoffkreisläufe verwirklicht werden.



Bild 11: Anwendungsbereiche von Li-Ionen Batterien

In Anbetracht der zukünftigen Entwicklung des Lithiummarktes und des Wertmetallinhaltes (Li, Cu, Ni, Co) sind Lithium-Ionen Batterieschrotte jeder Art schon heute ein begehrtes Recyclingmaterial. Insbesondere der hohe Weltmarktpreis für Kobalt, welcher im Herbst 2017 mehr als viereinhalb mal so hoch wie der Lithiumpreis lag, macht eine Wiedergewinnung dieses Metalls erforderlich [2]. Eine Beispielzusammensetzung eines Batterieschrott-Gemisches zeigt Bild 12.

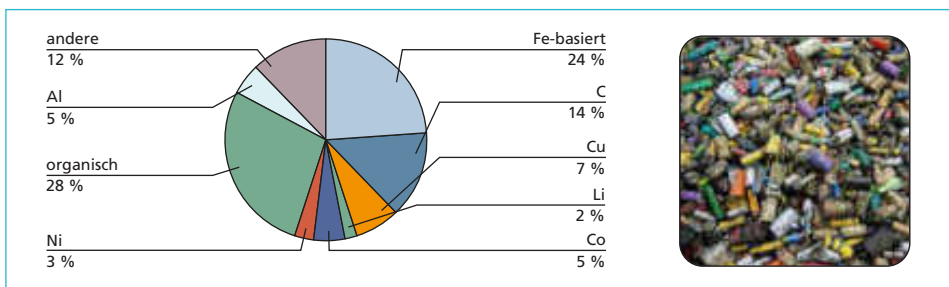


Bild 12: Zusammensetzung von Li-Ionen Batterieschrott

Aktuell stehen aber heute keine Entsorgungskapazitäten zur Verfügung, die zu wirtschaftlich tragbaren Konditionen ohne Zuzahlung die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen gewährleisten. Um dieses Spannungsfeld aufzulösen, müssen die **Zielstellungen** innovativer Verfahren sein:

- signifikante Steigerung zurückgewonnener **Wertstoffe** mit positivem Markterlös (sowie grundsätzliche Sicherung der gesetzlichen Mindestquote von > 50 %),
- Senkung der **Behandlungskosten**,
- in der Bilanzierung der vorgenannten Punkte eine vollständige **Neutralisation** von Entsorgungskosten für Batteriemodule,
- hohe **Robustheit** des Verfahrens gegenüber Störgrößen (z.B. Ladungszustand) und Störstoffen (Nicht-Batterien, Anbauteile usw.),
- hohe **Flexibilität/Nutzbarkeit** für alle gängigen und zukünftigen Li-Ion Zelltypen/-Chemie,
- geringste **Emissionen** und
- Generierung von Produkten und Zwischenmaterialien, die in der frühesten möglichen Verfahrenstiefe in bestehende, **hochpreisige** Stoffströme eingebracht werden können.

3.1. Konventionelle Recyclingrouten

Bestehende Anlagen zum großindustriellen Recycling von Li-Ionen Batterieschrott arbeiten pyrometallurgisch und sind vollständig auf Kobalt- bzw. Nickel-basierte Altbatterien ausgerichtet. Der Großteil der enthaltenen Basismetalle wird bewusst verschlackt und so einer Wertschöpfung entzogen (Bild 13). Dies erklärt auch die resultierenden hohen Entsorgungsgebühren für Co-arme Batterien, die mit mehreren Euro/kg eine signifikante wirtschaftliche Belastung in der Gesamtkalkulation von Elektrospeichermodulen darstellen. Die so erzeugte Schlacke besteht vorwiegend aus mineralischen Komponenten. Sie wird nach dem Abstich aus dem Ofen abgekühlt, erstarrt, zerkleinert und im Straßenbau eingesetzt. Eine wirtschaftliche Rückgewinnung des Lithiums und anderer Metalle (Fe, Al) aus der Schlacke ist nach heutigem Stand nicht möglich.

Um die Batterieherstellungskosten zu senken, werden in der Automobilindustrie immer häufiger Co/Ni-arme bzw. -freie Elektrodenmaterialien wie Li-Mangan-Spinell (LMS), Li-Nickel-Mangan-Co (NMC) oder Nickel-Co-Aluminium (NCA) verwendet. Zukünftig bestehen zu entsorgende (H)EV-Altbatterielieferungen aus einem Mix unterschiedlichster Li-Ion-Subtypen, die für die existierenden Recyclingverfahren aufgrund der verdünnten Zielmetalle Co/Ni nur bedingt geeignet sind, zudem hohe Kosten verursachen (notwendige Zusatzschritte) oder schlichtweg von der Annahme ausgeschlossen sind.

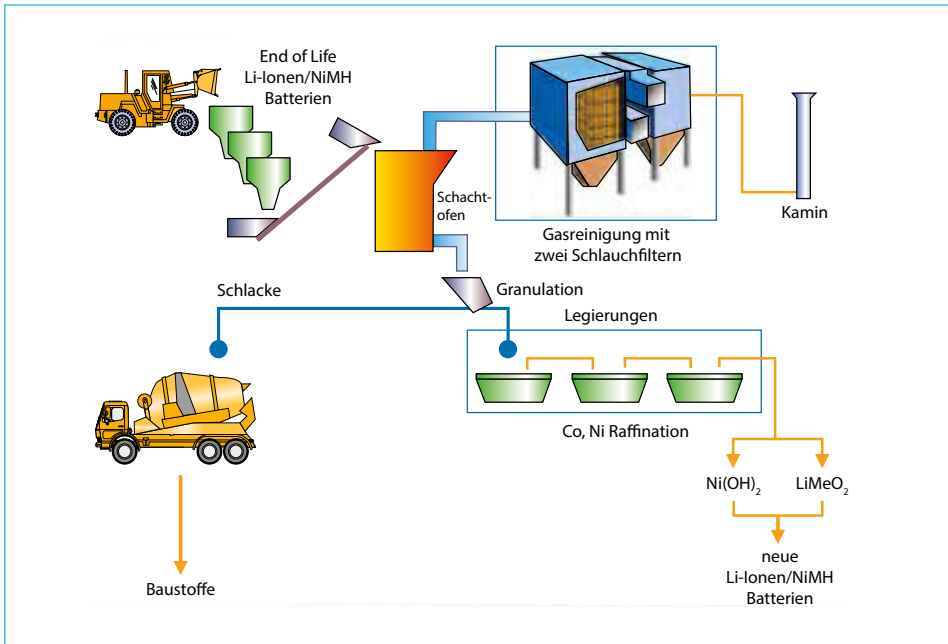


Bild 13: Pyrometallurgische Verarbeitung von Li-Ionen- und Nickel-Metallhydrid-Batterieschrott (UMICORE)

Quelle: Elwert, T., Goldmann, D., Römer, F. et al.: Current Developments and Challenges in the Recycling of Key Components of (Hybrid) Electric Vehicles. Recycling 1 (2015).

Wie in Bild 14 dargestellt, erfolgt in derzeit gängigen Recyclingrouten für weitgehend sortenreine Mischschrotte zunächst eine grobe Vordemontage, um das jeweilige Modul einer Entladung zugänglich zu machen. Nach einem langwierigen Entladeprozess wird das Modul bis auf Zellebene demontiert (1) und im ersten Teilschritt innerhalb des pyrometallurgischen Aggregates pyrolysiert - die Standardverfahren realisieren diese Pyrolyse beispielsweise im oberen Segment eines Schachtofens, bei Elektroofenbasierter Technologie in einem separaten Drehrohr-Calciner (3). Diese pyrometallurgische Behandlung bindet die Schwermetalle Kobalt, Kupfer und Nickel in einer Schmelze, während alle weiteren enthaltenen Metallkomponenten vollumfänglich verschlackt und anschließend deponiert werden.

Da die beschriebenen Prozessvarianten nicht ausschließlich Li-Batterien verarbeiten, sondern eine Vielzahl von weiteren Abfällen (E-Schrotte, Katalysatoren, Produktionsabfälle oder sogar metallhaltige Primärerze) integrieren, können sie nicht auf die Minimierung von Wertmetallverlusten aus Li-Ionen Batterien optimiert werden. Zwar können hier selektiv edlere Schwermetalle mit hoher Reinheit generiert werden, die aber mit hohen Kosten, deutlichen Metallverlusten, enormen Deponiemengen und entsprechend geringer Nachhaltigkeit erkaufte worden sind. Auffallend ist zudem, dass aktuelle Prozessrouten (Bild 13 bzw. Pfad 1→3 in Bild 14) mit Recyclingeffizienzen unterhalb von 30 % den gesetzlich vorgeschriebenen Wert deutlich unterschreiten (Altbatterierichtlinie EU/66/2006: > 50 %).

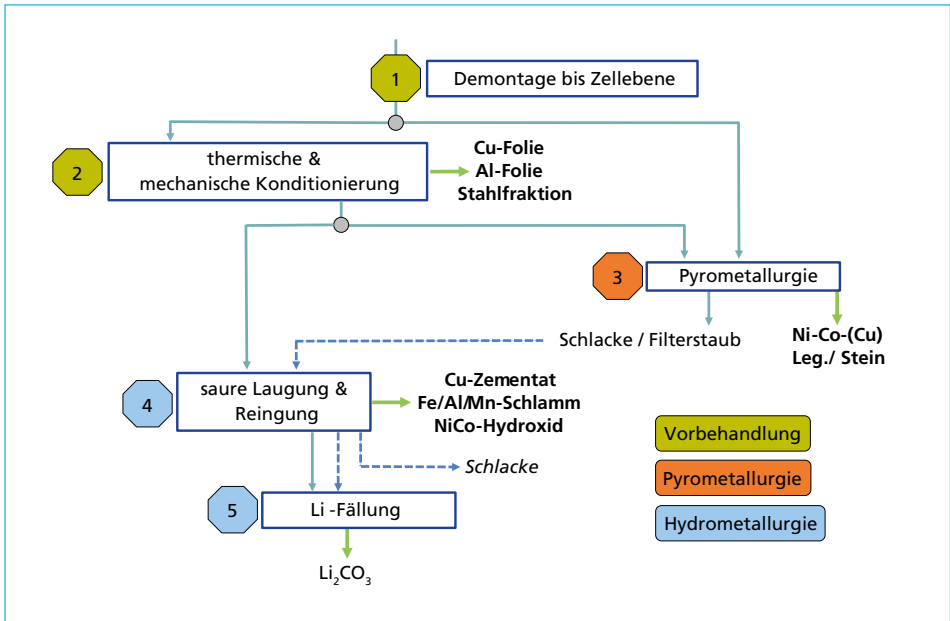


Bild 14: Schema aktueller und optimierter Prozessrouten zum Recycling von Li-Ionen Batterieschrott (konventionell: Route 1->3; optimiert durch zusätzliche thermische und mechanische Konditionierung: Route 1->2->3; weiter optimiert durch Integration der Hydrometallurgie: Route 1->2->4->5)

3.2. Innovative, Schnittstellen-optimierte Recyclingrouten

Diese nachfolgend beschriebenen Prozessalternativen zielen auf ein universelles, materiaeffizientes und ökonomisch optimiertes Recycling, und sind schematisch in den Bildern 14 und 15 dargestellt:

Optimierung durch zusätzliche thermische und mechanische Konditionierung:

Modul A: Mit der Vordemontage werden leicht entfernbare Anbauteile wie Leistungselektronik, Kabel, Metall- und Kunststoffkomponenten separiert und stellen bereits in diesem Stadium Fraktionen mit positivem Erlös dar.

Modul B: Innerhalb einer thermischen Konditionierungsstufe schließt sich eine energieeffiziente, weil autotherme Entfernung von Elektrolyten, Kunststoffen und Halogenen an. Dabei werden die äußeren chargierten Modulzellen bis zur Erweichungstemperatur des Separators angeheizt und geben nach innerem Kurzschluss ihre Restladung als thermische Energie sukzessive an die benachbarten Zellen ab. Der enthaltene Elektrolyt verfügt bei dieser Temperatur bereits über einen so hohen Dampfdruck, dass die Zellgehäuse mit Überdruck öffnen. Mit der nun selbst fortschreitenden Erwärmung werden die weiteren organischen Bestandteile pyrolysiert. Die hierzu notwendige Energie kann durch Verbrennung des Pyrolysegases quasi autotherm generiert werden. Ebenso wird der Binder der aktiven Elektrodenmasse (AM) graphitisiert und ermöglicht so erst die spätere Abtrennung der aktiven Masse von den Elektrodenfolien.

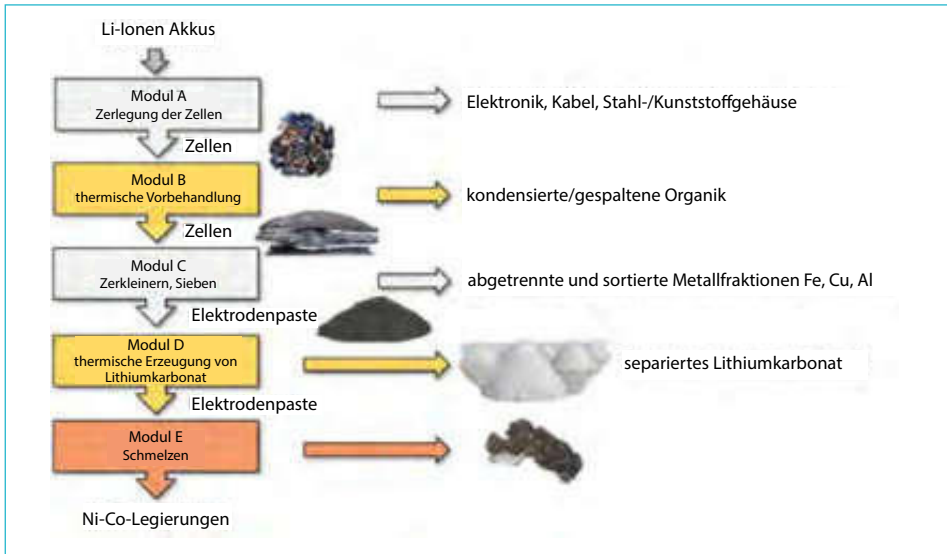


Bild 15: Optimiertes pyrometallurgisches Prozesskonzept zum ressourceneffizienten Recycling von Li-Ionen Batterieschrott (entsprechend Route 1->2->3 in Bild 14)

Modul C: Das deaktivierte und Kunststoff-freie Modul kann anschließend gefahrenfrei mechanisch aufgeschlossen und klassifiziert werden. Die Herausforderung der mechanischen Behandlung der Batteriezellen ist dabei die Minimierung der Querkontaminationen zwischen den Output-Fractionen.

Module D und E (Module Pyrometallurgie für Elektrodenmasse): Die nach der thermischen Konditionierungsstufe abgetrennte und inerte Elektrodenmasse wird in bestehende industrielle Verfahrensrouten vermarktet, beispielsweise einer pyrometallurgischen Arbeitsstufe (vgl. (3) in Bild 14).

Weitere Optimierung durch Integration der Hydrometallurgie:

Modul A, B und C: identisch zur beschriebenen Optimierung durch zusätzliche Pyrometallurgie.

Modul Hydrometallurgie für Elektrodenmasse: Die nach der thermischen Konditionierungsstufe abgetrennte und inerte Elektrodenmasse wird in bestehende industrielle Verfahrensrouten vermarktet, beispielsweise einer nass-chemischen Aufarbeitung (vgl. (4) in Bild 14). Diese hydrometallurgische Verfahrensvariante ermöglicht eine grundsätzlich selektivere Metalltrennung.

Modul Hydrometallurgie für Schlacke: Zur Erhöhung der Recyclingeffizienz besteht prinzipiell die Möglichkeit, in einem Nachbehandlungsschritt das Lithium aus der Schlacke hydrometallurgisch zu extrahieren (vgl. Pfad 4->5 in Bild 14). Dabei wird die erstarrte Schlacke gemahlen und mit einem wässrigen Lösungsmittel, z.B. einer Säure, behandelt; hierdurch geht das Lithium aus dem Feststoff in die wässrige Lösung (4) über. Da während des Laugens neben dem Lithium auch einige weitere Metalle in

der Lösung angereichert werden, müssen diese zunächst durch Veränderungen des pH-Wertes und Zugabe verschiedener Additive selektiv ausgefällt werden, bevor das Lithium als festes und reines Lithiumkarbonat aus der Lösung abgeschieden werden kann (5).

Der Hauptvorteil der optimierten Recyclingrouten besteht darin, durch eine zusätzliche kostengünstige Materialvorbehandlung (mechanische Aufbereitung) ein sauberes, spezifiziertes und Abnehmer orientiertes Cu-Al-Konzentrat z.B. für Aluminiumbronze zu generieren. Durch diese gewichtsmäßig bedeutenden Fraktionen lässt sich damit gerade bei Zell-Chemien mit geringem Co/Ni-Gehalt eine wesentliche Wertschöpfung erzielen. Abgesehen von den Kunststoffanteilen der Li-Ionen Batterieschrotte (Downcycling) aus der Demontage und den angefallenen Pyrolyseölen (thermische Verwertung) weisen alle Produktfraktionen einen positiven Marktwert auf – und das ohne Durchführung exzessiver und teurer Behandlungsschritte. Da die abgetrennte Elektrodenmasse 30 bis 50 Gewichtsprozent der Li-Ion Zellen ausmacht, erfolgt allein durch die mechanische Vorbehandlung eine signifikante Aufkonzentrierung des Lithiums – parallel mit weiteren strategische Wertinhalten, z.B. Co, Ni, Mn, Fe, C und P.

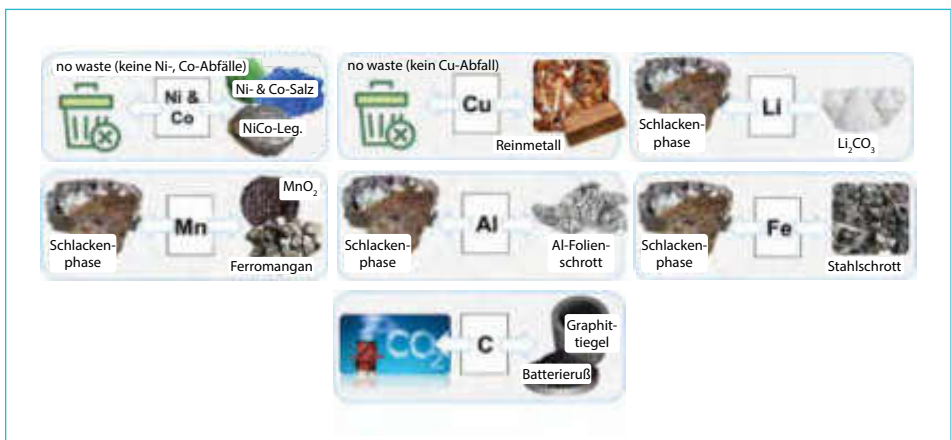


Bild 16: Ausbringen der Wertmetalle auf die Produkte verschiedener Recyclingrouten für Li-Ionen Batterieschrott; links: jeweils ohne und rechts: jeweils mit Schnittstellenoptimierung

Fazit: Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nach derzeit gängiger Praxis insbesondere Ni/Co-arme bzw. -freie Li-Ionen Batterieschrotte nur mit erheblichem Kostenaufwand und zudem ohne ausreichende Recycling- und Ressourceneffizienz recycelt werden können. Die beschriebenen Prozessalternativen nutzen robuste, größtenteils mechanische und damit kostengünstige Verfahrenstechniken. Die Verfahrenstiefe wird dabei bewusst beschränkt und generiert Produkte bzw. Metallkonzentrate, die eine verbesserte Wertschöpfung ermöglichen (z.B. spezifiziertes Cu-Al-Konzentrat für AlCu-Bronze, Lithium als Karbonat/Hydroxid usw.). Basismetalle wie Al/Fe/Cu werden nicht mehr verschlackt, sondern tragen zum Erreichen der gesetzlich vorgeschriebenen Recyclingeffizienz von mindestens 50 % bei.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Ressourceneffizientes Metallrecycling ist wegen der zunehmenden Komplexität moderner Sekundärrohstoffe und der teils begrenzten Kreislaufführung in den eingesetzten metallurgischen Aggregaten nur durch Multi-Metall-Ansätze realisierbar. Die aktuellen Herausforderungen für eine sinnvolle Gestaltung geeigneter Prozessketten sind interdisziplinär und komplex. Eine Bewertung des Recyclingnutzens ist nur nach einer ganzheitlichen Betrachtung der kompletten Recyclingrouten möglich.

Bedingt durch die enge Verzahnung sind Effizienzpotentiale insbesondere an der Schnittstelle Aufbereitung-Metallurgie zu finden. Die Chancen und die Schwierigkeiten einer intensivierten Zusammenarbeit an dieser Schnittstelle wurden im vorliegenden Beitrag herausgearbeitet und am Beispiel des Recyclings von Li-Ionen Batterieschrott qualitativ verdeutlicht. Generell können die Anforderungen an ein innovatives und ressourceneffizientes Metallrecycling wie folgt zusammengefasst werden:

1. Versorgung mit qualitativ hochwertigen Sekundärrohstoffen:
 - Anreize für Schrottsammlung,
 - Förderung sortenreiner Erfassung,
 - Design für Recycling,
 - Trennung hochkomplexer Materialverbunde,
 - optimierte Zerkleinerung/Sortierung (z.B. sensorgestützte Sortierung) und
 - metallurgische Aufkonzentrierung (z.B. Basismetall als Sammler).
2. Prozessdesign für hochwertige Recyclingprodukte:
 - detaillierte Schrottcharakterisierung,
 - Entfernung von wertvollen Metallen aus unedleren Metallen (z.B. Silber aus Blei),
 - Prozesskettenoptimierung (z.B. verlustminimierte Aufbereitung / Metallrückgewinnung, Schnittstellenoptimierung) und
 - Verknüpfung mit bestehenden Prozessrouten.
3. Energiesparen für hohe Ressourceneffizienz:
 - hochselektive kurze Prozessketten und
 - Nutzung autothermer Potenziale (z.B. Organik).

Die vorliegende Betrachtung der zukünftigen Anforderungen und Chancen einer konsequenten Optimierung der Schnittstelle Aufbereitung - Metallurgie zeigt, dass dieses Ziel nur erreicht werden kann, wenn mehr Kommunikation und Kooperation beider Technikbereiche erfolgt. Hierbei muss sich stets das flexiblere System an das vor-/nachgeschaltete Aggregat anpassen.

Wir danken Prof. Thomas Pretz vom I.A.R. der RWTH Aachen University für die inhaltliche Zuarbeit im Bereich der Aufbereitung.

5. Literatur

- [1] Antrekowitsch, H., Luidold, St. et al.: Aktuelle Entwicklungstrends und zukünftige Herausforderungen im Bereich der Nichteisenmetallurgie. In: BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 160 (2015) 10-11, S. 495–500
- [2] Boyden, A., Soo, V.K.; Doolan, M.: The Environmental Impacts of Recycling Portable Lithium-Ion Batteries. Procedia CIRP 48, 2016
- [3] Diaz, F., Trentmann, A., Latacz, D., Friedrich, B.: Thermische Konditionierung (Pyrolyse) zur Verbesserung der Rückgewinnbarkeit kritischer Metalle aus Elektro- und Elektronik-Altgeräten. In: Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.): Recycling und Rohstoffe, Band 9. Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2016, S. 373-389
- [4] EC Communication 2015: Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy.
- [5] Hagelüken, C.: persönliche Mitteilung 19.02.2018
- [6] Rombach, E.: Ressourceneffizienz beim Metallrecycling – Teil 2 Metallrückgewinnung. Vorlesungsskript IME der RWTH Aachen University, 2018
- [7] Rombach, G.: Grenzen des Recyclings. Schriftenreihe des IME – Bd. 4. Aachen: Shaker, 2002
- [8] Schlick, T., Hertel, G. et al.: Zukunftsfeld Elektromobilität - Chancen und Herausforderungen für den deutschen Maschinen und Anlagenbau. Studie Roland Berger. VDMA, Mai/2011
- [9] UNEP (2011). Recycling Rates of Metals-A Status Report. <http://www.unep.org/>

Ansprechpartner



Dr.-Ing. Elinor Rombach
RWTH Aachen University
Wissenschaftliche Angestellte und Lehrbeauftragte
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling
Intzestraße 3
52056 Aachen, Deutschland
+49 241-8090230
erombach@ime-aachen.de



Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich
RWTH Aachen University
Institutsdirektor
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling
Intzestraße 3
52056 Aachen, Deutschland
+49 241-8090850
bfriedrich@ime-aachen.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel • Olaf Holm • Elisabeth Thomé-Kozmiensky
Daniel Goldmann • Bernd Friedrich (Hrsg.):
Recycling und Rohstoffe – Band 12

ISBN 978-3-944310-46-6 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2019

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Claudia Naumann-Deppe,
Janin Burbott-Seidel, Ginette Teske, Sarah Pietsch, Roland Richter,
Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Beltz Grafische Betriebe GmbH, Bad Langensalza

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.