

RÜCKGEWINNUNG VON WERTMETALLEN AUS BATTERIESCHROTT¹

RECOVERY OF VALUABLE METALS FROM BATTERY SCRAP

*Matthias Vest, Reiner Weyhe, Tim Georgi-Maschler, Bernd Friedrich

Dipl.-Ing. M.Vest, IME Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen University, Intzestr. 3, 52056 Aachen, e-mail: mvest@ime-aachen.de

Dr.-Ing. R. Weyhe, ACCUREC Recycling GmbH, Wiehagen 12 - 14, 45472 Mülheim a. d. R.,

Dipl.-Ing. T. Georgi-Maschler, IME Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen University, Intzestr. 3, 52056 Aachen

Prof. Dr.-Ing. B. Friedrich, IME Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen University, Intzestr. 3, 52056 Aachen

1 Zusammenfassung und Abstract

Am IME, Institut der RWTH Aachen University wurde seit dem Jahr 2000 kontinuierlich an Batterie-Recyclingverfahren in Zusammenarbeit bzw. im Auftrag des Industriepartners ACCUREC Recycling GmbH geforscht. In diesem Zusammenhang wurden Recyclingkonzepte für Nickel-Cadmium-Batterien, Nickel-Metallhydrid-Batterien, Primär-Gerätebatterien und Li-Ion-Gerätebatterien gemeinsam mit dem industriellen Partner entwickelt. Einige dieser Verfahren sind bereits industriell umgesetzt und als BAT Best Available Technology bewertet worden. Diese systematische Forschung am IME ist 2008 mit dem Kaiserpfalzpreis der deutschen NE-Industrie gewürdigt worden. Aktuell fördert das BMBF im Rahmen der Initiative LiB2015 ein dreijähriges Forschungsprojekt zum Thema „Rückgewinnung der Wertstoffe aus zukünftigen Li-Ion basierten Automobil-Batterien“.

In diesem Beitrag werden zunächst die entwickelten Verfahren und ihre Möglichkeiten zum Erreichen einer optimalen Recyclingeffizienz entsprechend der aktuellen nationalen und europäischen Gesetzgebung vorgestellt. Anschließend werden die Potentiale des aktuellen Forschungsprojektes zum Recycling von Li-Ion Batterien aus dem Fahrzeugsektor erörtert.

Since the year 2000 the IME, institute of the RWTH Aachen University, has continuously done research work on the field of battery recycling with and on behalf of its industry partner ACCUREC Recycling GmbH. In this context recycling concepts have been developed with the industrial partners for NiCd, NiMH, primary consumer batteries and Li-Ion consumer batteries.

¹ Symposium Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovation, 4./5. Februar 2010, Schloss Ettlingen

Some of the processes have been implemented on industrial level and even archived to be acknowledged as BAT Best Available Technology. For this systematic research the IME was rewarded in 2008 with the Kaiserpfalzpreis of the German nonferrous industry. Currently, a research project with the title “Recovery of valuable materials from future Li-Ion automotive batteries” from IME and ACCUREC Recycling GmbH is funded by the German Ministry for Research and Education (BMBF).

The recycling concepts and their potential with respect to recycling efficiency are discussed in this article. Subsequently the current research work on automotive batteries is described in detail.

Schlagwörter/Keywords: HEV, EV, Battery, Recycling, Li-Ion, NiCd, NiMH

2 Einleitung

Aufgrund des stetig wachsenden Interesses für das Batterierecyclings von Seiten der Öffentlichkeit, der Politik und der Industrie hat das IME in Zusammenarbeit mit dem langjährigen Industriepartner ACCUREC Recycling GmbH seit dem Jahr 2000 systematisch für alle gängigen Batteriesysteme Verwertungskonzepte entwickelt. Mit Einführung der Batterie Verordnung (BattV) im Oktober 1998 wurden erstmals die Batteriehersteller und -händler verpflichtet, Altbatterien kostenfrei zurückzunehmen und zu recyceln [1], [2]. Um dieser Vorgabe nachzukommen wurde z.B. die Stiftung Gemeinsames Rücknahmesystem Batterien (GRS) von führenden Batterieherstellern gegründet. Die GRS stellt seitdem eine flächendeckende Rücknahme gebrauchter Gerätebatterien in Deutschland und deren Recycling sicher [3]. Im September 2006 wurde die EU-Direktive 2006/66/EC verabschiedet, die in allen EU-Ländern einheitliche Pflichten der Batteriehersteller zur Sammlung und Verwertung von Batterien definiert und für das Recycling erstmals minimale Recyclingeffizienzen für Batterierecycling-Prozesse vorschreibt. Die erforderliche Recyclingeffizienz wird abhängig von der BAT festgelegt, muss jedoch mindestens 50 Gew.-% betragen. Für Blei und Nickel-Cadmium Batterien sind bereits höhere Recyclingeffizienzen (65 bzw. 75 Gew.-%) vorgeschrieben [4]. Die EU-Direktive wurde mit der Verabschiedung des Batteriegesetzes (BattG) im Juni 2009 in nationales Recht umgesetzt und ist seit dem 1. Dezember 2009 in Kraft [5]. So wurde durch die bisherigen Gesetzesinitiativen Schadstoffgehalte (Cd, Hg) schrittweise gesenkt. Durch das BattG steigen auch erstmals die Anforderungen an Batterierecyclingunternehmen und zwingt mitunter Unternehmen, auch Prozessveränderun-

gen vorzunehmen, um die geforderte Recyclingeffizienz zu erreichen. Die entwickelten und nachfolgend beschriebenen Recyclingkonzepte zeigen hierfür Lösungsansätze auf.

3 Recyclingkonzepte

3.1 Vakuumprozess: NiCd-Batterien

NiCd-Batterien stellen aufgrund der Toxizität des Cadmiums besondere Anforderungen an ein Recyclingverfahren, insbesondere für die Arbeitssicherheit und den Umweltschutz. Das von der ACCUREC Recycling GmbH in Zusammenarbeit mit dem IME entwickelte Recyclingverfahren nutzt die Vorzüge der Vakuumtechnologie, um Cadmium-Emissionen auf das technisch erreichbare Maß zu minimieren. Durch die Vakuumtechnologie wurde ein abgas- und abwasserfreies Verfahren ermöglicht, das gleichzeitig durch die hermetische Konstruktion diffuse Cd-Emissionen quasi auf null reduziert und somit ein Höchstmaß an Sicherheit gewährleistet. Die unbehandelten NiCd-Batterien werden batchweise in einen induktiv beheizbaren Vakuumbehälter gefüllt. Dieser wird auf ein Vakuum von 50 mbar entlüftet und dann stufenweise auf 850 °C erhitzt. Bei einer Temperatur von 300-500 °C erfolgt die Pyrolyse der organischen Bestandteile (Elektrolyt, Kunststoffe, etc) der NiCd-Batterien. Nach Erreichen der Zieltemperatur von 850 °C werden die Batterien für fünf Stunden auf dieser Temperatur gehalten. Während dieser Zeit wird das Cadmiumhydroxid durch den vorhandenen Kohlenstoff zu metallischem Cadmium reduziert. Das metallische Cadmium verdampft und wird in einem nachgeschalteten Kondensator aufgefangen. Zurück bleibt ein Ni/Fe-Recyclingkonzentrat mit Cd Restgehalten unter 50 ppm, der in der Stahlindustrie als Legierungszusatz verwendet wird. Das gewonnene Cadmium im Kondensator hat eine Reinheit von 99,9 % und wird in einem „closed-loop“ der Batterie-Industrie zurückgeführt. Nachfolgend sind die wichtigsten Vorteile dieses Verfahrens aufgeführt [2], [6] :

- einstufiges Verfahren: Einsparung von Aufbereitungsschritten
- geringfügigen spezifischen Energieverbrauch
- Einsparung von Abgas- und -Abwasserreinigung
- quasi Cd-emissionsfrei
- hoher Automatisierungsgrad
- hohe Betriebssicherheit

Am Standort Mülheim a.d.R. wird seit 1998 eine NiCd-Batterierecycling-Anlage betrieben, die stufenweise auf die derzeitige Kapazität von 2.500 t/a erweitert wurde. Aufgrund der oben genannten Vorteile gilt dieses Verfahren als Best Available Technology (BAT). Zur Zeit werden

mit der vorhandenen Anlage aus einer Tonne NiCd-Batterien ca. 160 kg Cd mit einer Reinheit von 99,9 % und ca. 650 kg Ni/Fe-Schrott an verkaufsfähigen Produkten gewonnen. Somit erreicht dieses Verfahren eine Recyclingeffizienz, die deutlich über den gesetzlich geforderten 75 Gew.-% liegt.

3.2 Elektroofen-Verfahren

Die nachfolgenden Recyclingverfahren folgen alle dem gleichen Verfahrensprinzip. Je nach Batteriesystem erfolgt eine mechanische und thermische Aufbereitung. Anschließend werden die Batterien in einem Lichtbogenofen reduzierend aufgeschmolzen um Metalle gezielt in der Metalllegierung, der Schlackenphase, oder im Flugstaub anzureichern (s. Abb.1). Aufgrund der hohen Verfahrensflexibilität, der geringen Abgasmengen und der hohen Produktivität schon bei verhältnismäßig kleinen Anlagengrößen sind Lichtbogenöfen besonders geeignet für Batterierecycling-Verfahren. Dabei erfolgt die Anpassung an das jeweilige Batteriesystem durch die Wahl der Schlacke. Die Schlackenphase ist das Trennmedium dieses Verfahrens. Je nach Wahl der Schlackeneigenschaften reichert sich ein Metall in der Metallphase, in der Schlacke oder im Flugstaub an. In diesem Zusammenhang sind die wichtigen Schlackeneigenschaften vor allem Basizität und Löslichkeit der Metalle, sowie Dichte, Schmelzpunkt und Viskosität bei Prozess-temperatur.

3.2.1 NiMH-Batterien

NiMH-Alt-Batterien enthalten 25 % Fe, 36 - 42 % Ni, 3 - 4 % Co und 8 - 10 % Seltenerdmetalle wie Lanthan, Cer, Praseodym und Neodym. NiMH-Alt-Batterien werden in der Regel als preiswerte Nickelquelle in der Stahlindustrie eingesetzt, wobei jedoch die Seltenerdmetalle und Co verschlackt oder im Stahl gebunden ungenutzt verloren gehen. [7] Im Rahmen eines dreijährigen vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben wurde in Zusammenarbeit mit der ACCUREC Recycling GmbH und der UVR-FIA GmbH ein alternatives Verfahren entwickelt, das nicht nur Fe und Ni, sondern auch Co und die Seltenerdmetalle zurückgewinnt. Dazu erfolgt zuerst eine mechanische Aufbereitung der NiMH-Batterien um die Stahlmantelung und den Separator zu entfernen. Zurück bleibt eine Fe-freie Feinfraktion, in der Ni, Co und Seltenerdmetalle noch vollständig enthalten sind. Diese Feinfraktion wird agglomeriert und im Lichtbogenofen zu einer Ni-Co-Legierung und einer seltenerdmetall-reichen Schlacke umgeschmolzen.

Der Schwerpunkt des Forschungsprojektes lag auf der Entwicklung eines Schlackensystems für den Lichtbogenofen, das die folgenden Anforderungen erfüllen sollte: [7]

- schmelzflüssig bei Abstichtemperaturen von mindestens 1460 °C (T_m der Ni-Co-Leg.)

- niedrige Viskosität bei Prozesstemperatur
- ausreichend hoher Dichteunterschied zw. Schlacke und Metall
- hohe Kapazität für Seltenerdmetalloxide
- niedrige Löslichkeit für Ni und Co

Zur Vorauswahl geeigneter Schlackenkomponenten und Systeme wurden Gleichgewichtsberechnungen mit der Software FactSageTM durchgeführt. Anschließend erfolgten Versuche in Lichtbogenöfen im Labor- und Technikumsmaßstab. Die Schlackensysteme CaO-SiO₂ und CaO-CaF₂ erreichten dabei die besten Resultate. Unter Verwendung dieser Systeme wurden die Seltenerdmetalle bereits zu 85 % in der Schlacke angereichert. Ni und Co konnten zu über 99 % in eine Metallphase überführt werden. [7], [8]

Dieses Verfahren wurde im technischen Maßstab noch nicht umgesetzt und somit ist eine Angabe der erreichbaren Recyclingeffizienz nicht hinreichend möglich. Im Labormaßstab konnten aber bereits Werte größer 70 Gew.-% erzielt werden [7]. Eindeutig ist jedoch, dass deutlich höhere Recyclingeffizienzen erreicht werden, wenn NiMH-Batterien in einem derartigen gezielten Batterieverfahren recycelt werden und nicht als preiswerte Nickelquelle in der Stahlindustrie verdünnt werden.

3.2.2 Primär-Gerätebatterien

Primäre Gerätebatterien generieren im Recycling eine Mischfraktion von Zink-Kohle- und Alkali-Mangan-Batterien. Die mengenmäßig relevanten Wertmetalle sind Zn, Mn und Fe, wodurch auch hier der Lichtbogenofen prädestiniert ist zu deren Rückgewinnung. Ziel eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Forschungsprojektes war es, das Mn im Gegensatz zu bestehenden Verfahren in einer hochwertigen Ferromangan-Legierung metallisch zu gewinnen und nicht in einer Schlacke zu verlieren. Zusätzlich soll das Zn verdampft und als ZnO im Flugstaub aufkonzentriert werden. Dieses Ziel konnte durch die Entwicklung eines Schlackensystem und einer Optimierung der Prozessparameter erreicht werden. Anhand thermochemischer Gleichgewichtsberechnungen wurden Schlackenzusammensetzungen im System CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO als geeignet erachtet. In Versuchsreihen bis in den Technikumsmaßstab wurde bis zu 62,4 % des Mangans und 95,8 % des Eisens als hochwertige Ferromanganlegierung ($Fe/Mn \leq 1$) und fast 100 % des Zinks als ZnO-Konzentrat getrennt gewonnen (s. Abb. 4). [8], [9]

Basierend auf diesen Forschungsergebnissen hat die BATREC Industrie AG, Wimmis (Schweiz) einen Lichtbogenofen installiert, in welchem dieser Prozess industriell umgesetzt wird. [8]

3.2.3 Li-Ion Gerätebatterien

In den Jahren 2004 bis 2007 wurde erneut mit Unterstützung des BMBF in Zusammenarbeit mit der ACCUREC Recycling GmbH und der UVR-FIA GmbH an einem Recyclingverfahren für portable Li-Ion Gerätebatterien geforscht.

Durch eine geeignete mechanische Aufbereitung werden bereits hochwertige, vermarktbarere Fraktionen vom Batterieschrott abgetrennt, so z.B. werden in einem ersten Schritt in einer Prallmühle Elektronikbauteile und Kunststoffgehäuse entfernt. In einer folgenden vakuumthermischen Behandlung werden leicht flüchtige organische Verbindungen, wie z.B.: Elektrolyt und Zersetzungsprodukte der Separatorfolie entfernt. Gleichzeitig werden durch diesen Prozess Halogene, insbesondere Fluor, vollständig und sicher abgetrennt. Die deaktivierten und halogenfreien Batteriezellen werden anschließend in einer Hammer- und Schlagnasenmühle zerkleinert und der so entstehende Li-Ion Batterie-Shredder-Schrott durch Siebung, Magnetabscheidung und Windsichtung in eine Metall-, eine Kunststoff- und in eine Feinfraktion (<200 µm) getrennt. Die pulverförmige Feinfraktion besteht aus dem Kohlenstoff und Li des Anodenmaterials sowie den Bestandteilen der Kathode (Li-, Co-, Mn-Oxide) und wird fortan als Elektrodenmaterial (EM) bezeichnet. Da eine weitere mechanische Trennung der Komponenten des EM nicht wirtschaftlich sinnvoll ist, wird diese vorbereitend für den nachfolgenden Elektroofen-Prozessschritt pelletiert. Typische Zusammensetzungen der EM-Pellets sind in Tab. 1 aufgeführt. [8], [10], [11]

Das Elektrodenmaterial wird im Lichtbogenofen metallurgisch umgesetzt. Dabei wird Co und Mn durch den in den Pellets enthaltenen Kohlenstoff reduziert und als Co-Mn-Legierung gewonnen. Das Li wird in der Schlacke und im Flugstaub angereichert. Sowohl die Schlacke als auch der Flugstaub können als Li-Konzentrat in hydrometallurgischen Prozessen für z.B. die Herstellung von Lithiumkarbonat dienen, dass wiederum ein Vorstoff für die Batterieherstellung ist. Somit ist für das Batteriematerial Lithium ein Closed-Loop Recycling aufgezeigt. [8], [10], [11]

4 Aktuelle Forschung zum Recycling von Li-Ion Batterien aus E-Mobilen

Aufbauend auf den vorangehend beschriebenen Erkenntnissen wird dieses Recyclingverfahren in den nächsten Jahren mit Unterstützung des BMBF in Kooperation mit der ACCUREC Recycling GmbH am IME weiterentwickelt und auf die Anforderungen von Li-Ion Automobilbatterien angepasst.

Die hohen Stückgewichte von über 100 kg und die stark variierenden Bauformen der Li-Ion Automobilbatterien erfordern zudem andere Lösungen als bei den Li-Ion Gerätebatterien. So werden bei der mechanischen und thermischen Aufbereitung die Batterien manuell demontiert um bereits frühzeitig vermarktbar Fraktionen wie Metallgehäuse, Elektronikbauteile, und Kunststoffe zu gewinnen. Der zu recycelnden Massenstrom kann allein durch die Demontage um bis zu 50 % reduziert werden (s. Tab. 2). Zum Teil sind die Zellen gegen Vibrationen im Fahrbetrieb durch Epoxidharze und Polymerschäume fixiert. Dadurch entstehen bei der vakuumthermischen Deaktivierung der Zellen deutlich mehr organische Zersetzungsprodukte, die im nachgeschalteten Kondensator bewältigt werden müssen und entsprechende Anpassungen erfordern.

Zur Zeit entsteht eine zunehmende Bandbreite an unterschiedlichen Elektrodenmaterialien. Da Automobilbatterien jedoch deutlich andere Anforderungsprofile erfüllen müssen als die Gerätebatterien, findet auch ein Elektrodenmaterialwechsel von den Li-Ion Gerätebatterien zu den Li-Ion Automobilbatterien statt. Kurzfristig kann davon ausgegangen werden, dass im Elektrodenmaterial der Ni-, Mn-, Ti- und Eisenphosphat-Anteil steigen und der Co-Anteil sinken wird. Dementsprechend wird sich die Zusammensetzung der Elektrodenmaterial(EM)-Pellets verändern und erfordert eine Anpassung des Schlackensystems für den Lichtbogenofenprozess. Zudem hat sich bei den Recyclingversuchen der Li-Ion Gerätebatterien gezeigt, dass Li in Form von Li-Oxid sowohl in der Schlacke als auch im Flugstaub angereichert wird. Durch ein gezieltes Schlackendesign soll die Löslichkeit für Li-Oxid in der Schlacke gesenkt werden, damit das Li verstärkt im Flugstaub angereichert wird. Dafür spricht, dass der Li-reiche Flugstaub einfacher hydrometallurgisch zu verarbeiten ist, als eine feste Li-reiche Schlacke, die zuerst gebrochen und aufgemahlen werden muss.

Das Schlackendesign erfolgt in drei Schritten. Zuerst wird anhand bekannter Schlackendaten und anhand thermochemischer Berechnungen das Verhalten unterschiedlichster Schlackenzusammensetzungen für diesen Prozess modelliert. Dabei hat sich gezeigt, dass für Li und Li-Oxide als Mischphase keine thermochemischen Datensätze existieren, so dass eine Modellierung von Li in einer Schlacken- bzw. Metallphase nicht möglich ist. Somit wurden die Schlackensysteme CaO-CaF₂, CaO-SiO₂-Al₂O₃ und CaO-SiO₂-MgO gewählt die bekannte gute Eigenschaften für Ni und Co aufweisen und hat durch Modellierung 18 Schlackenzusammensetzungen gewählt, die zudem eine geringe Verschlackung von Mn aufweisen. Anschließend wurden in einem zweiten Schritt im Labormaßstab die Li-Löslichkeit bestimmt. Dazu wird eine Schlacke-Lithiumoxid-Mischung mit 10 % Li-Oxid auf 1460 °C erhitzt und für 3 h homogenisiert. Die Zugabe des Lithiumoxids erfolgte als Lithiumkarbonat (Li₂CO₃), das sich bei 1310° C zu Lithiumoxid (Li₂O)

und Kohlendioxid (CO₂) zersetzt. Nach dem Homogenisieren wird die Schlackenmischung in einem Wasserbad granuliert um den Gleichgewichtszustand bei Versuchstemperatur einzufrieren und per XRD analysiert. Wenn das Li-Oxid in der Schlacke vollständig gelöst war, ergab die XRD-Analyse ein einheitliches amorphes Band. Lediglich bei zwei Schlacken aus dem CaO-SiO₂-MgO System konnte neben dem amorphen Band noch weitere Phasen mit Li-Verbindungen detektiert werden (s. Abb.2). Die Lithiumoxid-Löslichkeit für diese Schlacken muss demnach kleiner 10 % sein. Diese beiden Schlacken werden zur Zeit im Schmelzprozess mit EM-Pellets im Labormaßstab (5 kg) erprobt. Nach Abschluss der Prozessoptimierung im Labormaßstab erfolgt ein Up-scaling des Prozesses in dem 1 MW Lichtbogenofen des zur Zeit im Aufbau befindlichen Recycling Zentrums des IME.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Artikel wurden Recyclingkonzepte für NiCd-, NiMH-, Zink-Kohle- und Alkali-Mangan-, und für Li-Ion Geräte- und Automobilbatterien vorgestellt. Einige dieser Verfahren sind bereits industriell umgesetzt und sogar als BAT Best Available Technology bewertet worden. Andere Verfahren haben gezeigt, dass sie eine bessere Alternative zum derzeitigen Stand der Technik sein können, wie z.B. im Falle des NiMH Batterien Recyclingverfahren. So wurden erst kürzlich Fördergelder für den Aufbau einer Demonstrationsanlage zum ressourceneffizienten Recycling von NiMH-Batterieschrott aus zukünftigen Hybridfahrzeugen und Consumer Anwendungen im Rahmen des Förderwettbewerbs Ressource.NRW genehmigt. Damit wird es (dem IME zusammen mit ACCUREC Recycling GmbH) in den nächsten Jahren erstmals möglich, die Validierung und Erweiterung des neu entwickelten Recyclingverfahrens unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten im industriellen Maßstab zu erproben.

6 Danksagung

An dieser Stelle gebührt unser Dank den zahlreichen Partnern für ihre Unterstützung: BMBF, DBU, BATREC Industrie AG, UVR-FIA GmbH, DAAD.

7 Literatur

- [1] *Verordnung über die Rücknahme und Entsorgung gebrauchter Batterien und Akkumulatoren* (Batterieverordnung - BattV), in der Fassung von der Bekanntmachung vom 2. Juli 2001

- [2] R. Weyhe, *Recycling von Nickel-Cadmium Batterien durch Vakuumdestillation*, Dissertationsschrift von 2002 an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der RWTH Aachen
- [3] GRS: Internetauftritt der Stiftung unter www.grs-batterien.de, Stand 25.11.2009
- [4] *Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council*, 6 September 2006
- [5] *Gesetz zur Neuregelung der abfallrechtlichen Produktverantwortung für Batterien und Akkumulatoren* (Batteriegesetz - BattG), vom 25. Juni 2009
- [6] ACCUREC Recycling GmbH, Internetauftritt des Unternehmens unter www.accurec.de, Stand 05.12.2009
- [7] T. Müller, *Entwicklung eines Recyclingprozesses für Nickel-Metallhydridbatterien*, Dissertationsschrift von 2004 an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der RWTH Aachen
- [8] Rombach, E.; Weyhe, R.; Müller, T.; Sanchez, R.; Böhlke, J.; Georgi, T.; Friedrich, B., *Altbatterien als sekundäre Rohstoffressourcen für die Metallgewinnung*, World of Metallurgy, 61. Jahrgang, Heft 3, 2008, S. 180 - 185
- [9] R.-G. Sánchez-Alvarado, *Optimierung der EAF-Schlacke bei der Herstellung von Ferromangan und Zink aus Primärbatterieschrott*, Dissertationsschrift von 2008 an der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften der RWTH Aachen
- [10] T. Georgi, *Entwicklung eines Schlackensystems zum Recycling von Lithium-Ionen-Akkumulatoren*, Diplomarbeit am IME - Institut für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen, 2005
- [11] T. Georgi, *Entwicklung eines Recyclingverfahrens für portable Li-Ion-Gerätebatterien*, BMBF-Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben 01RW0404, 2009
- [12] R. Weyhe, in *Proc. of 2nd Tech. Conf. on Advanced Battery Technologies for Automobiles and Their Electric Power Grid Integration*, Mainz, Germany, February 2010

Tab. 1: Kobalt-, Mangan, Lithium- und Kohlenstoffgehalte manganhaltiger EM-Pellets [11]

EM-Pellets	Co	Mn	Li	C
	in Mass.-%			
LM-EM*	28,3	5,0	3,3	30,5
HM-EM**	23,7	10,8	3,1	32,0

* LM: Low-Mn ** HM: High-Mn

Tab. 2: Exemplarische Zusammensetzung einer HEV Li-Ion Batterie und einer dazugehörigen Zelle [12]

Batterie		Zelle	
Zellen	50,4%	Aluminium	24,5%
Stahl	18,9%	Kupfer	19,0%
Kunststoffe	11,2%	Kobalt	3,2%
Aluminium	7,9%	Nickel	3,2%
Kupfer	3,6%	Mangan	3,2%
Elektronikbauteile	8,0%	Lithium	2,0%
		Sonstiges (Graphit, Binder, Elektrolyt, O ²)	45,0%

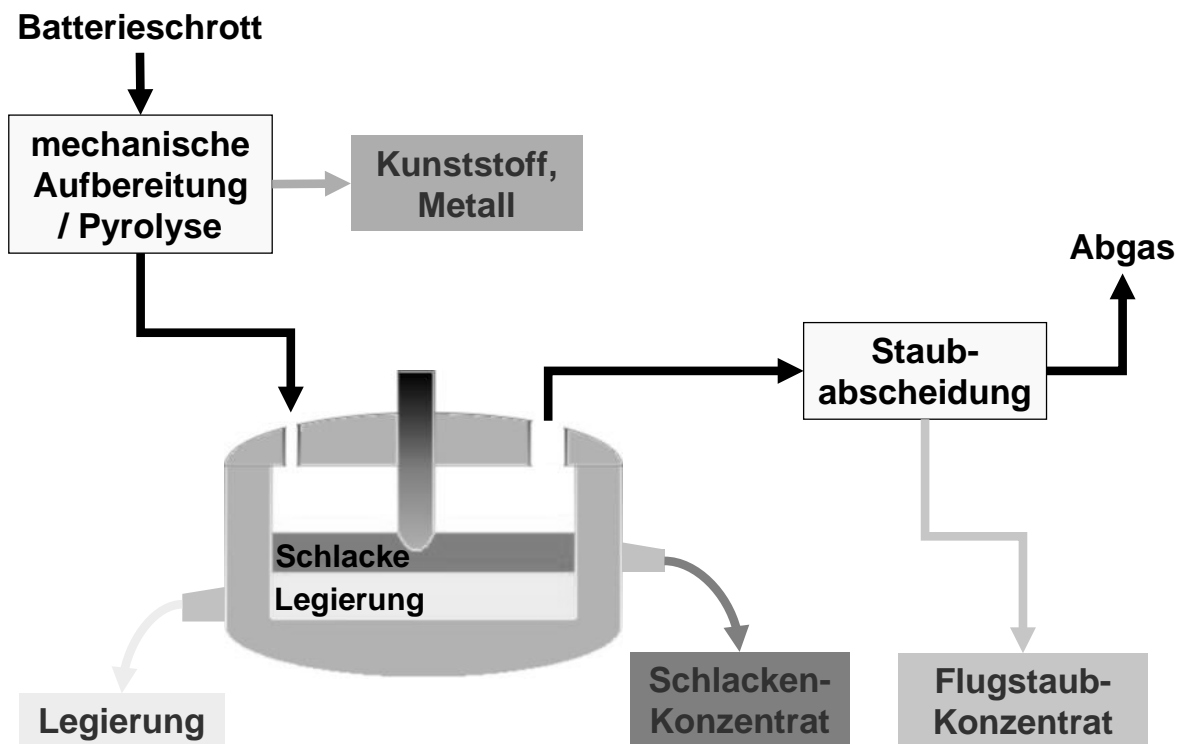
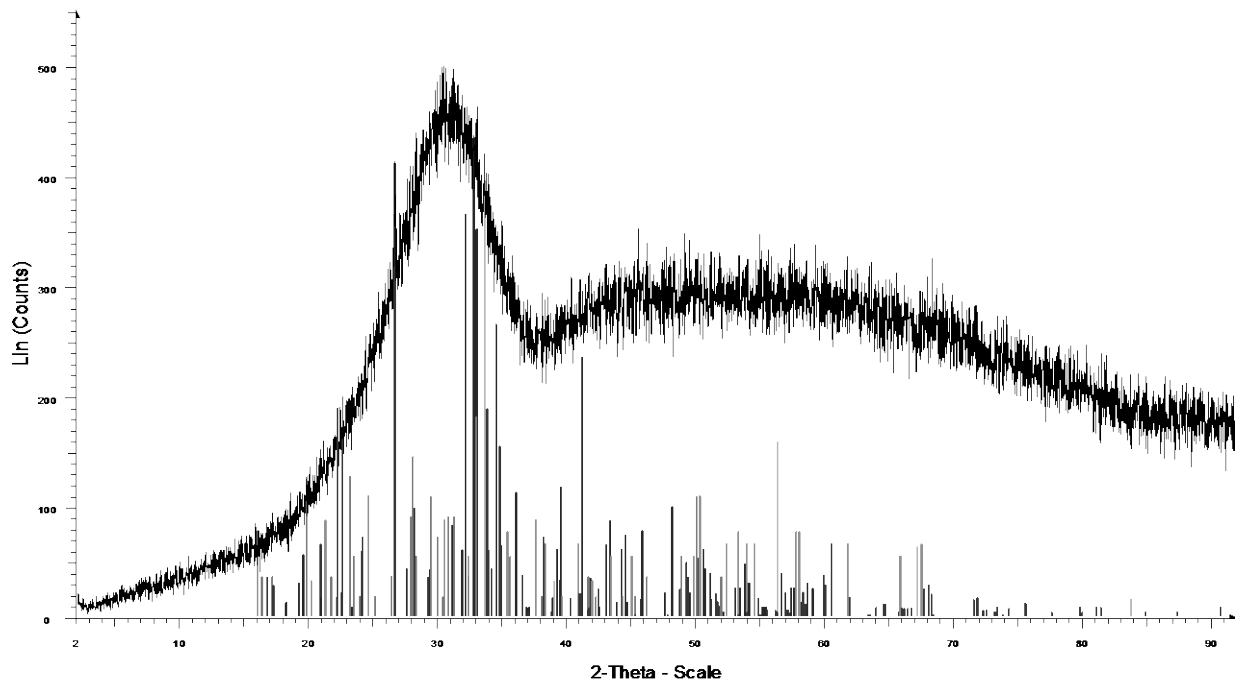


Abb. 1: Prozessschema des Elektroofen-Verfahrens



- 00-012-0254 (I) - Lithium Oxide lithia - Li_2O - Y: 79.03 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic -
- 00-037-1472 (*) - Lithium Silicate - Li_4SiO_4 - Y: 37.81 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Monoclinic -

Abb. 2: XRD-Analyse einer $\text{CaO-SiO}_2\text{-MgO}$ Schlacke mit 10 %iger Zugabe von Li-Oxid.