

Rückgewinnung von Metallen aus verbrauchten Gerätebatterien

Ausgezeichnet mit dem Kaiserpfalz-Preis der Metallurgie 2008

Rombach, E.; Weyhe, E.; Müller, T.; Sanchez, R.; Böhlke, J.; Georgi, T.; Friedrich, B. (1)

Batterien sind gegenwärtig im alltäglichen Leben nicht mehr wegzudenken. Was vor ca. 150 Jahren mit dem klassischen Leclanché-Element begann, ist bis heute zu immer kompakteren leistungsoptimierten High-End-Produkten weiterentwickelt worden, die als mobile Energiequellen in technischen Geräten wie Handys, Notebooks, Digitalkameras, MP3-Playern, Elektrowerkzeugen, Herzschrittmachern usw. ihre Anwendung finden. Als Vertreter der nichtwiederaufladbaren Batterien, sog. Primärbatterien, sind in erster Linie die herkömmlichen Zink-Kohle- oder Alkali-Mangan-Batterien zu nennen, bei den wiederaufladbaren Batterien, sog. Sekundärbatterien oder Akkumulatoren, sind dies vor allem die Nickel-Cadmium-, die Nickel-Metallhydrid sowie die Lithium-Ionen-Batterien. Letztere beide Batterietypen haben bereits im Automobilmarkt Einzug gefunden, wo sie für Traktionsanwendungen in Automobilen mit Hybridantrieben eingesetzt werden.

Die Vielzahl an verfügbaren Batterietypen ist begründet durch die unterschiedlichen chemischen Systeme, die für die energieliefernden Reaktionen verantwortlich sind. Eine Gemeinsamkeit aller Batterien sind jedoch die hohen Metallgehalte, denn ohne Zink, Mangan, Silber, Eisen, Aluminium, Blei, Kupfer, Nickel, Kobalt, Lithium usw. funktioniert keine Batterie. Das hat

zur Folge, dass verbrauchte Batterien (Altbatterien, vgl. Bild 1) wichtige sekundäre Rohstoffressourcen mit hohen Gehalten an Wertmetallen darstellen, die im Sinne des Umweltschutzes und der Nachhaltigkeit in geeigneten Verfahren mit maximalen Metallausbeuten recycelt werden müssen. Die Gesetzgebung schreibt die gesonderte Sammlung von Altbatterien sowie das Recycling seit 1991 durch eine EU-weite Batterierichtlinie vor, welche

die einzelnen EU-Mitgliedstaaten national umsetzen.

Problemstellung und Zielsetzung

Der weltweite Batterieverbrauch steigt seit über zehn Jahren u. a. aufgrund der enorm schnellen Entwicklungen in den Bereichen der Unterhaltungs- und Kommunikationselektronik

rasant an. Aus dem Bereich der Gerätebatterien werden in Europa derzeit über 4,5 Mrd. Stück verbraucht, was einer Menge von etwa 180.000 t/a entspricht. Weltweit ist von nahezu 50 Mrd. Stück (ca. 2 Mio. t/a) auszugehen – noch zur Jahrtausendwende lag dieser Wert bei etwa 30 Mrd. Stück. Diese Entwicklung ist in Bild 2 am Beispiel der Sekundärbatterien dargestellt.

Die stetig steigenden Absatzmengen führen konsequenterweise auch zu erhöhten Rücklaufmengen. Dem Nutzen, den die Vielzahl der Batterien während ihrer Gebrauchsphase hervorbringt, steht jedoch eine Reihe von Problemen nach ihrem Gebrauch gegenüber. Aufgrund der hohen Metallinhalte gelten sie europaweit als komplexe Problemabfälle, die einerseits relevante Umweltbelastungen bei Ablagerung und Verwertung verursachen können, andererseits jedoch wertvolle sekundäre Rohstoffressourcen darstellen. Die unterschiedlichen Batteriesysteme erfordern aber angepasste Recyclingkonzepte, um bestmögliche Ausbeuten bzw. Recyclingeffizienzen gewährleisten zu können.

Das Batterierecycling steht seit einer Dekade im Fokus der deut-



Batterietyp	Wichtigste Metallgehalte in Massen-%
Nickel-Cadmium	Fe (40 - 45), Ni (18 - 22), Cd (16 - 18)
Nickel-Metallhydrid	Ni (36 - 42), Fe (22 - 25), Seltene Erden (8 - 10), Co (3 - 4)
Zink-Kohle Alkali-Mangan	Zn (15 - 30), Fe (15 - 30), Mn (10 - 25)
Lithium-Ionen	Co + Mn (15 - 20), Li (2 - 3), Cu (~7), Al (~5)

Bild 1: Altbatterien als wichtige sekundäre Rohstoffressourcen

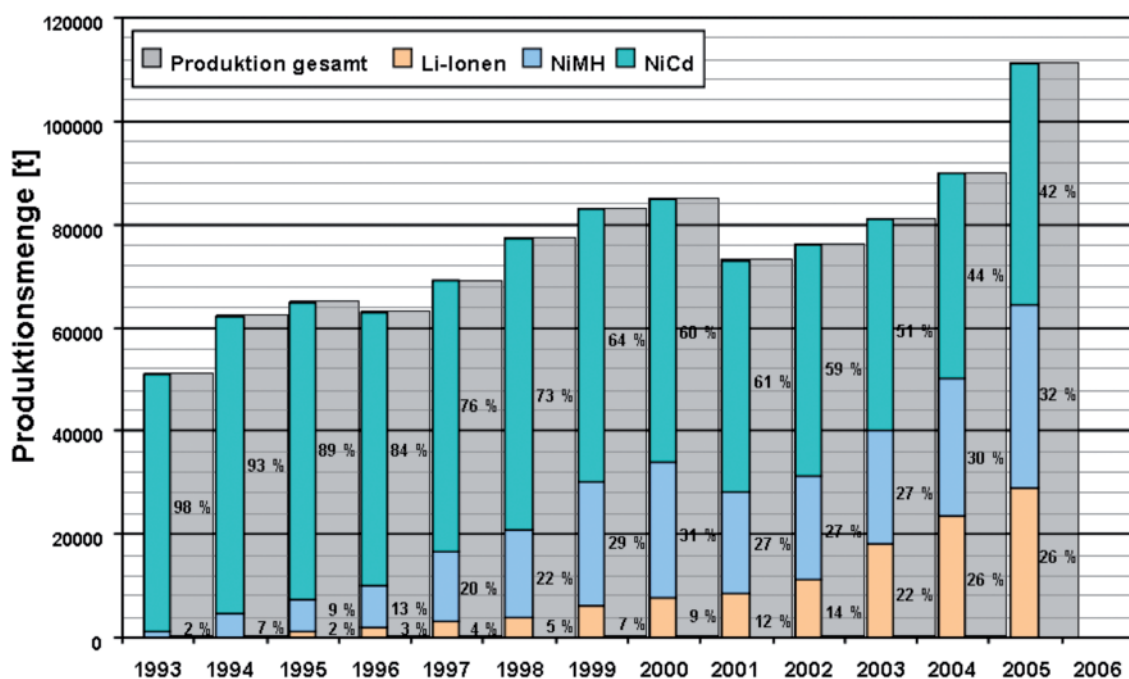


Bild 2: Zeitliche Entwicklung der weltweiten Produktionsmengen für Sekundärbatterien (mengenbezogene Marktanteile der verschiedenen Batterietypen in %)

schen und europäischen Umweltpolitik. In Deutschland wurde mit Inkrafttreten der Batterieverordnung (BattV vom 27.03.1998) das Prinzip der Produktverantwortung, d. h. der verantwortungsvolle Umgang durch den Endverbraucher sowie die Batterierücknahme durch Hersteller und Vertreiber zur Verwertung nach den Maßgaben des Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG vom 27.09.1994), bereits früh forciert. Dadurch ist bereits heute die ordnungsgemäße und schadlose Verwertung bzw. gemeinwohlverträgliche Beseitigung von Altbatterien sichergestellt. Diese Vorgaben wurden kürzlich auf EU-Ebene durch die neue Batterierichtlinie (RL 2006/66/EG vom 26.09.2006) zahlenmäßig konkretisiert und deutlich verschärft: Neben der Forderung, Gerätebatterien verstärkt zu sammeln (definierte Sammelquoten) und primär stofflich zu verwerten, werden in Artikel 19 Mindestwerte für Recyclingeffizienzen explizit festgelegt. Mit Inkrafttreten dieser Richtlinie im Oktober diesen Jahres wird somit der Grundstein

für ein nachhaltiges Batterierecycling europaweit zementiert. Infolgedessen ist die Industrie und insbesondere die Metallindustrie in einem hohen Maße gefordert, ihren Beitrag zur „Vorsorge zum Schutz des Wohls der Allgemeinheit“ zu liefern.

Das IME hat sich seit 2000 zum Ziel gesetzt, für alle gängigen Batteriesysteme ein optimales Verwertungskonzept zu entwickeln und wenn möglich nach einer einzigen flexiblen Methode pyrometallurgisch aufzuarbeiten. Dies ist auch gelungen. Allein für die cadmiumhaltigen Batterietypen muss aufgrund der besonderen Umweltbelastung durch Cadmium ein anderes Aggregat gewählt werden. Die metallurgische Herausforderung besteht darin, für alle anderen Batterietypen das Recycling in demselben Aggregat zu ermöglichen, was unterschiedliche Prozessführungen und umfangreiche Schlackenentwicklungen für jeden einzelnen Batterietyp erfordert. Als weitere Zielsetzung ist die Erfüllung der immer restriktiver werdenden gesetzlichen Vorgaben zu nennen, die für jeden Batterietyp bestimmte Mindestrecyclingeffizienzen vorschreiben.

Entwicklung von Batterie-recyclingverfahren am IME

Seit 2000 stellt das Batterierecycling einen thematischen Forschungsschwerpunkt am IME dar, für den unter Leitung von Frau Dr. Rombach eine eigenständige Arbeitsgruppe eingerichtet wurde. Einen chronologischen Überblick über die am IME entwickelten Recyclingverfahren ergänzt durch zukünftige Forschungsambitionen gibt Bild 3.

Angetrieben durch die umweltbelastende Cadmiumproblematik sowie die verschärften gesetzlichen Rahmenbedingungen bzgl. der Aufarbeitung cadmiumhaltiger Batterien ist von 2000 bis 2002 ein Recyclingverfahren für Nickel-Cadmium-Batterien entwickelt worden, welches bei der Firma ACCUREC Recycling GmbH heute industriell angewendet wird. Neben einer Marktbetrachtung zur Anwendungsbreite dieses Batterietyps wurde das Verbraucherverhalten untersucht, auch um eine tragbare Aussage über ein Abfallstromszenario als wirtschaftliche Basis der Entwicklung zu erhalten. Eine Analyse der verfügbaren Verhüttungsmethoden und ihrer



Bild 3: Entwicklung von Batterierecyclingverfahren am IME ab 2000

wesentlichen Nachteile führte zur Konzipierung eines emissions- und energieminierten, hermetischen Vakuumdestillationsverfahrens. Nach thermodynamischer Modellierung und ingenieurtechnischer Auslegung eines Kaltwand-Vakuuminduktionsofens mit angeschlossenem Metaldampf-kondensator erfolgte der grundsätzliche Verfahrensnachweis im halbbetrieblichen Maßstab. Die Ergebnisse flos-

sen anschließend in die Entwicklung einer metallurgischen Pilotanlage im Produktionsmaßstab (bis 500 kg) mit ein. Während der halbjährigen Versuchsphase konnten die Verfahrenstauglichkeit untermauert sowie Verfahrensgrenzen aufgezeigt werden. Notwendige Verbesserungsvorschläge konnten durch eine thermodynamische Nachbetrachtung der experimentellen Ergebnisse erfolgen. Nach

Umsetzung der Maßnahmen konnte die vakuummetallurgische Behandlungstechnik ihren wirtschaftlichen Betrieb aufnehmen. Mit der konsequenten Beibehaltung der Entwicklungsvorgaben minimierter Emissionen und maximierten Arbeitsschutzes konnte so eine innovative Technologie zur Verfügung gestellt werden. Dieses Recyclingverfahren wird heute als BAT (Best Available Technology)



für Haushaltsbatterien definiert und verhalf dem Unternehmen ACCUREC Recycling GmbH in Mülheim a. d. R. nach mehrfacher Erweiterung zum Marktdurchbruch.

Da die Nickel-Metallhydrid-Batterie die Nickel-Cadmium-Batterie mehr und mehr ersetzt hat, wurde ab 2001 mit der Entwicklung eines Recyclingverfahrens für diesen Batterietyp begonnen und in 2004 erfolgreich abgeschlossen. Konventionell werden Nickel-Metallhydrid-Batterien derzeit als preiswerte Nickelquelle in der Stahlindustrie eingesetzt. Verbrauchte Nickel-Metallhydrid-Batterien enthalten jedoch neben Nickel auch Kobalt und Seltenerdmetalle (SE) auf Basis von Lanthan, Cer, Praseodym und Neodym, die vom Stahlhersteller nicht bezahlt werden bzw. bei der Stahlherstellung in der Schlacke für eine Wiedergewinnung verloren gehen. Beim vom IME entwickelten Prozess werden nach der mechanischen Aufbereitung der Batteriemasse eine Nickel-Kobalt-Legierung sowie ein seltenerdoxidhaltiges Schlackenkonzentrat hergestellt. Entscheidend in der Prozessentwicklung ist die Auswahl eines geeigneten Schlackensystems. Hierzu sind in Labor- und Technikumsversuchen oxidische und halogene Schlackensysteme untersucht worden. In Pilotversuchen wurden beide Schlackensysteme validiert und die nahezu vollständige Separation von Nickel bzw. Kobalt in das Metall sowie der Seltenen Erden als Oxid in die Schlacke nachgewiesen. Im Rahmen des Aachener Gründerwettbewerbs 2004 wurde ein Businessplan erstellt, der mit dem dritten Platz prämiert wurde. Dabei wurde in einer Szenarioberechnung die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens für einen Modellfall nachgewiesen. Dieser Nachweis soll ab 2008 auch experimentell im industriellen Maßstab bestätigt werden.

Das in 2004 begonnene Projekt zur Entwicklung eines Recyclingverfahrens für Primärbatterien (Zink-Kohle/Alkali-Mangan) wurde 2007 erfolgreich abgeschlossen. Um die unzufriedenstellende Manganausbeute im Zuge der gängigen Ferromangan-Produktion aus verbrauch-

ten Primärbatterien zu erhöhen, wurden Metall-Schlacke-Gleichgewichtsuntersuchungen durchgeführt. Anschließend wurde die Erzeugung einer Eisen-Mangan-Legierung und eines Zinkoxid-Konzentrates aus pyrolysiertem Primärbatterieschrott untersucht. Durch karbothermische Reduktion im Lichtbogenofen konnte die prinzipielle Machbarkeit anhand von drei verschiedenen Schlacken-zusammensetzungen nachgewiesen werden. Bei den Lichtbogenofenversuchen kamen Chargiermethoden wie Hohlelektrodenteknik und Vibrations-Feeder sowie moderne Ein-/Aufblastekniken zum Einsatz. Parallel wurde der Prozess mittels thermochemischer Berechnungen theoretisch modelliert. Die Ergebnisse zeigen, dass eine hochwertige Eisen-Mangan-Legierung ($Mn/Fe > 1$) und ein Zinkoxid-Konzentrat als getrennte Recyclingprodukte gewonnen werden können. Basierend auf diesen Forschungsergebnissen hat die Batrec Industrie AG (Wimmis, Schweiz) einen Lichtbogenofen installiert, in welchem sie ab Mitte 2008 das Recycling entsprechend des IME-Prozesses aufnimmt.

Seit 2005 wird an einem Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien geforscht. Dieses Projekt steht kurz vor seinem erfolgreichen Abschluss. Das Verfahren kombiniert verschiedene Aufbereitungstechniken sowie die Vorteile der Pyro- und Hydrometallurgie. Im Unterschied zu den bisherigen pyrometallurgischen Recyclingverfahren sollen die Batterien vor dem Einschmelzen zerkleinert und die einzelnen Komponenten so voneinander getrennt werden, dass trotz der pyrometallurgischen Behandlung die Wiedergewinnung der unedlen Komponenten möglich ist. So fallen bereits vor dem Einschmelzen eine sehr reine Aluminiumfraktion sowie eine hochwertige Eisen-Nickel-Fraktion an. Hauptrecyclingprodukte sollen eine im Elektrolichtbogenofen erschmolzene Kobalt-Mangan-Legierung sowie ein Lithium-Konzentrat (Schlacken und Flugstaub) sein. Für den Prozess ist eine Schlacke notwendig, die einerseits eine geringe Aufnahmekapazität für Kobalt und Man-

gan aufweist und andererseits eine hohe Aufnahmekapazität für Lithium. Mittels umfangreicher Metall-Schlacke-Gleichgewichtsuntersuchungen wurde ein geeignetes Schlackensystem gefunden. Die im Lichtbogenofen erzeugte Kobalt-Mangan-Legierung kann als Vorlegierung für Superlegierungen auf Kobaltbasis verwendet werden. Das Lithium-Konzentrat wird hydrometallurgisch aufbereitet, um ein hochreines Lithiumkarbonat zu gewinnen, wofür sich bereits die Glasindustrie interessiert.

Batteriesystemübergreifend wurde für Europa ein Beitrag zur Entwicklung einer Arbeitsformel für Recyclingeffizienzen (gemäß RL 2006/66/EG) erarbeitet. Die auf EU-Ebene festgelegten Grenzwerte für Recyclingeffizienzen sind bis dato noch nicht definiert und bieten daher zahlreiche Interpretationsmöglichkeiten für eine Berechnungsmethodik an. Da die Recyclingeffizienz das Ergebnis von Stoffstromberechnungen und damit von Massenbilanzen darstellt, sind deren Systemgrenzen klar zu definieren. Die Komplexität derartiger Systeme wurde, angestoßen durch die Vorschläge des IME, intensiv in die öffentliche Diskussion eingebracht und zu einem Vorschlag verwertet.

Bedeutung der wissenschaftlichen Arbeit in der praktischen Umsetzung und Anwendernutzen

Es ist bereits jetzt absehbar, dass die gesetzlich festgelegten Recyclingeffizienzen der verschiedenen Batterien nur durch eine Wiedergewinnung von deutlich mehr als 85 % des jeweiligen Hauptmetallinhaltes und damit einer deutlich verbesserten Metallausbeute sicher einzuhalten sein dürften. Um Recyclingprozesse zukünftig dauerhaft ökonomisch betreiben zu können, müssen ferner die dabei erzeugten Produkte hohen Anforderungen, z. B. hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung oder Konsistenz, standhalten. Durch die hier vorgestellten systemspezifischen neuartigen Kombinationen aus Aufbereitungstechnik und angepasster Ofenarbeit in pyrometallurgischen

Direktschmelzprozessen wird es möglich, die in den jeweiligen Batterieschrotten enthaltenen Metalle unter Ausnutzung der Kohlenstoffinhalte mit erhöhten Ausbeuten unmittelbar bei höchster durchweg metallischer Produktqualität zu recyceln. Hierbei werden die übrigen Batteriebestandteile größtenteils harmlos verbrannt oder im Rahmen des Gesamtprozesses anderweitig genutzt (Reduktionsmittel, Schlackenzusatz). Neben einer optimierten Recyclingeffizienz ergibt sich infolge einer Verbesserung von prozentualen Gewinn-/Verlustanteilen so auch eine deutliche Abfallentlastung. Jeder Metallanteil, der beim Batterierecycling verschlackt oder verstaubt wird, stellt einen echten Verlust dieser teilweise energieintensiven Import(legierungs-)metalle dar. Bei Einsatz der vorgeschlagenen Direktverfahren kann – im Vergleich zur derzeitigen europaweiten Recyclingpraxis – der in die Batterieproduktion rezirkulierte Metallanteil auf bis zu 60 % gesteigert und damit eine bessere Ressourcenschonung erreicht werden. Die anfallenden Schlacken erstarren komplett aus dem schmelzflüssigen Zustand; ihre Umweltrelevanz ist im Gegensatz zu anderen Verfahrensvarianten als unkritisch einzustufen.

In den vorgeschlagenen einstufig arbeitenden, abgasarmen metallurgischen Ofenaggregaten werden mit erhöhten Metallausbeuten zumeist direkt Endprodukte erzeugt. Eine Wertmetallverzettelung verbunden mit einer Erzeugung neuer Abfälle und Emissionen findet nicht mehr statt. Durch diese Prozesskettenverkürzung entstehen einerseits weniger Prozessabgase, die effektiver gereinigt werden können; es entfallen andererseits auch außerbetriebliche Transporte und damit verbundene Emissionen. Energieeinsparungseffekte werden allein dadurch evident. Hauptsächlich bedingt durch mehrstufige Prozessarbeit und/oder verminderte Wertmetallausbeuten ist es zweifelhaft, ob derzeit ökologisch/ökonomische Verfahren existieren, mit denen die jeweils geforderten Recyclingraten sicher einzuhalten sind. In den vorgeschlagenen Direktverfahren

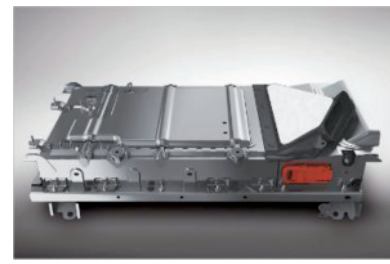


Bild 4: Moderne Hybridantriebstechnik in Automobilen
(links – Einbau, rechts – Batterie)

mit erhöhten Metallausbeuten werden anstelle von teils umweltrelevanten Zwischen- oder minderwertigen Endprodukten durch einstufige umweltfreundliche Lichtbogenofen- bzw. Vakuumofentechnologie metallische und damit qualitativ hochwertige Sekundärprodukte mit gleichen Eigenschaften wie die entsprechenden Primärprodukte emissionsarm erzeugt. Insbesondere die Kopplung dieser direkten Metall(Legierungs-)gewinnung mit dem Ausbringen weiterer hochwertiger und damit marktfähiger Nichtmetallprodukte stellt eine innovative technische Herausforderung dar, die jedoch der Umwelt und der Umweltgesetzgebung deutlich besser als bisher gerecht wird. Infolge der durch die gesetzlich europaweit verschärften Rahmenbedingungen müssen in nächster Zukunft geeignete Recyclingzentren geschaffen werden, in denen die entsprechenden Forderungen sicher und ökologisch/ökonomisch sinnvoll umzusetzen sind. Die prinzipielle Eignung der vorgeschlagenen Lösungswege wurde bereits vielversprechend teils bis zum Industriemaßstab getestet. Die bei der weiteren Umsetzung der Verfahrensvorschläge gesammelten Erfahrungen und das technische Know-how könnten von Deutschland aus exportiert werden. Der durch die Umweltpolitik hervorgerufenen gesteigerten Nachfrage an geeigneten Lösungswegen zur Realisierung und Berechnung der Recyclingeffizienz kann damit verstärkt Rechnung getragen werden. Deutschland kann einer Art Vorreiterrolle übernehmen. Das breite öffentliche Interesse an den am IME durchgeführten Arbeiten zum Batterierecycling lässt sich neben den Dissertationen durch zahlreiche Publikationen,

Vorträge, Interviews und Reportagen der letzten Jahre eindrucksvoll dokumentieren (vgl. Anhang).

Verwendung des Preisgeldes – Ausdehnung der Forschungsarbeiten auf das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien für Hybridantriebe in Automobilen

Der Einsatz der Lithium-Ionen-Batterietechnologie in Automobil-Hybridantrieben (HEV – Hybride Electric Vehicle) soll innerhalb der nächsten zwei Jahre erfolgen und die bis dahin verwendeten Nickel-Metallhydrid-Batterien ersetzen (vgl. Bild 4). Zurzeit werden neue Lithium-Ionen-Batteriesysteme entwickelt, die für diese Anwendung geeignet sind.

Die zukünftigen Systeme stellen das Batterierecycling wieder vor neue Herausforderungen. Erstmalig ist am IME geplant, zeitgleich mit der Batteriesystementwicklung ein geeignetes Recyclingkonzept zu entwickeln, um die Idee eines ganzheitlichen Batteriemanagement-Konzeptes von der Entwicklung über die Anwendung bis hin zum Recycling von Anfang an zu verwirklichen. Hierzu soll einem Jungingenieur mit Hilfe des Preisgeldes eine auf zwei Jahre befristete Forschungsstelle mit der Möglichkeit zur Promotion angeboten werden (2 x 25.000 EUR/a). Mit der Sicherstellung des Recyclings zukünftiger Hybridantriebsbatterien und der damit verbundenen weiteren Etablierung der Hybridantriebstechnologie in Automobilen will das IME seinen aktiven Beitrag gegen die globale Erderwärmung und für den Klimaschutz leisten.



Profile der verantwortlichen Nachwuchsforscherin und des Forschungsinstituts

Die Teamleiterin Frau Dr.-Ing. Elinor Rombach (geb. 1964) studierte Metallhüttenkunde an der RWTH Aachen bis 1992, wurde 1997 am Institut für Metallhüttenwesen und Elektrometallurgie promoviert (Prof. Dr.-Ing. J. Krüger) und ist seitdem als Post-Doc am IME beschäftigt. Während ihrer wissenschaftlichen Tätigkeit arbeitet sie in Forschung und Lehre in den Bereichen Galvanotechnik, Stoffstrommanagement/Ökobilanzierung, Abfallverwertung und Umweltschutz. Darüber hinaus wirkt sie seit 1997 ehrenamtlich als aktives Mitglied in Ausschüssen und Gremien des VDI (Richtlinienerstellung für die Metallindustrie), der GDMB (Metallurgische Seminare zur Berufsbildung) und des HDT (Fortbildungsseminare im Bereich Umweltschutz) mit. Seit 2000 ist sie Lehrbeauftragte für „Umweltschutz beim Metallrecycling“ an der RWTH Aachen.

Das IME in Aachen vertritt die metallurgische Prozesstechnik und das Metallrecycling in Forschung und Lehre an der RWTH Aachen. Kernziele sind die Entwicklung nachhaltig umweltschonender und kosteneffizienter Verfahren zur Herstellung metallischer Werkstoffe. Ausgehend von der Georessource „Erz“ oder der Konsumressource „Schrott“ werden moderne Funktionswerkstoffe bereitgestellt. Seit der Übernahme der Institutsleitung durch Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich (vormals GfE und VARTA) im Jahr 1999 verfolgt das IME das Ziel, neu entwickelte Verfahren ausgehend von anwendungsorientierten Grundlagenarbeiten experimentell bis in den technischen Maßstab zu erproben. Diese industriennahe Entwicklung erfolgt immer unter Einbeziehung der Wirtschaftlichkeit.

Literatur

Öffentlichkeitsarbeit und Publikationsliste des IME im Bereich des Batterierecyclings

[1] Weyhe, R.: „Recycling von Nickel-Cad-

- mium-Batterien durch Vakuumdestillation“; Dissertation; IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; Aachen; 2002
- [2] Weyhe, R.; Friedrich, B.: „Vacuum-thermal Recycling of used Nickel-Cadmium Batteries“; EMC – European Metallurgical Conference 2001; 18.-21. September; Friedrichshafen; Deutschland
- [3] Weyhe, R.; Friedrich, B.: „Vakuumthermisches Recycling von Ni-Cd-Akkumulatoren“; Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“ 2001; 15. November; Freiberg; Deutschland
- [4] Müller, T.; Friedrich, B.: „Closed Loop Recycling von Nickel, Kobalt und Seltenen Erden aus Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren“; Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“ 2001; 15. November; Freiberg; Deutschland
- [5] Weyhe, R.; Friedrich, B.; Müller, T.; Heegn, H.: „Feasibility of a new Closed Loop Recycling Concept for Nickel-Metallhydride Batteries“; ICBP – International Congress for Battery Recycling 2002; 3.-5. Juli; Wien; Österreich
- [6] Müller, T.; Friedrich, B.: „A new Metallurgical Process for Recycling of Discharged Nickel-Metallhydride-Batteries“; TMS Fall 2002 EPD Meeting on Recycling and Waste Treatment in Mineral and Metal Processing; 16.-20. Juni; Lulea; Schweden; Bd. 2; S. 25-36
- [7] Heegn, H. P.; Friedrich, B.; Müller, T.; Weyhe, R.: „Closed-loop Recycling of Nickel, Cobalt and Rare Earth Metals from spent Nickel-Metallhydride Batteries“; XXII International Mineral Processing Congress 2003; 28. September - 03. Oktober; Kapstadt, Südafrika
- [8] Müller, T.; Friedrich, B.: „Development of a new Metallurgical Process for Closed-Loop Recycling of Discarded Nickel-Metallhydride-Batteries“; EMC – European Metallurgical Conference 2003; 16.-19. September; Hannover; Deutschland
- [9] Müller, T.; Friedrich, B.: „Keynote Address: Development of a CaO-CaF₂ slag system for high rare earth contents“; VII International Conference on molten slags, fluxes & salts 2004; 25.-28. Januar; Kapstadt; Südafrika
- [10] Friedrich, B.; Klammer, H.; Sanchez, R.: „Ferromanganese Production from spent primary batteries – Feasibility of an EAF process“; ICBP – International Congress for Battery Recycling 2004; 02.-04. Juni; Como; Italien
- [11] Müller, T.: „Entwicklung eines Recyclingprozesses für Nickel-Metallhydridbatterien“; Dissertation; IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; Aachen; 2004
- [12] Sanchez, R.; Friedrich, B.: „Primärbatterien besser recyceln“; Recycling Magazin; Jg. 60 (2005); Nr. 23; S. 18-19
- [13] Sanchez, R.; Friedrich, B.: „High Grade FeMn from Spent Primary Batteries“; EMC – European Metallurgical Conference 2005; Dresden; Deutschland
- [14] Müller, T.; Friedrich, B.: „Development of a Recycling Process for Nickel-Metal Hydride Batteries“; Journal of Power Sources; Bd. 158 (2006), S. 1498-1509
- [15] Rombach, E.; Friedrich, B.; Berger, M.: „Recycling Efficiency of the Reprocessing of Primary Batteries“; ICBP – International Congress for Battery Recycling 2006; 29. Juni; Interlaken; Schweiz
- [16] Rombach, E.; Friedrich, B.: „Recyclingeffizienz – Stand der Technik am Beispiel von Primärbatterien“; Vortragsveranstaltung „Die neue Batterierichtlinie – Herausforderung für Hersteller und GRS Batterien“; GRS Forum; 10. Oktober 2006; Berlin; Deutschland; im Internet erhältlich unter <http://www.segmenta.de/forum2006>
- [17] Sanchez, R.; Friedrich, B.: „Optimization of the Ferromanganese Production from Spent Primary Batteries-Design of the Process Slag“; World of Metallurgy – ERZMETALL; Bd. 60 (2007); Nr. 1; S. 7-14
- [18] Georgi, T.; Friedrich, B.: „Investigation of a Slag System for a Li-Ion Battery Recycling Process in the EAF“; EMC – European Metallurgical Conference 2007; 11.-14. Juni; Düsseldorf; Deutschland
- [19] Rombach, E.; Friedrich, B.: „The Complexity of Defining Recycling Efficiencies in Primary Battery Recycling Processes“; EMC – European Metallurgical Conference 2007; 11.-14. Juni; Düsseldorf; Deutschland
- [20] Friedrich, B.; Georgi, T.; Ridderbusch, M.: „Development of a Calculation Method for Recycling Efficiencies of Battery Recycling Processes“; ICBP – International Congress for Battery Recycling 2007; 20.-22. Juni; Budapest; Ungarn
- [21] Sanchez, R.: „Optimierung der EAF-Schlacke bei der Herstellung von Ferromangan und Zink aus Primärbatterieschrott“; Dissertation; IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen; Aachen; in Vorbereitung
- Diverse Interviews für Beiträge/Reportagen in der Süddeutschen Zeitung sowie beim Westdeutschen Rundfunk (2007).

(1) *IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen, Intzestraße 3, 52072 Aachen*