



100% RECYCLING

STABSTAHL
HALBZEUG
ROHSTAHL
BLANKSTAHL

Bei der Georgsmarienhütte GmbH kommt für die Stahlerzeugung im Elektrolichtbogenofen ausschließlich aufbereiteter, sortierter Stahlschrott zum Einsatz. Damit schließen wir den Wertstoffkreislauf.

Stetig arbeiten wir daran, auch die in den Produktionsprozessen entstehenden Nebenprodukte weiter nutzen zu können, beispielsweise durch

- Wiederverwendung metallurgischer Schlacken im Stahlerzeugungsprozess
- Aufbereitung und Wiederverwendung von Nebenprodukten als Rohstoffersatz im Straßenbau und in der Klinker- und Zementindustrie

Unser Ziel: Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz bei der Stahlproduktion.



Recycling 4.0 an zwei metallurgischen Beispielen

Jan Ehrig, Robert Wolf und Michael Stelter

1.	Lithium-Gewinnung aus lithiumhaltigen Akkumulatoren und Zinnwaldit.....	412
2.	Gewinnung von Blei und Indium aus Bleisilikatglas und indiumhaltigem Schrott	415
3.	Zusammenfassung	417
4.	Literatur.....	418

Im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) versteht man unter Recycling alle Verwertungsverfahren, durch die Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden, wobei die rein energetische Verwertung nicht einbezogen ist [4].

Recycling ist keine neue Erfindung. Der Begriff des Recyclings im Industriezeitalter ist jedoch nicht statisch, sondern unterliegt einem stetigen Wandel. Hierzu trägt zum einen der global stark ansteigende Bedarf an Rohstoffen bei, heute insbesondere auch im Hochtechnologiesektor. Zum anderen hat die rohstoffpolitische Lage in den letzten Jahrzehnten dazu geführt, dass einige Rohstoffe, die für heutige Technologien essentiell sind, inzwischen im Hinblick auf die Preisentwicklung und/oder die Verfügbarkeit zu den kritischen Rohstoffen zählen. Insbesondere bei den sogenannten (Hoch-)Technologiemetallen ist die Produktion vielfach auf wenige Länder konzentriert. Daher hat das Recycling in den vergangenen Jahren zunehmend Bedeutung für die Versorgung mit kritischen Rohstoffen erlangt (*urban mining*). Zudem wachsen die Anforderungen an die Trennung und Aufbereitung immer komplexer werdender Sekundärrohstoffe, deren Wiederverwertung angesichts der großen anfallenden Mengen und des Bedarfs an den enthaltenen Einzelkomponenten dringend geboten ist.

Während *Recycling 1.0* im Wesentlichen die stoffliche Nutzung von Produktionsrückständen und somit die Abfallreduzierung umfasste, bezog *Recycling 2.0* auch die Nutzung von Sekundärrohstoffen nach deren Nutzungsende (EoL = end of life) ein. Voraussetzung für die Verwertung von Sekundärrohstoffen ist die Bereitstellung geeigneter Sammelsysteme, beispielsweise für Glas und Metalle wie Kupfer, Aluminium und Blei, die inzwischen in den meisten Industrienationen flächendeckend zur Verfügung stehen. Allerdings werden die verschiedenen Sekundärrohstoffe mit diesen Sammelsystemen nicht vollständig erfasst, so dass auch heute noch erhebliche Mengen an Wertstoffen dem Materialkreislauf entzogen werden. Die erfassten Sekundärrohstoffe werden häufig in bestehende Produktionsprozesse eingeschleust und darin mitverarbeitet. In diesen Fällen können in der Regel nur die Wertstoffe

wieder gewonnen werden, für die die bestehenden Verfahren ausgelegt waren und noch sind. So wird bislang ein erheblicher Teil an Elektronikschrott in Kupferhütten recycelt. Hier werden neben Kupfer weitere Metalle wie Nickel, Zinn, Blei und Edelmetalle weitgehend zurück gewonnen, während andere im Elektronikschrott enthaltene Hochtechnologiemetalle wie Gallium, Indium, Niob und Tantal verloren gehen. Die Weiterentwicklung im Rahmen des *Recycling 3.0* umfasste daher materialspezifisch optimierte Stoffkreisläufe, die möglichst die gewünschten Einzelkomponenten aus komplexen Sekundärrohstoffen wie Elektronikschrott wieder nutzbar machen sollten. Hier sind vor allem die Gehalte an werthaltigen strategischen Technologiemetallen, die teilweise über denen der Primärerze liegen, von Interesse. Darüber hinaus wird jedoch angestrebt, auch material- und branchenübergreifend energetisch optimierte Stoffkreisläufe zu schaffen, die mit hoher Wertschöpfung Recycling ermöglichen, so dass hier von einer neuen Qualität, dem *Recycling 4.0* gesprochen werden kann. Die Preise für bestimmte Rohstoffe, deren Verfügbarkeit und Bedarf werden langfristig Anreiz sein, um neue effizientere Recyclingverfahren zu entwickeln. Um wirtschaftlich zu arbeiten, müssen in einem Prozess Sekundärrohstoffe verschiedener Branchen (z.B. Metalle und Gläser) gewonnen werden, bzw. neue Verfahren entwickelt werden, mit denen in einem Prozess alle wesentlichen Wertstoffe aus primären und sekundären Rohstoffen gewonnen werden können. Neben den zu entwickelnden Verfahren müssen zudem effizientere Sammel- und Logistiksysteme eingeführt werden, die der Fehlsteuerung der Wertstoffe entgegen wirken. Diese ganze Entwicklung muss einhergehen mit einer ganzheitlichen Betrachtung der Energie- und Stoffnutzung, unter gleichzeitiger Berücksichtigung der umweltrelevanten Aspekte. Somit wird ein Gesamtverständnis der technologischen Prozesse branchenübergreifend notwendig, welches auch durch Modellbildung von Expertensystemen abgebildet und analysiert werden kann.

Im Folgenden wird *Recycling 4.0* an zwei metallurgischen Beispielen näher erläutert. Es handelt sich zum einem um die Lithium-Gewinnung aus Lithium-Ionen-Akkumulatoren mit der Option, dieses Verfahren in einen hybriden Ansatz zu integrieren, bei dem Lithium und die in den Akkumulatoren enthaltenen weiteren Wertmetalle wie Kobalt, Nickel und Kupfer sowohl aus primären als auch sekundären Rohstoffen gewonnen werden. Zum anderen wird die Gewinnung von Blei und Indium aus Bleisilikatgläsern und indium- und zinnhaltigen Schrotten beschrieben. Die Verfahren zu diesen Themengebieten wurden im Rahmen eines inzwischen abgeschlossenen BMBF-Verbundforschungsprojektes (Förderkennzeichen 03WKP18A) und einer Forschungs Kooperation der TU Bergakademie Freiberg mit dem Helmholtz-Institut Freiberg für Ressourcentechnologie erarbeitet.

1. Lithium-Gewinnung aus lithiumhaltigen Akkumulatoren und Zinnwaldit

Lithium wird aktuell vor allem aus Salzlagerstätten und Solen in Südamerika gewonnen. Die Gewinnung aus lithiumhaltigen Erzen, Sekundärrohstoffen (z.B. Lithium-Ionen-Akkumulatoren) und lithiumhaltigen Lösungen (z.B. Tiefenwässer) hat aufgrund der geringen Li-Gehalte und der Komplexität der Gewinnungsverfahren bisher noch geringe Bedeutung. Es wurde ein hybrider Ansatz zur Lithiumgewinnung aus Primärrohstoffen (Zinnwalditkonzentrat) und Sekundärrohstoffen (Lithium-Ionen-

Akkumulatoren) entwickelt, um beide Stoffströme in einem Gewinnungsverfahren zusammenführen zu können.

Die lithiumhaltige Akkufraktion als Ausgangsmaterial für die Verwertung der Sekundärrohstoffe wurde durch Pyrolyse von gebrauchten Lithium-Ionen-Akkumulatoren bei der Firma Accurec Recycling GmbH gewonnen. Durch die Pyrolyse erfolgte eine Zersetzung der organischen Elektrolytkomponenten. Anschließend erfolgte die Zerkleinerung und Klassierung des Materials bei der Fa. UVR-FIA GmbH. Tabelle 1 zeigt die chemische Analyse der Akkufraktion mit der Partikelgröße 250 bis 1.000 μm . Neben 6,4 Prozent Lithium enthält die Akkufraktion 45 Prozent Kobalt, neun Prozent Aluminium, vier Prozent Kupfer, zwei Prozent Nickel und ein Prozent Mangan. Anhand von Röntgenbeugungsanalysen wurden Kobaltoxid (CoO) und die lithiumhaltigen Phasen LiAlO_2 , Li_2CO_3 , LiCoO_2 nachgewiesen.

Tabelle 1: Chemische Analyse der verwendeten Lithiumakkufraktion, Analyse der Metalle mittels ICP-OES, Kohlenstoffanalyse mittels CS-Analysator

Li	Co	Al	Cu	Ni	Mn	Fe	Mg	C
Ma.-%								
6,4	45,0	8,8	4,0	2,1	1,0	0,5	0,2	5,5

Um die lithiumhaltigen Phasen der Akkufraktion in wasserlösliche Lithiumverbindungen zu überführen, erfolgte eine thermische Behandlung, bei der die Prozessparameter (Zuschlagstoffmenge, Temperatur) und das Krählen systematisch variiert wurden. Die Versuche wurden in einem Kammerofen durchgeführt, wobei sich das Akkumaterial in einer Röstschale befand. Bei der Ermittlung der optimalen Zuschlagstoffmenge zeigte sich, dass eine stöchiometrische Zugabe von Kaliumhydrogensulfat ausreichend ist. Anhand von Röntgenbeugungsanalysen der Röstproben wurde danach die wasserlösliche Phase Lithiumkaliumsulfat (LiKSO_4) nachgewiesen.

Die Röstproben wurden anschließend mit Wasser 30 Minuten lang bei Raumtemperatur und einem Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:10 gelaugt. Der maximale Lithiumlaugungsgrad wurde erreicht, wenn die Probe zuvor bei einer Temperatur von 650 $^{\circ}\text{C}$ thermisch behandelt wurde. Durch das Krählen konnte der Lithiumlaugungsgrad um acht Prozent erhöht werden. Dieser Aspekt ist bei der Auswahl des Ofenaggregats für eine technische Umsetzung zu beachten. Die Versuche unter optimalen Bedingungen ergaben einen mittleren Lithiumlaugungsgrad von 91 Prozent. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse wurde durch mehrmalige Wiederholung der Versuche sichergestellt. Die typische Zusammensetzung einer Laugungslösung mit einem Lithiumgehalt von 4,7 g/l zeigt Tabelle 2. Neben Lithium sind Kalium, Schwefel und Kobalt enthalten, wobei Kobalt bei der Laugung fast vollständig im Laugungsrückstand verbleibt. Die Laugungsrückstände enthielten 41 Prozent Kobalt, vier Prozent Kupfer und zwei Prozent Nickel und können somit zur Erzeugung von Kobalt mit pyro- und hydrometallurgischen Verfahren weiter verwertet werden.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung einer Lösung nach der wässrigen Laugung der thermisch behandelten Akkufraktion

Einheit	Li	K	Co	Ni	Mn	Fe	Al	S	P
g/l	4,68	30,6	1,06	0,02	0,11	< 0,01	< 1	24,5	< 0,01

Mit dem Lithiumakku-Aufschlussverfahren wurde eine Lithiumausbeute ($m_{\text{Li im Filtrat}} / m_{\text{Li im Akku}}$) von 84 Prozent erreicht. Der Lithiumverlust von 16 Prozent für den Gesamtprozess entfällt zu etwa gleichen Teilen auf Verluste beim Rösten und Laugen. Zur Gewinnung von Lithiumverbindungen aus den Lösungen können nach einer weiteren Anreicherung durch eine Solventextraktion Fällungsreaktionen genutzt werden.

Neben der Lithiumrückgewinnung aus lithiumhaltigem Akkumaterial wurde ein Verfahren zur Lithiumgewinnung aus lithiumhaltigem Erz entwickelt [2]. Das Ausgangsmaterial war ein Zinnwalditkonzentrat, das aus Greisenerzen gewonnen wurde, einem heimischen Rohstoff aus der Region um Zinnwald. Der Zinnwaldit ist ein Glimmer mit der chemischen Formel $\text{K}[\text{Li,Al,Fe}]_3[\text{Al,Si}]_4\text{O}_{10}[\text{F,OH}]_2$ [6]. Das erzeugte Zinnwalditkonzentrat enthielt 1,5 Prozent Lithium und wurde thermisch mit Kaliumhydrogensulfat behandelt. Die Laugung der Röstproben mit Wasser ergab Laugungsgrade für Lithium von 94 Prozent.

Aufbauend auf den Einzelverfahren wurde ein hybrider Ansatz zur Verknüpfung der beiden Rohstoffströme entwickelt [1]. Das vereinfachte Verfahrensfliessschema des hybriden Ansatzes zur Lithiumgewinnung ist in Bild 1 dargestellt. Der neue Prozess ermöglicht die Zusammenführung der primären und sekundären Rohstoffströme bereits auf der Ebene des pyrometallurgischen Aufschlussverfahrens.

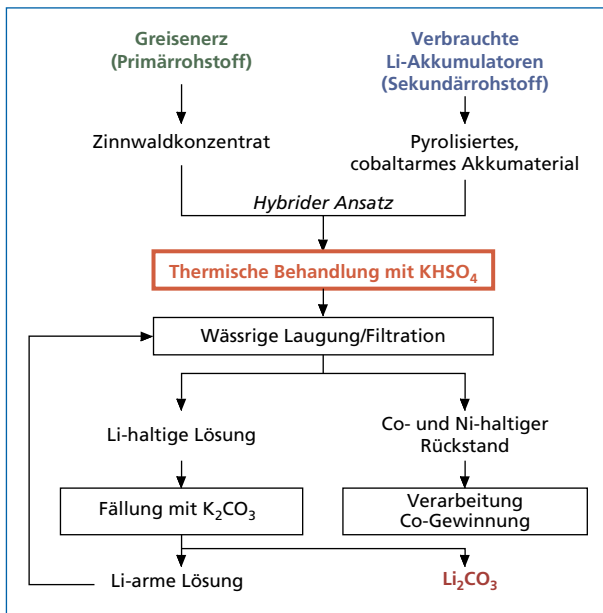


Bild 1:

Vereinfachtes Verfahrensfliessbild des hybriden Ansatzes zur Lithiumgewinnung

Bei Versuchen mit unterschiedlichen Mischungsverhältnissen von Zinnwalditkonzentrat zu Akkumulatoren (stufenweise Erhöhung von 1:0,25 bis 1:4) und anschließender Laugung mit Wasser (Fest-Flüssig-Verhältnis von 1:10, Laugungsdauer dreißig Minuten) wurden Lithium-Laugungsgrade von 90 bis 94 Prozent erzielt. Es können somit Akkumulatoren und Zinnwaldit in sehr variablen Verhältnissen eingesetzt werden, so dass das Verfahren leicht an die Verfügbarkeit der Rohstoffe angepasst werden kann.

Die thermische Behandlung wurde bei 850 °C durchgeführt, um die Zinnwalditstruktur vollständig zu zerstören. Nachteilig ist, dass infolge von Lithiumverlusten während der thermischen Behandlung die Lithiumausbeute gegenüber dem Lithium-Akkumulatoren-Aufschluss auf 72 Prozent sinkt. Nach der Laugung entstehen eine lithiumhaltige Lösung und ein Laugungsrückstand. Der cobalt- und nickelhaltige Rückstand wird zur Gewinnung von Kobalt bzw. Kobaltverbindungen in technisch erprobten Prozessen eingesetzt. Aus der lithiumhaltigen Lösung erfolgt die Abtrennung von Lithium durch Fällung von Lithiumcarbonat. Die dabei entstehende lithiumarme Lösung wird im Sinne einer Stoffkreislaufschließung wieder im Laugungsprozess eingesetzt.

Bei der Verarbeitung von kobaltreichen Lithium-Ionen-Akkumulatoren ist das Einzelverfahren zu bevorzugen, da sonst das in der Akkufraktion enthaltene Kobalt verdünnt wird. Fallen kobaltarme Lithium-Ionen-Akkumulatoren an, ist die hybride Verarbeitung zu favorisieren.

2. Gewinnung von Blei und Indium aus Bleisilikatglas und indiumhaltigem Schrott

Das gemeinsame Recycling von bleihaltigen Gläsern und indiumhaltigen Schrotten ist ein weiteres Beispiel für die Vereinigung unterschiedlicher Stoffströme bei Recycling. Ziel ist es, verschiedene Schrotte gemeinsam so zu recyceln, dass alle Produkte einer weiteren Nutzung zugeführt werden können. Im Rahmen eines Kooperationsprojektes wurden die Möglichkeiten der Verwertung von bleihaltigem Konusglas (CRT-Glas, cathode ray tubes) aus Röhrenfernsehgeräten und -monitoren und indiumhaltigem Schrott aus LCD-Displays untersucht.

CRT-Glas wird momentan in geringen Mengen in der Bleiindustrie als Schlackenbildner eingesetzt. Hier soll durch Reduktion das Blei zurückgewonnen und über die Zugabe der im Glas enthaltenen Silikate Quarz als Schlackenbildner eingespart werden. Die anfallenden Mengen, die allein in Europa im Jahr 2015 wahrscheinlich etwa 280.000 t betragen [3], können auf diesem Weg allerdings nicht ansatzweise verwertet werden. Auch die Möglichkeit, das Glas in Form von neuem Bleiglas wieder zu verwenden, besteht nur noch in sehr geringem Maß für Spezialanwendungen, wie z.B. Scheiben für Röntgenräume und andere Strahlenschutzanwendungen. Der noch vor 20 Jahren übliche Recyclingweg, das Glas direkt zur Herstellung neuer Röhrengeräte zu nutzen, ist inzwischen weggefallen.

Bei indiumhaltigem Schrott handelt es sich vor allem um LCD (liquid crystal display)-Bildschirme für Fernsehgeräte und Computermonitore. Handybildschirme spielen trotz der großen Zahl aufgrund der geringen Größe und der daraus resultierenden geringen Gesamtmasse eine eher untergeordnete Rolle. Für LCD-Schrott existiert momentan kein wirtschaftlicher Recyclingweg. Der enge Werkstoffverbund der LCD-Bildschirme, bestehend aus Polymerfolien, dünnen Glasscheiben und den stromleitenden Schichten aus Indium-Zinn-Oxid (ITO = indium tin oxide, neunzig Prozent In_2O_3 , zehn Prozent SnO_2), macht das Recycling momentan noch schwierig. Besonderes Problem ist dabei die geringe Konzentration des ITO auf dem Bildschirmglas.

Die beiden Schrottfractionen bestehen zum erheblichen Teil aus Glas sowie Oxiden der Wertmetalle Blei, Indium und Zinn. Es wurde nach einer ökonomischen sinnvollen Möglichkeit gesucht, alle diese Bestandteile wieder zu gewinnen. Neben der erneuten Nutzung der Wertstoffe besteht zudem ein erhebliches Interesse an der Reduktion des Schrottaufkommens, das seinerseits Kosten verursacht. Im Rahmen des vorgestellten Projektes wurden daher, ganz im Sinne von *Recycling 4.0*, Verfahren erarbeitet, um beide Schrotte branchenübergreifend und energetisch optimiert gemeinsam zu recyceln.

Problematisch beim Recycling von Bleigläsern sind der derzeit relativ niedrige Bleipreis (etwa 1.600 USD/t) bei gleichzeitig hohen Materialkosten für die Additive zur Erzielung eines ausreichenden Bleiausbringens sowie die fehlenden Anwendungsmöglichkeiten für das Glas. Letzteres wird in pyrometallurgischen Prozessen verschlackt und kann nur einer sehr niederwertigen Nutzung, z.B. im Straßenbau, zugeführt werden. In hydrometallurgischen Prozessen wird das Glas meist mittels Natronlauge in Lösung gebracht und anschließend als Wasserglas verwendet. Der erzielbare Gewinn deckt allerdings nicht die Anlagenkosten und nicht einmal die Kosten für die Natronlauge.

Problematisch beim Recycling von LCD's ist der niedrige Metallgehalt (etwa 0,01 Prozent In) bei einem hohen Glasanteil von etwa 87 Prozent. Zudem bestehen die Displays zu etwa 12,7 Prozent aus organischen Bestandteilen wie Polarisationsfolien und Flüssigkristallen [5]. Ziel bisheriger Projekte war ausschließlich die Gewinnung einzelner Wertstoffe aus den LCDs, vor allem des Indiums und der Flüssigkristalle. Indium gilt aufgrund seiner hohen Vulnerabilität bei gleichzeitig hohem Versorgungsrisiko als ein besonders kritischer Rohstoff für die deutsche und europäische Wirtschaft.

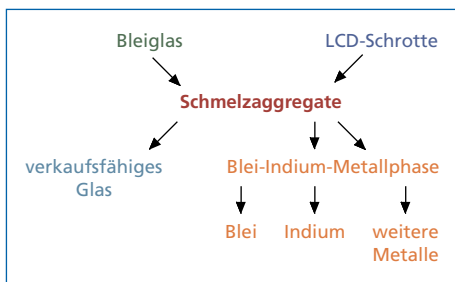


Bild 2: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild des Recyclings von Bleiglas und LCD-Schrott

Ziel des hier vorgestellten Projektes war zum einen die Gewinnung des Glases als Mischglas und zum anderen die Gewinnung der Metalle in einer Mischmetallphase (Bild 2). Der organische Anteil der LCD's dient im Prozess sowohl als Brennstoffsubstitut als auch als Reduktionsmittel für die Metalloxide. Die Mischung der beiden Fraktionen ist notwendig, weil das Blei des Bleiglasses als Sammler für die anderen niedrig konzentrierten Metalle dient. Diese Metalle sind ohne

ein Sammlermetall aufgrund der sehr geringen Konzentrationen nicht gewinnbar. Die reduzierten Metalltröpfchen würden sich z.B. aufgrund der feinen Dispergierung in der Charge nicht absetzen. Außer Blei könnte auch Kupfer diese Funktion im Prozess übernehmen. Kupferhaltige Schrotte werden jedoch bereits auf anderen Wegen recycelt.

Das Glas besteht aus einer Mischung von Alumosilikatglas der LCD's und Natrium- bzw. Calciumsilikatglas des Bleiglasses. Mit dieser Zusammensetzung, die auch durch Variation des Verhältnisses LCD zu Bleiglas eingestellt werden kann, kann es in der Bauindustrie beispielsweise als Bedachungsmaterial oder für die Herstellung von

Fliesen verwendet werden. Durch Änderungen der Eigenschaften durch die Zugabe entsprechender Additive sind auch Anwendungen in anderen Bereichen, wie z.B. der Herstellung von Hochleistungssolarzellen, denkbar.

Zum Beweis der Machbarkeit des Verfahrens wurden Untersuchungen am Institut für Nichteisenmetallurgie an der TU Bergakademie Freiberg unter Beteiligung des Helmholtz-Institutes Freiberg für Ressourcentechnologie durchgeführt. Im ersten Schritt wurde das Blei aus Bleiglas unter Zugabe von Additiven wie Soda und Kalk mittels Kohlenstoff reduziert. Aus dem gewonnenen Anfangsglas mit einem Bleioxidgehalt von 21,4 Prozent konnten mehr als 98 Prozent Blei ausgebracht werden. Zudem konnte Antimon gewonnen werden, das in der Glasindustrie in Form von Antimonoxid als Läuterungsmittel eingesetzt wird. Der Antimonoxid-Gehalt im Ausgangsglas betrug 0,23 Prozent, wovon etwa 95 Prozent ausgebracht werden konnten. Nach der Optimierung der Parameter zum Maximieren des Bleiausbringens wurde die Zugabe von LCD-Glas durch die Zugabe von Indium-Zinn-Oxid simuliert. Es zeigte sich, dass auch geringe Mengen ITO in der Charge erheblichen Einfluss auf den Prozess haben. So sinkt beispielsweise in Anwesenheit von ITO das Metallausbringen von Blei und Antimon unter sonst gleichen Bedingungen. Dieser und andere Effekte konnten durch Einstellung der Arbeitstemperatur auf 1.300 °C und die Optimierung der Additivzugabe weitestgehend eliminiert werden. Im Gesamtergebnis konnte ein Blei- und Antimonausbringen von 95 Prozent erreicht werden, während Indium und Zinn zu jeweils 80 Prozent in die Metallphase überführt wurden. Die Untersuchungen zeigten, dass die gemeinsame Gewinnung der Metalle möglich ist.

Die Mischmetallphase kann beispielsweise durch bereits vorhandene pyrometallurgische Raffination weiter verarbeitet werden. Als eine Möglichkeit wurde die selektive Oxidation untersucht. Durch Einblasen von Luft in die erzeugte Metallschmelze bei verschiedenen Temperaturen konnte gezeigt werden, dass die Metalle mittels selektiver Oxidation voneinander getrennt werden können. Dabei werden zuerst Indium, dann Antimon und zuletzt Zinn oxidiert. Eine ausreichende Selektivität wurde in ersten Versuchen noch nicht erreicht, die prinzipielle Machbarkeit eines solchen Prozesses konnte jedoch gezeigt werden.

In weiteren Schritten sollen die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens besser verifiziert und die Einflussparameter auf den Prozess weiter optimiert werden. Weiterhin sind Versuche in halbertechnischen Anlagen geplant, um die Versuchsergebnisse auf einen größeren Maßstab skalieren zu können.

3. Zusammenfassung

Da Sekundärmaterialien immer komplexer aufgebaut und daher auch schwerer zu recyceln sind, werden intelligente Verfahren zur Aufkonzentrierung der Wertstoffe zunehmend wichtiger. Durch neue Verfahren müssen immer mehr Inhaltsstoffe zurückgewonnen werden. Die geschilderten Beispiele für das *Recycling 4.0* haben gezeigt, dass verschiedene Wertstoffe aus unterschiedlichen Stoffströmen in einem gemeinsamen Prozess wiedergewonnen werden können. Am Beispiel des Li-Recyclings konnte

gezeigt werden, dass neben dem eigentlichen Endprodukt, dem Lithiumcarbonat, auch die entstehenden Laugungsrückstände zur Gewinnung von Kobalt- und Kobaltverbindungen genutzt werden können. Die Kombination von sekundären und primären oder verschiedenen sekundären Stoffströmen ermöglicht oft erst die Entwicklung von wirtschaftlichen Verfahren zur Wiederverwertung von Wertstoffen und kann somit die Recyclingeffizienz erheblich erhöhen. Dies zeigt insbesondere das Beispiel der Gewinnung von Blei und Indium aus Bleisilikatglas, bei der im Sinne einer Zero Waste Technologie sämtliche Produkte wieder einer Nutzung zugeführt werden können. Auch die Möglichkeit, Kunststoffanteile zumindest energetisch im Prozess zu nutzen, trägt entscheidend zur Effizienzsteigerung bei.

Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die finanzielle Förderung des Verbundforschungsprojektes (Förderkennzeichen 03WKP18A). Weiterhin bedanken wir uns für die konstruktive Zusammenarbeit mit dem Institut für Keramik, Glas und Baustofftechnik der TU Bergakademie Freiberg.

4. Literatur

- [1] Abschlussbericht Verbundprojekt Hybride Lithiumgewinnung, BMBF Förderkennzeichen: 03WKP18A, Zeitraum: 01.03.2011 - 28.02.2013, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2013. <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb14/791348156.pdf>
- [2] Ehrig, J.; Stelter, M.; Bombach, H.; Morgenstern, G.; Scheel, M.: Extraction of Lithium from Zinnwaldite, Proceedings of the European Metallurgical Conference 2013, Band 2, S. 605-614
- [3] Fakhredin, F., Huisman, J.: Analyzing End of Life LCD TV WEEE Flows in Europe. Proceedings of EcoDesign 2013, International Symposium, Jeju Island, South Korea
- [4] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG), § 3 (25)
- [5] Salhofer, S.; Spitzbart, M.; Maurer, K.: Recycling of LCD Screens in Europe - State of the Art and Challenges. In: Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing, Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011, S. 454-458. DOI 10.1007/978-3-642-19692-8_78
- [6] Wietelmann, U.; Bauer, R.J.: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 21, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, Germany, 2012, S. 342-343