

IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen

Allgemeines

Das IME in Aachen vertritt die metallurgische Prozesstechnik und das Metallrecycling in Forschung und Lehre an der RWTH Aachen. Kernkompetenzen sind eine praxisbezogene Ausbildung von Prozessingenieuren und die Entwicklung nachhaltig umweltschonender und kosteneffizienter Verfahren zur Herstellung und zum Recycling metallischer Werkstoffe. Das IME (**Bild 1**) ist eines der „Ur-Institute“ der RWTH Aachen und feierte 1998 seinen 100. Geburtstag. Eingebunden ist es in die Fachgruppe für Metallurgie und Werkstofftechnik (MuW) der Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Geowissenschaften. Damit ergibt sich ein idealer Rahmen, um bei der Optimierung weltweit vernetzter Prozessketten mitzuwirken. Ausgehend von der Georessource „Erz“ oder der Konsumressource „Schrott“ werden moderne Funktionswerkstoffe bereitgestellt. Insbesondere seit der Übernahme der Institutsleitung durch Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich (vormals GfE/Metallurg und Varta) im Jahr 1999 rückt die Prozesstechnik zur Entwicklung und Optimierung von Verfahren für komplexe Hochleistungsmetalle in den Vordergrund. Hierbei verfolgt das IME das Ziel, neu entwickelte Verfahren ausgehend von anwendungsorientierten Grundlagenarbeiten experimentell bis in

den technischen Maßstab zu erproben. Diese industrienähe Entwicklung erfolgt immer unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist die Sicherstellung einer präzisen Analytik, ein Know-how, das auch Kunden als Service angeboten wird.

Die meisten der Projekte werden in enger Kooperation oder im direkten Auftrag mit Partnern der Industrie bearbeitet. Zu allen Arbeitsfeldern bietet das Institut über die Forschungs- und Entwicklungstätigkeit hinaus Beratung und Dienstleistungen für Unternehmen und Behörden an. Die Beratung dient z. B. der Bewertung von Prozessänderungen unter besonderer Berücksichtigung der Umweltaspekte. Zu den Dienstleistungen gehören u. a. internationale Schrifttumsrecherchen zur Darstellung des Standes der Technik, die Bestimmung von Stoffdaten schmelzflüssiger Phasen, oder auch die Bereitstellung einer aktuellen institutseigenen Bibliothek mit über 20 000 Büchern und Zeitschriften für Besucher. Das IME verfügt über vielfältige, langjährige Kontakte zu europäischen universitären Forschungseinrichtungen, von denen exemplarisch TU Delft/ Niederlande, Lulea University of Technology/Schweden, Jagiellonian University Krakau/Polen, University of Belgrad/Serbien und Montenegro, Tech-

nical University of Kosice/Slowakei, MISIS Moskau/Russland, University of Pretoria/Südafrika oder auch Suncheon National University/Südkorea zu nennen sind. Aufgrund der nationalen und internationalen Anerkennung decken die Projekte die gesamte Spannweite der Metallurgie und Metallverarbeitung ab, wobei die Sektoren Leichtmetalle und hochschmelzende Metalle besondere Schwerpunkte bilden.

Alle Aktivitäten werden maßgeblich unterstützt und gefördert durch den Verein zur Förderung des Instituts für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling „Freunde des IME e.V.“. Das Hauptanliegen des Fördervereins ist es, die schwierige Nachwuchssituation durch Imagearbeit und Förderpreise zu verbessern und die Ausbildungsmöglichkeiten durch Bereitstellung innovativer Anlagentechnik zu modernisieren. Dies geschieht mit Hilfe von Mitgliedsbeiträgen und zweckgebundenen Spenden. Zu den Mitgliedern zählen Unternehmen wie auch über 100 dem Institut eng verbundene Personen. Alljährlich bietet der Verein allen Freunden und Ehemaligen des Instituts eine Plattform zum Austausch gemeinsamer Erinnerungen sowie Informationen über aktuelle Entwicklungen (www.ime-verein.de).

Neben dem Institutsleiter und dem Oberingenieur Dr.-Ing. Reinhard Fuchs (vormals Mannesmann Demag) beschäftigt das Institut auf über 2000 m² Fläche im Herzen von Aachen derzeit über 20 wissenschaftliche Mitarbeiter sowie 20 Mitarbeiter im technischen und Verwaltungsdienst. Darüber hinaus bildet das IME 9 Auszubildende zu Industriemechanikern, Chemie- und Physikalaboranten sowie Kauffrauen für Bürokommunikation aus. Mit besonderer Freude verzeichnen wir ein stark zunehmendes Interesse ausländischer Ingenieure, am IME zu forschen und zu promovieren. Im Jahre 2003 werden uns dadurch Gastwissenschaftler aus Ägypten, Serbien/Montenegro, Kirgistan, der Mongolei, Russland, der Türkei, der Slowakei, Japan, Kolumbien, Mexiko und China unterstützen. 20 % der Mitarbeiter werden



Bild 1:
Das Institutsgebäude in der Intze-
straße in Aachen

über Landesmittel finanziert, einem Budget, dem leider kurzfristig erneut eine Kürzung bevorsteht, 80 % der Mitarbeiter werden aus Drittmitteln bezahlt, die vom Land NRW, vom Bund, von der Europäischen Union und sonstigen Förderinstitutionen wie z. B. BMBF, AiF, DFG, GTZ und natürlich zu einem großen Teil direkt aus der Industrie kommen.

Lehrangebot

Der sich in den vergangenen Jahren vollzogene Strukturwandel in der Metallindustrie hat gravierende Auswirkungen auch auf die Ingenieurqualifikation. Insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) fordern verstärkt fächerübergreifende Fähigkeiten. Folglich ist ein Ingenieur auszubilden, der in der Lage ist, durch Kombination von Metallurgie, Anlagenbau und Informatik, die Entwicklung leistungsfähiger Metalle voranzutreiben und somit Innovationen zu ermöglichen. Das praxisnahe gestaltete Studium der Nichteisenmetallurgie entspricht diesen Anforderungen. Dabei wird auf die Befähigung sowohl zur Entwicklung von Verfahren zur Herstellung innovativer metallischer Werkstoffe, als auch zu deren Recycling ein wesentliches Augenmerk gelegt. Das Lehrangebot des IME richtet sich vornehmlich an Studierende der Metallurgie und Werkstofftechnik. Diese werden an der RWTH Aachen entweder in einem 10-semestrigen Diplomstudiengang zum „Diplom-Ingenieur“ oder in einem 4-semestrigen deutsch- oder englischsprachigen Aufbaustudiengang zum „Master in Metallurgical Engineering“ ausgebildet. In beiden Studiengängen werden vom IME die Schwerpunkte Prozesstechnik, Oberflächentechnik und Anlagenbau angeboten. Im Grundstudium haben die Studierenden des Diplomstudienganges neben den allgemeinen Grundlagenfächern wie Mathematik und Mechanik bereits spezielle Fächer mit metallurgischem Hintergrund zu absolvieren. Hierbei leistet das IME seinen Beitrag im Rahmen der Vorlesung „*Einführung in die Prozesstechnik*“. Darin werden auch die späteren Studienrichtungen vorgestellt. Dem Grundstudium von vier Semestern sowie einem begleitenden Industriepraktikum von sechs Wochen schließt sich nach bestandener Vordiplom das Hauptstudium an. Im Rahmen des Hauptstudiums erfolgt die fachliche Ausrichtung der Studierenden

in den individuell wählbaren Studienrichtungen „*Prozesse*“, „*Metallische Werkstoffe*“ und „*Mineralische Werkstoffe*“, die wiederum aufgeteilt sind in jeweils drei bis fünf Vertiefungsfächer. Unabhängig davon absolvieren alle Studierenden acht Basisfächer. Vom IME werden zusammen mit dem Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) Vorlesungen und Übungen im Basisfach „*Metallurgie und Recycling*“ sowohl in deutscher als auch in englischer Sprache angeboten. Die Schwerpunkte am IME liegen dabei in der Darstellung der Gesamtprozesse zur Metallgewinnung sowie in der Beschreibung der einzelnen Prozessabläufe bei Gewinnung und Recycling der Nichteisenmetalle Kupfer, Aluminium, Zink, Blei und Titan. Das IME bietet das Vertiefungsfach Nichteisenmetallurgie an. In den Vorlesungen *Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling I - III* werden die einzelnen verfahrenstechnischen Schritte metallurgischer Prozesse (unit operations), ihre theoretischen Grundlagen sowie die anlagentechnischen Details vorgestellt. Die Vorlesungsinhalte sind dabei in vier Blöcke unterteilt:

- ▷ Gas-Fest-/Flüssig-Fest-Reaktionen
- ▷ Gas-Flüssig-/Flüssig-Flüssig Reaktionen
- ▷ Physikalische Trenntechnik und
- ▷ Elektrochemie

Die vorlesungsbegleitenden Übungen und Praktika beinhalten 30 Experimente in studentischer Ausführung inkl. bewertendem Bericht und ermöglichen so das praxisnahe Erleben der einzelnen metallurgischen Prozesse. Regelmäßig werden eintägige Exkursionen zu Metall herstellenden und Metall verarbeitenden Firmen im Großraum NRW/BeNeLux durchgeführt, die einen Einblick in das Umfeld eines künftigen Tätigkeitsfeldes geben.

Als besonderes Highlight des Jahres führt das IME jeden Herbst eine zweiwöchige Exkursion zu verschiedenen Unternehmen der Nichteisenmetallurgie und anverwandten Bereichen durch. Die letzten Ziele waren:

- ▷ Südwest-Deutschland, Schweiz, Luxemburg,
- ▷ Südafrika,
- ▷ Frankreich, Belgien und Niederlande,
- ▷ Südost-Deutschland, Österreich, Tschechien.

Darüber hinaus werden am IME in Kooperation mit anderen RWTH-Instituten aus dem Bereich Metallurgie und Werkstofftechnik mehrere Spezialisierungsfächer angeboten, in denen kurz vor ihrem Abschluss stehenden Studierenden die geforderte Bandbreite auch durch Beiträge von Experten der Wirtschaft vermittelt wird. In den Fächern „*Industrielle Galvanotechnik*“ und „*Oberflächentechnik*“ werden Kenntnisse zur Metallabscheidung aus wässrigen Lösungen (elektrolytisch und chemisch) sowie Kenntnisse über die für die Glanzverchromung von Bauteilen erforderliche Erzeugung von Mehrschichten vermittelt. Dazu zählen auch Untersuchungsmethoden zur Charakterisierung von Werkstoffoberflächen, Verfahren zur Beeinflussung der Oberflächeneigenschaften und Herstellung von Werkstoffen mit definiert eingestellten Oberflächen. Das Spezialisierungsfach „*Entwicklung, Planung und Bau von Anlagen*“ befasst sich mit Themen der Verfahrens- und Standortwahl, der Planungstechnik sowie der Wirtschaftlichkeit metallurgischer Anlagen. Im Fach *Umweltschutz beim Metallrecycling* werden Aspekte des Umweltrechts und der Aufbereitung von Recycling-Rohstoffen angesprochen.

Seminare am Institut

- ▷ Lehrstuhlseminar: während des Semesters wöchentlich, Assistenten und Studierende stellen Studien-, Diplomarbeiten und Projekte vor.
- ▷ Industrieseminar: viermal pro Semester, Industrievertreter werden als Referenten eingeladen.
- ▷ Es wird jährlich ein praktisches Seminar für Studenten des European Mining and Engineering Course (EMEC) durchgeführt, in dem den Studenten die Metallurgie des Leichtmetall-Recyclings näher gebracht wird.
- ▷ DGM-Seminare: Im letzten Jahr hat das Institut zwei Seminare zu den Themen Kupferstrangguss und Vakuummetallurgie ausgerichtet.

Forschungsgebiete

Die Forschungsschwerpunkte des IME (**Bild 2**) unterliegen zwangsläufig den sich stetig verändernden Bedürfnissen

- Werkstoffprozessentechnik
 - D-ESR (Ti/Sonderstähle)
 - VIM (AlMgLi/ZnTi/NdFeB)
 - ESO (Nb/TiV)
 - Bandguss (Mg/Zn/Al/Cu)
 - Schmelzbehandlung (Mg/Al)
 - Metallpulver durch Mahlung/HDH
- Recyclingmetallurgie
 - DC-Arc (Altbatterien/Katalysatoren)
 - VIM-Destillation (Cu-Schrott)
 - Hydrometallurgie (Co-WC/Stäube)
 - Schmelzzentrifugation
- angewandte Elektrochemie
 - Elektrolyse (Zn, Cu, Ti, Al)
 - Galvanotechnik (Zn, Sn, Cr, Ni, Au)
- Beratung und Dienstleistungen
 - Technische Beratung
 - Analytik
 - Energiebilanzen, Stoffstromanalyse
 - Prozessmodellierung u. -simulation
 - Gutachten
 - Studien zum Stand der Technik
 - Schriftumsrecherchen

Bild 2: Forschungs- und Serviceschwerpunkte des IME

und Prioritäten der uns verbundenen Industrieunternehmen. Nahezu die gesamte Bandbreite der Metalle wird hierbei abgedeckt. Im Bereich der Werkstoffprozessentechnik nimmt die Vakuummetallurgie mit den Verfahren induktives Schmelzen (VIM), Elektroschlackeschmelzen (ESU) oder dem Elektronenstrahlschmelzen (EB) breiten Raum ein. Die internationalen Entwicklungen zur Verkürzung von Prozessketten haben den vertikalen Strangguss (auch unter Vakuum) und den horizontalen Dünnbandguss zwangsläufig ans IME gebracht. Der traditionelle Schwerpunkt der Recyclingmetallurgie ist Basis für den Einsatz unserer Elektrolichtbogenöfen, durch deren Hohlelektroden aufbereitete Batteriekomponenten, geschredderte Altkatalysatoren und andere industrielle Reststoffe wie Stäube, Schlämme oder Schlacken chargiert werden. Eine Verstärkung in diesem Bereich bildet unser neues Labor für schmelzflüssige Phasen, das z. B. eine gezielte Analyse von Schlackeneigenschaften (z. B. Viskosität, Dichte, Leitfähigkeit) erlaubt. Den dritten Schwerpunkt der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten am IME bildet die Elektrochemie, bei der Synergien zwischen Metallelektrolyse und Galvanotechnik zur Entwicklung neuer Verfahren und Schichten genutzt werden. Im Folgenden wird zu einigen ausgewählten Arbeiten aus den Tätigkeitsschwerpunkten berichtet.

VIM-Legierungsentwicklung (Al-Li)

Am IME stehen zur Legierungsentwicklung/-herstellung mehrere z. T. kombinierte Vakuum-/Überdruck Induktionsöfen bis in den 100 kg Maßstab (**Bild 3**) zur Verfügung. Neben der Blockerstarung ist die kontrollierte Erstarrung zu Platten, als kontinuierlich erstarrender Strang oder als rasch erstarrte Flakes unter Schutzgas möglich. Die im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 289 der DFG „Formgebung metallischer Werkstoffe im teilerstarrten Zustand“ am IME koordinierte Aluminium-Lithium Legierungsentwicklung soll hier beispielhaft angeführt werden, um die Einbindung der VIM-Technologie in die Legierungsentwicklung darzustellen. So wird eine Aluminium-Lithium Legierung, die zuvor thermochemisch modelliert wurde, am IME unter Schutzgasüberdruck in Form von Rundblöcken hergestellt. Dabei konnte durch eine weiterführende gezielte Beeinflussung der Mikrostruktur mittels chemischer Kornfeinung, diese Hochleistungslegierung weiter optimiert werden. Außerhalb öffentlich geförderter Projekte dient diese Anlagentechnik zur Kleinproduktion von komplexen Hochleistungslegierungen z. B. auf Mg-Ce-Y-Zr Basis, Al-Li-Si, Zn-Ti/Zr Variationen oder auch Selten-Erd-Legierungen im Industrieauftrag.

VIM-Raffination von Kupfermischschrotten

Die Vakuumdestillation wird dann eingesetzt, wenn sich Metalle durch her-

kömmliche Verfahren nicht oder nur schwer raffinieren lassen und eine ausreichend hohe Differenz der real vorliegenden Dampfdrücke vorliegt. Dieses Verfahren wird sowohl bei der Verarbeitung von Recycling- und Sekundärmaterialien als auch zur Herstellung von hochreinen Legierungen und Reinstmetallen angewandt. Hierbei nutzt man folgende Effekte:

- ▷ Die Verminderung des Druckes führt zur Verschiebung des Gleichgewichtes in Richtung der erwünschten Reaktionen und damit zur Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit.
- ▷ Unerwünschte Reaktionen des zu behandelnden Metalls bzw. Verbindung mit schädlichen Atmosphären werden auf ein Minimum reduziert.
- ▷ Die verdampften und kondensierten Komponenten können metallisch in reiner Form wiedergewonnen werden.

Für derartige Projekte stehen am IME Kalt- und Heißwandvakuuminduktionsöfen zur Verfügung, beginnend vom kleinen Forschungsöfen (Tiegelvolumen 1 l) bis zur industrienahen Pilotanlage (Tiegelvolumen 100 l), so dass zwei scale-up Stufen realisierbar sind. So wurde ein Industrieprojekt „Blei-Zink-Entfernung aus Kupferlegierungsschrotten mittels Vakuumdestillation“ erfolgreich abgeschlossen. Mit dieser bis in den Pilotmaßstab nachgewiesenen Verfahrenstechnik wird die Aufarbeitung von Kupferlegierungsschrotten mit hohen Zink- und/oder Bleigehalten (60 bis 80 % Cu, 10 bis 30 % Zn, 1 bis 4 % Pb, 1 bis 10 % Sn) möglich. Die Vakuumbehandlung kann die konventionelle pyrometallurgische Kupfersekundärroute für hochblei- und zinkhaltige Schrottsorten ersetzen, die Nachteile der Verzettlung der Wertmetalle, der Entstehung von Flugstäuben sowie der großen Rückgutmengen vermeiden und direkt zwei vermarktungsfähige metallische Produkte erzeugen. Kupfer und Zinn verbleiben in der Restschmelze und Blei und Zink sammeln sich im Kondensat. Die chemischen Analysen sind aufgrund der niedrigen Restgehalte an Blei und Zink in Kupfer als positiv zu bewerten. Die industrielle Umsetzung wird derzeit mittels Wirtschaftlichkeitsrechnung geprüft. Maßgeblich verantwortlich für die guten Ergebnisse ist der Aufbau der Kondensatoren. Am IME werden u. a. Versuche zur

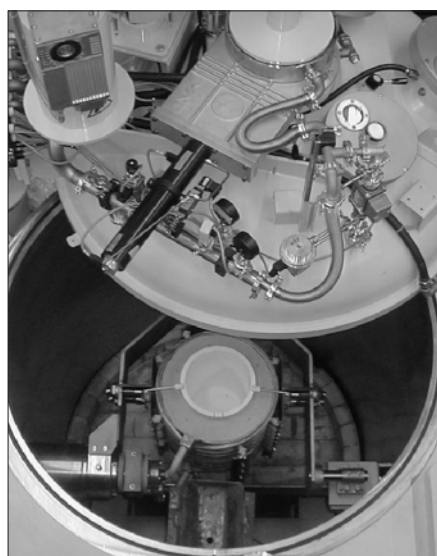


Bild 3: 100 kg Legierungsöfen (PVA)

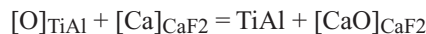
Destillation von Zink und Cadmium aus Bleischwämmen durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass auf diese Weise der Zinkgehalt auf unter 6 ppm und der Cadmiumgehalt unter 1 ppm gesenkt werden kann. Die Übertragung der Parameter in den industriellen Pilotmaßstab ist in Planung.

Desoxidation von γ -TiAl durch Elektroschlackumschmelzen (ESU)

Beim Umschmelzen wird über eine Elektrode aus dem zu raffinierenden Metall Strom durch ein Schlackenbad geleitet, das als Widerstand fungiert. Zur Vermeidung einer möglichen elektrolytischen Zersetzung der Schlacke werden ESU-Anlagen mit Wechselstrom betrieben, dessen Frequenz nach oben durch zunehmende Badbewegung infolge induktiver Röhreffekte und dadurch verursachte Inhomogenitäten begrenzt ist. Die eingebrachte elektrische Energie wird in Wärme umgesetzt und erhitzt das Schlackenbad. An der Kontaktstelle mit der Schlacke schmilzt die Elektrode auf, die Metalltropfen sinken durch das Schlackenbad und sammeln sich in einem Metallsumpf in der Kokille. Bis zur Erstarrung erfolgen Metall-Schlacke-Reaktionen und eine physikalische Refinement durch Aufschwimmen von in der Regel nichtmetallischer Verunreinigungen. Die hohe Abkühlgeschwindigkeit in der wassergekühlten Kupferkokille bewirkt eine gleichmäßige gerichtete Erstarrung und gute Homogenität des Ingots. Das ESU-Verfahren zeichnet sich durch hohe Flexibilität und ein großes Einsatzspektrum aus, da neben Stellgrößen wie Umschmelzrate,

Schmelzstrom und Kühlwassertemperatur auch die Art der Metall-Schlacke-Reaktionen durch Auswahl eines geeigneten Schlackensystems und ggf. notwendiger Zuschläge kontrolliert werden können. Diese können bei Bedarf auch kontinuierlich während des Prozesses nachgefordert werden. Neben dem normalen offenen ESU-Betrieb kann in gekapselten Anlagen je nach Auslegung auch unter Schutzgas (IESU, Ar-ESU), unter Druck (DESU) oder Vakuum (VE-SU) umgeschmolzen werden.

Das IME verfügt zum einen über eine offene ESU-Anlage (Bild 4), mit der durch Einsatz einer Ar-Bedüsung auch unter bedingt inerten Bedingungen geschmolzen werden kann. Für Überdruckbetrieb bis 50 bar und bis zum Vakuum Einsatz (ca. 10^{-2} mbar) bei einstellbarer Zusammensetzung der Atmosphäre steht eine gekapselte DESU-Anlage zur Verfügung. Bei Schmelzströmen bis 5 kA und Spannungen bis 65 V können Elektroden bis zu $\varnothing 110 \times 1.340$ mm Größe (ca. 100 kg bei Stahl) unter industrienahen Bedingungen umgeschmolzen werden. Im Rahmen eines Forschungsprojektes zur kostengünstigen Herstellung neuartiger Titanaluminide wird am IME ein innovativer Ansatz verfolgt, nach dem aluminothermisch hergestellte Titanaluminid-Elektroden in einer Ar-ESU-Anlage umgeschmolzen werden. Die stark sauerstoffhaltigen Elektroden können durch Einsatz einer aktiven, d. h. mit metallischem Kalzium angereicherten, Schlacke raffiniert werden. Als Basismaterial für die Schlacke wird CaF_2 eingesetzt, das gegenüber Titan und Aluminium beständig ist. Die Raffinationsreaktion entspricht im Wesentlichen folgender Gleichung:



Zur Kompensation der Kalziumverluste durch die o. g. Reaktion muss kontinuierlich Schlacke mit hohem Kalziumgehalt nachgefordert werden. Ferner ist zu berücksichtigen, dass ein Anreichern der Schlacke mit CaO ihre physikalischen Eigenschaften, insbesondere Viskosität und Leitfähigkeit, stark beeinflusst. Der Umsetzungsgrad der Reaktion und damit der theoretisch erreichbare Sauerstoffgehalt im Metall nach der Raffination (O) ist vom Verhältnis von Ca zu CaF_2 bzw. von CaO zu CaF_2 abhängig.

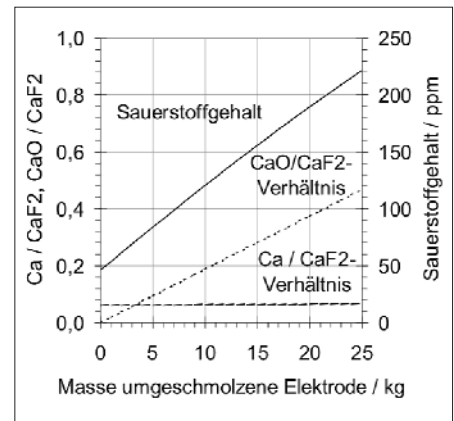


Bild 5: Sauerstoffgrenzgehalte in DESU-raffiniertem Ti-Al (ESO)

Bild 5 zeigt den theoretischen Verlauf der Sauerstoffgrenzgehalte für eine in der DESU-Anlage des Beschleunigungsspannung wirkt, die Anode liegt auf Gehäusepotential. Durch eine Bohrung tritt der Strahl beschleunigter Elektronen in den feldfreien Raum ein. Sowohl für die Erzeugung des Elektronenstroms als auch für seine ungehinderte Hinführung zu dem zu schmelzenden Material ist ein Hochvakuum (10^{-4} bis 10^{-6} mbar) Voraussetzung. Aufgrund der hohen einstellbaren Leistungsdichten, des minimalen Restgasgehaltes an Atmosphäre im Reaktor und des Einsatzes von wassergekühlten Kupfertiegeln, bei denen keine Reaktionen zwischen dem Metall und einem keramischen Feuerfestmaterial auftreten, ist der Einsatz von Elektronenstrahlöfen zum Schmelzen, Raffinieren und Gießen von hochschmelzenden Metallen (z. B. W, Mo, Nb, Ta), reaktiven Metallen (z. B. Ti, Zr, V) und Superlegierungen auf Cr-, W-, Mo- und Co-Basis ideal geeignet.

Aktuelle Untersuchungen am IME beschäftigen sich mit der Raffination sauerstoffhaltiger Titan-Aluminium-Legierungen. Mögliche Einsatzgebiete dieses Verfahrens sind die Raffination von Titanschrott oder aluminothermisch gewonnener Titan-Aluminium-Legierungen. Die Dampfdruckkurven der im System Ti-Al-O vorkommenden Verbindungen zeigen, dass Sauerstoff bei gleichzeitiger Anwesenheit von Aluminium durch Verdampfen des Aluminiumsuboxids Al_2O_3 , dessen Dampfdruck signifikant über dem der reinen Elemente Aluminium und Titan liegt, entfernt werden kann. Da der Umschmelzprozess im Elektronenstrahlöfen nicht gleichge-



Bild 4: ESU-/DESU-Anlage (ALD)

wichtsnah abläuft, ist mit geringerer Al_2O_3 -Verdampfung aufgrund kinetischer Hemmung zu rechnen, während die reine Al-Verdampfung bevorzugt ist. Dieses wurde in Versuchen bestätigt, in denen nachgewiesen wurde, dass das Verhältnis von verdampftem Aluminium zu verdampftem Sauerstoff mit steigendem Anteil an verdampftem Material zunimmt.

Die Randwerte (Dreiecke) sind theoretische Randbedingungen. Sie ergeben sich aus der Tatsache, dass einerseits zu Beginn des Umschmelzens aufgrund thermodynamischer Überlegungen reines Al_2O_3 abdampfen muss und andererseits nicht mehr Aluminium und Sauerstoff verdampfen können, als im Einsatzmaterial vorhanden sind.

Der im IME installierte Elektronenstrahl-ofen ES 1/3/60 (**Bild 6**) verfügt über eine maximale Strahlleistung von 60 kW bei einer Beschleunigungsspannung von 30 kV und einem Elektronenstrom von 2 A. Folgende Fahrweisen sind möglich:

- ▷ Abtropfsmelzen von vertikal zugeführten Blöcken zu Ingots,
- ▷ Abtropfsmelzen von horizontal zugeführten Barren zu Ingots,
- ▷ Schmelzen von Granulat oder anderem Kleingut zu Ingots,
- ▷ Schmelzen von Knopf- und Zungenproben sowie Zonenschmelzen im wassergekühlten Kupfertiegel,

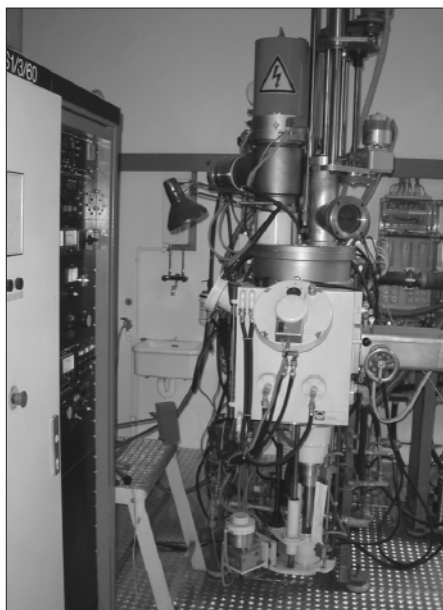


Bild 6: Elektronenstrahl-ofen (ALD)

- ▷ Gießen von Präzisionsteilen im Schleudergussverfahren.

Die Ingots können als Rundblock (\varnothing 50 und \varnothing 100 mm) oder als Bramme (90 x 35 mm) bis zu einer Länge von 350 mm stranggussnah abgezogen werden. Pro Arbeitsgang können aber auch 5 Knöpfe (\varnothing 25 x 10 mm) oder eine Zunge (15 x 160 x 10 mm) geschmolzen werden. Das Nutzvolumen des Kipptiegels beträgt 0,15 l.

Batterierecycling im Elektrolichtbogenofen

Seit mehr als fünf Jahrzehnten werden am IME die Erfahrungen in der Metallurgie der Elektrolichtbogenöfen erweitert. In Nachfolge der Dreiphasen-Technik sind heute Gleich-/Wechselstrom-Öfen im Einsatz. Dabei gelang es, ein mit dem Boden des Ofens dicht abschließendes Elektrodensystem zu entwickeln. Das in diesem Maßstab einzigartige System einer wassergekühlten Bodenelektrode aus OF-Kupfer erweist sich bis heute als zuverlässige Stromabfuhr.

Derzeit werden vier Elektrolichtbogenöfen für öffentliche sowie industrielle Forschungsprojekte betrieben. Im kleinsten Aggregat können unter Schutzgas Elektroden erschmolzen werden (VL-BO), die vorher aus den Legierungselementen gepresst worden sind. Zwei Laboröfen mit Graphit-elektroden (P_{\max} = ca. 100 kW) ermöglichen das Einschmelzen von über 10 l Material. Die Flexibilität dieser Öfen gestattet insbesondere Untersuchungen zum Recycling einer großen Zahl von Reststoffen und Rückständen wie Schlacken, Schleifstäuben, Krätzen, Filterstäuben, Müllrostaaschen, metallische Schrotte oder Batterien. Einer dieser Öfen wurde im Jahr 2003 in Betrieb genommen und kann im Schutzgasstrom betrieben werden. Schmelztemperaturen von über 2300 °C werden mühelos erreicht. Eine neuartige Chargiereinrichtung sorgt dabei für einen gasdichten, kontinuierlichen Materialeintrag durch die Hohlelektrode.

Das Herzstück der Lichtbogenofen-Technik am IME ist der Pilot-Ofen mit einem Nutzvolumen von über 200 l (**Bild 7**). Die Maximalleistung im Gleichstrombetrieb liegt bei etwa 0,5 MW, so dass Einschmelzraten von über 250 kg Stahl oder Batterieschrott pro



Bild 7: Batterierecycling (Co-Ni-Abstich) am 0,5 MW-Lichtbogenofen des IME (DE-MAG)

Stunde realisiert werden. Die maximale Schmelztemperatur von 1900 °C gestattet z. B. die Erzreduktion zu Ferrolegierungen oder das Einschmelzen titanoxidreicher Schlacken. Hohlelektrodensysteme sowie Chargierlanzen erlauben den Materialeintrag direkt in den Lichtbogen, wodurch erhöhte Schmelzausbeuten verwirklicht werden können. Nach kontinuierlicher Materialaufgabe erfolgt ein periodischer Abstich halbkontinuierlich. Im Rahmen eines dreijährigen öffentlich geförderten Forschungsprojektes wird zur Zeit ein geschlossener Recyclingkreislauf für Nickel-Metallhydridbatterien erprobt. Ziel ist dabei die Herstellung einer Ni-Co-Legierung und eines Selten-Erd-Mischmetalls, welche direkt wieder in der Batterieherstellung eingesetzt werden können. Das mechanisch aufbereitete Altbatterie-Pulver wird im Pilotofen mittels gasdichter Hohlelektrode unter Verwendung einer Schlacke auf CaO-CaF_2 -Basis eingeschmolzen. Die Wertmetalle Nickel und Kobalt legieren sich zu einer flüssigen Metallphase und werden getrennt von der Schlacke abgestochen, die als Sammler für die wertvollen SE-Metalle (z. B. Lanthan) dient. Die SE-Metalle werden nach hydrometallurgischer Vorbereitung per Schmelzflusselektrolyse wiedergewonnen. In einem weiteren Forschungsprojekt wird zur Zeit das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien erforscht. Auch für den Einsatz von stückigem Batterieschrott bietet sich der DC-EAF an. In enger Zusammenarbeit mit Partnern der Recyclingindustrie konnte aus Alkali/Mangan- bzw. Zink/Kohle-Batterieschrott ein Ferromangan mit über 40 % Mn-Inhalt ge-

wonnen werden. Da der Zinkinhalt der Batterien über die Gasphase verflüchtigt wird, ist ein Recycling ohne Depositionsrückstände erfolgreich untersucht worden.

Ebenfalls zur Verringerung des Abfallaufkommens und der Wiedergewinnung nützlicher Wertmetalle dient die von einer Forschergruppe am IME untersuchte Schlackebehandlung. Ziel ist hierbei die Verringerung der Metallverluste in metallurgischen Schlacken. Dabei zeigten sich deutliche Verbesserungen, sowohl hinsichtlich der Belastung der Umwelt als auch des Austrags in der Schlacke gebundener Wertmetalle wie Zn, Pb, Ga und Ge angeht. Auch dieses öffentlich geförderte Forschungsvorhaben soll bis zum Produktionsmaßstab entwickelt werden.

Eigenschaften schmelzflüssiger Phasen

Im Schlackenlabor des IME lassen sich nicht nur Schlacken untersuchen, sondern Schmelzen aller Art wie Metalle, Salze, etc. Die neue Laborausstattung ermöglicht die Messung von Dichte, Oberflächenspannung, Viskosität und von Benetzungswinkeln fester Körper durch eine Schmelze. Bei fortlaufender Temperaturmessung lassen sich die Temperaturabhängigkeiten dieser Eigenschaften ermitteln. Mit modernen elektrischen Öfen können Messungen bei Temperaturen bis 1800 °C durchgeführt werden. Im Aufbau befindet sich eine Anlage zur Mes-

sung der elektrischen Leitfähigkeit sowie eine Zelle zur Schmelzflusselektrolyse von flüssigen Salzen. Die Dichtemessung erfolgt nach der Auftriebsmethode. Dabei wird ein Senkkörper mit bekannter Masse an einem Draht in die Schmelze eingetaucht und online gewogen. Mit der Gewichtsabnahme infolge des Auftriebs wird die Dichte der Schmelze berechnet, da der Auftrieb vom Volumen des Senkkörpers und dessen Dichte abhängig ist. (Die Empfindlichkeit der Methode ist ca. 0,15 %; der Messfehler max. 1 %).

Die Oberflächenspannung wird nach der Methode des maximalen Blasendrucks ermittelt. Hierbei wird ein Gas durch eine Kapillare in die Schmelze eingeblasen und der Gasdruck in der Kapillare fortlaufend gemessen. Der maximale Druck hängt von der Oberflächenspannung der Schmelze und dem Kapillaren-durchmesser ab. Der Fehler der Eintauchtiefe der Kapillare wird durch die Anwendung der 2-Kapillaren-Methode von Sugden eliminiert. Der Messfehler beträgt max. 3 bis 5 %, die Empfindlichkeit ca. 0,1 %.

Mit dem Schwingungviskosimeter lässt sich eine große Breite an Viskositäten von ca. 100 bis ca. 10^5 Pa · s messen. Eine Messsonde in Form einer Platte wird mit Hilfe eines Generators in Schwingung versetzt. Durch Änderung der Amplitude, Frequenz und Phase der Schwingungen können die unbekannten Viskositäten bestimmt werden. Der

Messfehler der Messungen beträgt max. 5 %, Empfindlichkeit bis ca. 0,5 %. Eine weitere Anlage kann optisch den Benetzungswinkel zwischen festen Stoffen und Schmelze, z. B. zwischen feuerfesten Materialien und Metall oder Schlacke, bzw. zwischen Stahl und flüssigem Zink messen. Die Messungen können bis zu Temperaturen oberhalb von 1800 °C durchgeführt werden.

Raffination von Aluminiumschmelzen

Auf Grund immer höher werdender Qualitätsanforderungen, die an Metalle gestellt werden, ist in den meisten Fällen vor dem Vergießen zu Halbzeug oder Fertigprodukten eine Schmelzebehandlung für eine weitgehende Entfernung sowohl gelöster als auch fester Verunreinigungen notwendig. Mit der am IME verfügbaren Anlagentechnik lässt sich die gesamte Breite metallurgischer Schmelzebehandlungsverfahren überprüfen. Das reicht von Spülgasbehandlungen mit Argon z. B. für die Wasserstoffentfernung aus Nordic-Gold, der goldfarbenen Legierung der Euromünzen, über Vakuumöfen bis zu Zentrifugen und Filteranlagen, die eingesetzt werden, um z. B. nichtmetallische Partikel aus Aluminiumschmelzen zu entfernen.

Zurzeit werden am IME mehrere Projekte bearbeitet, die sich mit Schmelzebehandlungen befassen, u. a. „Molten Aluminium Purification (MAP)“ - ein Projekt der EU - das sich mit der Entfernung von Eisen aus Aluminiumschmelzen befasst (**Bild 8**). Hierbei kommt eine Filterzentrifuge zum Einsatz, die auskristallisierte intermetallische Phasen aus flüssigem Aluminium abtrennt. In einem Verbundprojekt „Entwicklung von Recyclingkonzepten für Aluminiumsonderwerkstoffe“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Aufarbeitung von speziellen Aluminiumlegierungen und Verbundwerkstoffen, für die bisher noch kein geeigneter Recyclingprozess existiert, kommt ebenfalls eine Filterzentrifuge zum Einsatz. So werden zum Beispiel beim Recycling von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen verstärkende Keramikpartikel aus der schmelzflüssigen Aluminiummatrix gefiltert und zurückgewonnen. Zudem wird das Material mit Schmelzsatz behandelt, um es weiter zu raffinieren. Auf diese Weise werden hohe Metallausbeu-

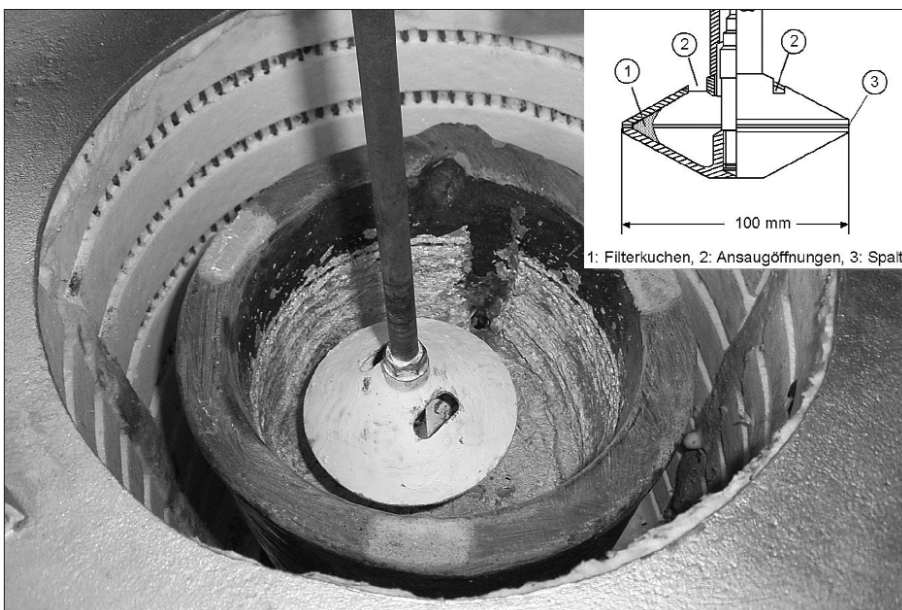


Bild 8: Laborzentrifuge zur Raffination von Aluminiumschmelzen

ten und ausreichende Reinheiten erreicht, um das Material anschließend der konventionellen Aluminiumrecyclingroute zuführen zu können.

Ein weiteres Projekt hat die „Entwicklung von Verwertungsprozessen für niedrig metallhaltige magnesiumhaltige Reststoffe“ zur Aufgabe. Dieses BMBF-Projekt untersucht das Einschmelzen von Magnesiumspänen, die unter anderem mit Bohremulsion und Öl verunreinigt sind. Beim Einschmelzen von Schrotten und insbesondere von sog. „sludge“, einem Nebenprodukt beim Schmelzen von Mg, verbrennen die organischen Substanzen; durch die Behandlung mit geeigneten Schmelzsalzen werden Verunreinigungen aus dem Metall entfernt, in der Salzphase gebunden und aus dieser kontinuierlich entfernt.

Dünnbandgießen von Magnesium

Bisher erfolgte die Herstellung von Magnesiumblechen hauptsächlich konventionell über Strang- oder Blockguss und Warmwalzen. Aufgrund der hexagonalen Kristallstruktur von Magnesium gestaltet sich das Walzen aber sehr aufwendig und kostenintensiv. Vielversprechend ist der Einsatz sogenannter Bandgießverfahren, weil hierdurch endabmessungsnahes Gießen prozessstufenarm ein Vorprodukt von wenigen Millimetern Dicke erzeugt wird. Das Zwei-Rollen-Gießwalzverfahren, bei dem die Metallschmelze zwischen zwei sich drehenden, gekühlten Walzen erstarrt und dabei gleichzeitig gewalzt wird, zeigt hierbei die meisten Vorteile. Diese sind – aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeiten – vor allem ökonomischer und werkstofftechnischer Art.

- ▷ Reduzierung des Investitionsaufwandes durch geringeren Maschinen- und Flächenbedarf
- ▷ Kostenreduzierung durch den Wegfall von Verfahrensschritten und der dafür aufgewandten Energie
- ▷ Schonung der Ressourcen und der Umwelt durch verminderten Energieeinsatz und verminderte Emissionen
- ▷ Gewinn im Zeitwettbewerb durch kürzere Durchlaufzeiten bei der Bänderzeugung und eine damit verbundene zeitlich flexiblere Auftragsabwicklung
- ▷ Feineres Korn und dadurch bedingt höhere Festigkeit und Duktilität

- ▷ Größere Freiheitsgrade in Bezug auf Legierungsgehalte durch ungleichgewichtsmäßige Erstarrung
- ▷ Weniger Seigerungen und feiner verteilte Ausscheidungen

Am IME wird dieses Verfahren seit 2002 an der institutseigenen, mit Schutzgas gekapselten Zwei-Rollen-Gießwalzanlage (**Bild 9**) für Magnesium angewendet. **Bild 10** zeigt die Gefügemorphologie eines am IME gießgewalzten Bandes aus AZ31. Man erkennt Bereiche verschiedener Korngrößenklassen und



Bild 9: Zwei-Rollen-Gießwalzanlage

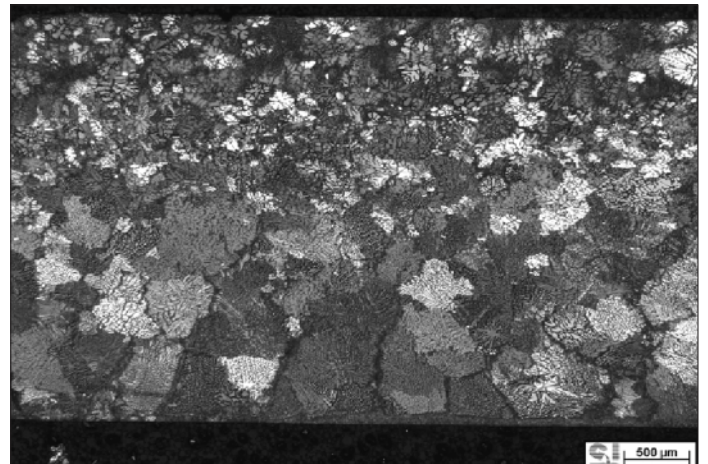


Bild 10:
Gießgewalztes
Band aus AZ31,
Längsschliff

Kornmorphologie sowie eine durch die Farbätzung identifizierte Orientierungsverteilung der Kristalle.

Das Ziel aktueller und zukünftiger Aktivitäten ist die Untersuchung der metallurgischen Zusammenhänge des Mg-Bandgießens durch Modellierung der Interaktionen zwischen Prozessparametern und erzielten Materialeigenschaften wie z. B. Gefügemorphologie und mechanische Eigenschaften. Weiterhin wird an der Simulation und Modellbildung des Mg-Bandgussprozesses und dessen Abgleich mit experimentell ermittelten Daten gearbeitet.

Hydrometallurgische Nickelgewinnung durch Drucklaugung

Die Hydrometallurgie, oder auch naschemische Verfahrenstechnik, greift am IME auf ein modernes Technikum mit zahlreichen Anlagen und Ausrüstungen in Labor- und Pilotmaßstab für Praktika und Forschungsarbeiten zurück. Dazu gehören beispielsweise mehrstufige Laugungskaskaden und Solvent-Extrak-

tions-Anlagen (bis 100 l/h), oder auch Autoklaven bis 70 l Innenvolumen für Drücke bis zu 40 bar und Temperaturen bis 250 °C. Es werden Untersuchungen sowohl mit primären Rohstoffen (z. B. Cu-, Zn-, Ni- und Mo-Erze und Konzentrate), als auch mit Recyclingrohstoffen (wertmetallhaltige Stäube, Schlämme, Elektronikschrott, etc.) durchgeführt. Aktuelle Forschungsarbeiten und Projekte behandeln beispielsweise die Hochdrucklaugung von Nickelerzen, sulfidischen Kupfer- und Molybdänkonzentraten sowie das Recycling von NiMH Batterien. **Bild 11** zeigt, dass in-

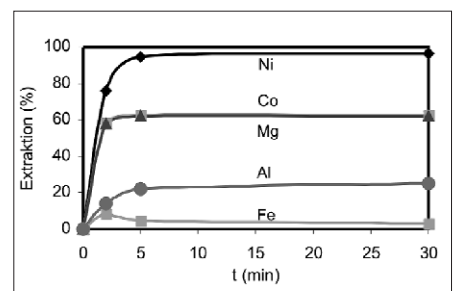


Bild 11: Intensivlaugung lateritischer Nickelerze unter Druck

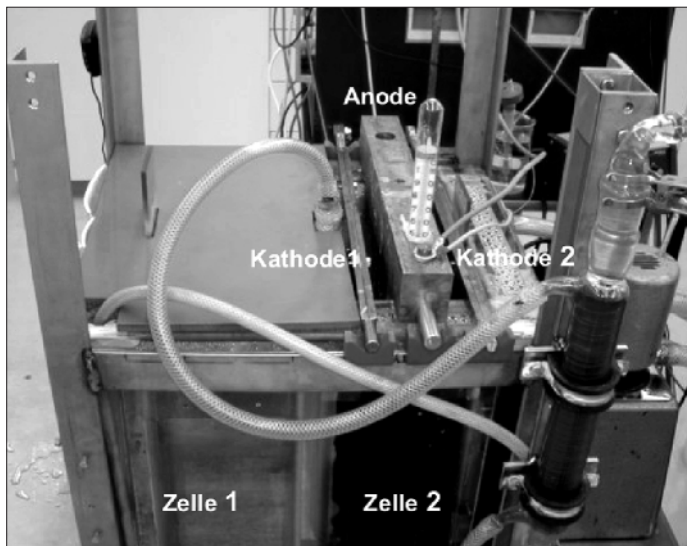


Bild 12: Elektrolysezelle zur Kupferraffination

nerhalb von 5 min 95 % des Nickelinhaltes aus Erzen bei Temperaturen von 250 °C in schwefelsaurer Lösung extrahiert werden können.

Elektrolytische Raffination von Kupfer

Die wachsenden Qualitätsansprüche an reine Metalle können meistens nur durch (Raffinations-) Elektrolyse in Lösungen oder Schmelzen erfüllt werden. Die Forschungen am IME auf dem Gebiet der Elektrolyse befassen sich mit den Metallen Al, Cu, Ti, Zn und Seltenen Erden mit dem Ziel der Energieeinsparung, Intensivierung von Verfahren, Erhöhung der Reinheit und Einbeziehung von Recyclingwerkstoffen.

Vor diesem Hintergrund wird am IME zusammen mit einem Industriepartner der Einfluss der Überhitzung des Elektrolyts über die Schmelztemperatur auf den Energieverbrauch der Al-Herstellung untersucht, um eine Strategie zur Steuerung der Al-Elektrolyse auszuarbeiten. Parallel dazu wird an einem Temperatursteuerungsprogramm für eine Al-Zelle gearbeitet. In einem öffentlich geförderten Projekt wird die Schmelzflusselektrolyse von Ti und Seltenen Erden zur Untersuchung der Elektrodenpolarisationen, der elektrochemischen Kinetik, der Elektrodenreaktionen und der Stromausbeuten (Wirkungsgrade) in einer Zelle (bis 150 A) sowohl an Luft, im Vakuum oder in einer Schutzgasatmosphäre bei Temperaturen bis 1500 °C betrieben.

Traditioneller Schwerpunkt der Untersuchungen am IME sind Arbeiten auf dem

Gebiet der Cu-Raffinationselektrolyse. Erwähnenswert sind dabei Untersuchungen, die sich mit der Intensivierung der Elektrolyse durch Erhöhung der Stromdichte und deren Grenzen befassen. Im Rahmen einer Promotion wird hierbei die Gewinnung elektrolytisch erzeugter Cu-Legierungspulver aus minderwertigem Schrott bearbeitet (**Bild 12**). Einen weiteren Schwerpunkt bilden die Arbeiten auf dem Gebiet des Recyclings von Cu-haltigen Schrotten, wie z. B. Elektronikschrott. Es wurde gezeigt, dass die Anwendung einer dreidimensionalen Granalienanode einen Prozess ohne Anodenpassivierung sicherstellt.

Elektrochemisch abgeschiedene Sn-Zn-Korrosionsschutzschichten

Als weiteres Teilgebiet der angewandten Elektrochemie ist die Galvanotechnik wichtiger Bestandteil des Lehrprogramms. Forschungsarbeiten erfolgen überwiegend im industriellen Auftrag. Untersuchungen befassten sich u. a. mit der Abscheidung von Eisen-Chrom-Nickellegierungen und der Galvanisierung von Blankstahl.

Im Rahmen der eingangs beschriebenen Wiederbesetzung des Instituts im Jahre 1999 erfolgte vom Land Nordrhein-Westfalen eine deutliche finanzielle Förderung mit dem Auftrag, Lehre und Forschung auf dem Gebiet der Galvanotechnik durch Aufbau einer neuen galvanotechnischen Pilotanlage sicherzustellen. Diese besteht aus insgesamt 14 Bädern der Abmessungen 300 x 300 x 350 mm. Sie sind mit Heizelementen

einschließlich Temperaturmessung, Pressluftversorgung zur Erzeugung einer Badbewegung und Motoren zur Bewegung der Elektroden ausgestattet. Die Bäder sind dabei frei wählbar und können z. B. sauer/alkalisch, chromhaltig oder cyanidisch sein. Schichtzusammensetzung und -dicke können durch physikalische Geräte (RFA, Schichtdickenmessgerät) problemlos ermittelt, und die Elektrolytparameter durch die instituts-eigene chemische Analytik online überwacht werden.

Der strukturelle Aufbau und die Eigenschaften elektrochemisch abgeschiedener Legierungsschichten lassen sich durch eine Reihe von Prozessparametern in weiten Grenzen variieren. Unbefriedigend ist die Tatsache, dass die Wirkungsweise dieser Parameter auf das Schichtverhalten bislang nur mit hohem Zeitaufwand experimentell erfasst werden kann. Die strukturbildenden Prozesse für die Erzeugung von funktionellen Schichten werden bisher wissenschaftlich nur unzureichend verstanden. Eine Bewertung der maßgeblichen Einflüsse erfolgt daher meist empirisch, wodurch eine Methode der Schichtentwicklung nicht möglich ist. Zur Klärung dieser Prozesse wird in einem Forschungsteam das Thema „Synthese, Eigenschaften und Modellierung metallischer Korrosionsschutzschichten“ bearbeitet, wobei nachstehende Ziele angestrebt werden:

- ▷ Verständnis des Aufbaus und Beschreibung des funktionellen Zusammenhangs zwischen elektrochemisch abgeschiedenen Schichten und prozessbestimmenden Parametern am Beispiel des Systems Sn-Zn-X.
- ▷ Modellierung geeigneter elektrochemisch herstellbarer Materialkombinationen.
- ▷ Übertragung auf technische Systeme mit verbesserten Werkstoffeigenschaften.

Anschrift

IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling, RWTH Aachen
Intzestraße 3
D-52072 Aachen
Telefon: +49-241-8095851
Telefax: +49-241-8092154
E-Mail: Forschung@ime-aachen.de
Leitung und Geschäftsführung:
Prof. Dr.-Ing. Bernd Friedrich

IME-Veröffentlichungen 2000 - 2003

2000

Noll, T. R.; Kiehne, C. H.; Krüger, J.; Friedrich, B.: Recycling of semi-solid-processing residues. 6th Internat. conf. of semi-solid processing of alloys and composites, 2000, Turin, 35-40

Noll, T. R.; Kiehne, C. H.; Krüger, J.; Friedrich, B.: Grain refining optimisation of A356 alloy by Mn-addition. 6th Internat. Conf. of semi-solid processing of alloys and composites, 2000, Turin, 753-758

Krüger, J.: Sauerstoffeinsatz bei den Bad- und Schwebeschmelzprozessen der NE-Metallurgie, Vorträge zum 37. Metallurgischen Seminar des Fachausschusses für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB, 2000, 9-28

Hanusch, B.; Krüger, J.: Optimierung der Feuerraffination in einer Kupfer-Se-kundärhütte, Vorträge zum 37. Metallurgischen Seminar des Fachausschusses für Metallurgische Aus- und Weiterbildung der GDMB, 2000, 223-238

Hübschen, B.; Krüger, J.; Keegan; Schneider, W.: Fundamental research about liquid metal filtration., Internat. Conf. „Continuous Casting“, 2000, 20-25

Hübschen, B.; Krüger, J.; Keegan; Schneider, W.: A new approach for the investigation of the fluid flow in ceramic foam filters, Light Metals USA, 2000, 809-815

Neumann, K.; Friedrich, B.; Krone, K.; Je-strabek, J.; Nosch, E.: Hydrogen in aluminium containing copper alloy melts - solubility measurement and removal, „Continuous Casting“, Internat. Conf., 2000, 15-19

Rombach, G.: Grenzen des Metallrecyclings, Ringvorlesung Nachhaltige Metallwirtschaft, FH Hamburg, Fachbereich Maschinenbau und Produktion, Hamburg, 26.10.2000

Neumann, K.; Friedrich, B.; Krone, K.: Wasserstoffgehalte in aluminium- und zinkhaltigen Kupferlegierungen, Nichtmetalle in Metallen, GDMB, 2000

Zapp, P.; Rombach, G.; Kuckshinrichs, W.; Bauer, C.; Sliwka, .; Ruhrberg, M.: A resource-orientated analysis of the material flow of aluminium: A systems analysis approach., SETAC Europe, 2000, 109-112

Rombach, G.; Friedrich, B.; Bauer, C.; Sliwka, P.; Martens, P. N.: Nachhaltige Entwicklung - Beitrag von Stoffstrommodellen zur Operationalisierung, Umwelt Bd. 30, Nr. 10/11, 2000, 15-17

Rombach, G.: Verhalten mineralischer Pigmente beim Aluminiumrecycling, Erzmetall 53 (2000) Nr. 2, 98-105

Bauer, C.; Rombach, G.; Teschers, R.; Wolf, S.; Zapp, P.: Einbindung von Nutzungsaspekten in die Stoffstromanalyse metallischer

Rohstoffe, Metall 54 (2000) Nr. 5, 205-209

Zapp, P.; Kuckshinrich, W.; Rombach, G. et al.: Nachhaltige Entwicklung -Beitrag von Stoffstrommodellen zur Operationalisierung. Umwelt 30 (2000) Nr. 10/11, 15-17

Rombach, G.; Stelter, M.; Nesterov, N.; Teubel, E.: Nutzen von Ökobilanzen. Tagungsbericht, Erzmetall 53 (2000) Nr. 1, 8-10

Hausberg, J.; Happel, U.; Meyer, F.M.; Martens, P. N.; Koch, H.; Mistry, M.; Röhrlich, M.; Schlimbach, J.; Rombach, G.; Krüger, J.: Global red mud reduction potential through optimized technologies and ore selection. Mineral Resources Engineering, Vol. 9 (2000), Nr. 4

Krone, K. et. al.: Aluminiumrecycling. Hrsg.: Verband Deutscher Schmelzhütten, Düsseldorf, Aluminiumverlag und Informationsgesellschaft mbH, Düsseldorf, 2000

2001

Rombach, G., Zapp, P.; Kuckshinrichs, W.; Friedrich, B.: Technical Progress in the Aluminium Industry - A Scenario Approach., Light Metals 2001, USA, 1131-1137

Zapp, P.; Rombach, G., Kuckshinrichs, W.: Technical Progress in Production and Recycling of Aluminium Packaging - a Scenario Approach., SETAC Europe, 2001

Rombach, G.; Bauer, C.; Kuckshinrichs, W.; Zapp, P.: Metallic Raw Material Flows - From Analysis towards Decision Support., SETAC Europe, Brüssel, Belgien, 2001

Rombach, G.; Friedrich, B.: Future Potential and Limits of Aluminium Recycling., Vol. 3, 17-32

Zapp, P.; Rombach, G.; Kuckshinrichs, W.: Technological Development in Aluminium Production - Contributions to Environmental Changes., EMC 2001, Vol. 3, 83-98

Schlimbach, J.; Rombach, G.; Friedrich, B.; Krüger, J.: Resource Conservation by Improvements of Primary Aluminium Production, Light Metals 2001, 349-356

Schlimbach, J.; Rombach, G.; Friedrich, B.; Krüger, J.: Energy and Emission Analysis in Primary Aluminium Production - a Technical Contribution to an Integrated Resource Management. EMC 2001, Vol. 3, 99-116

Friedrich, B.; Krüger, J.; Mendez-Bernal, G.: Alternative solution purification in the hydro-metallurgical zinc production, EMC 2001, Vol. 1, 179-197

Arnold, A.; Friedrich, B.; Toubartz, F.: „Cu-Pb-Fe-S-balances in Cu during lead refining“, EMC 2001, Vol. 1, 295-317

Gerke, M.; Friedrich, B.; Krüger, J.; Arnold, A.: „Improved aluminium recovery at recycling plants by integrated slag refining“, EMC 2001, Vol. 2, 121-139

Weyhe, R.; Friedrich, B.: „Vacuum-thermal

recycling of used nickel-cadmium batteries“, EMC 2001, Vol. 2, 175-186

Weyhe, R.; Friedrich, B.: Vakuumthermisches Recycling von Ni-Cd-Akkumulatoren; Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“, 15. November 2001, Freiberg

Müller, T.; Friedrich, B.: Closed Loop Recycling von Nickel, Kobalt und Seltenen Erden aus Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren; Jahrestagung „Aufbereitung und Recycling“, 15. November 2001, Freiberg

Rombach, G.: Grenzen des Recyclings. F+E-Gießereiseminar, VAW aluminium AG, Bonn, 2001

Krüger, J. et. al.: Evaluation of the material flow of primary aluminium - The contribution of the information system ISAL, Hilty, L.M.; Gilgen, P.W. (eds): Sustainability in the Information Society. 15th Internat. Symp. „Informatics for Environmental Protection“, Part 2, Marburg: Metropolis Verlag, 637-644

Rombach, G.; Friedrich, B.: Aluminiumrecycling - Anspruch und technische Realisierbarkeit. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (BHM), 146 (2001) Nr. 5, 177-184

Rombach, G.; Friedrich, B.: Aluminium Recycling in Germany - Status and Potential. Light Metal Age Vol. 59 (2001) Nr. 8, 66-75

Hammerschmidt, J.; Friedrich, B.: Elektroschlackeschmelzen von aluminothermischen hergestellten Titan-Aluminiumlegierungen - eine Alternative zum Kroll-Prozess?, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte (BHM), 146. Jg. (2001) Nr. 5, 203-209

Noll, T.; Friedrich, B.; Meuser, H.; Budak, I.: „Auswahl und Bewertung von Werkstoffen zur Formgebung im teilflüssigen Zustand“, Gießerei 88 (2001), Nr. 8, 60-66

Qiu, K.; Chen, Q.; Winkler, P.; Krüger, J.: Behaviour of copper in refining of lead by fractional crystallization, Transaction of the Institut of Mining and Metallurgy, Section C, Mineral Processing and Extractive Metallurgy 110 (2001) C1-C61, C60-C62

Rombach, G.: Grenzen des Metallrecyclings, METALL 55. Jg. Nr.12/2001, 752-755

2002

Rombach, G.: Future availability of aluminium scrap, Light Metals 2002, TMS, 1011-1018

Sydykov, A.; Friedrich, B.; Arnold, A.: Impact of parameter changes on the aluminium recovery in a rotary kiln, Light Metals 2002, TMS Annual Meeting, 2002, 1045-1052

Müller, T.; Friedrich, B.: A new metallurgical process for recycling of discharged nickel-metalhydride-batteries, TMS 2002, Vol. 2, 25-36

Noll, T.; Friedrich, B.: Thixoforming raw ma-

terial development by means of optimized design of experiments (DOE), *Light Metals* 2002, TMS, 987-993

Rombach, G.; Zapp, P.; Kuckshinrichs, W.: The future of automotive aluminium, *Light Metals* 2002, 1003-1010

Rombach, G.; Zapp, P.; Kuckshinrichs, W.; Friedrich, B.: Zur langfristigen Aluminiumversorgung der Automobilindustrie, *Aluminium* 78. Jg., Heft 6, 432-438

Stopic, S.; Friedrich, B.; Fuchs, R.: Kinetics of Sulphuric Acid Leaching of the Serbian Nickel Lateritic Ore under Atmospheric Pressure, *Metalurgija-Journal of Metallurgy*, Nr. 3, Vol. 8, Beograd 2002, 235-244

Noll, T.; Budak, I.; Bleck, W.; Friedrich, B.: Einfluss und Bedeutung chemischer Entmischungen auf mechanische Eigenschaften thixogeformter Bauteile, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, Vol. 33 No. 11 (2002), 643-650

2003

Friedrich, B.: Metallurgie des Schmelzprozesses, Starck, A. von; Mühlbauer, A.; Kramer, C. (Hrsg.): *Praxishandbuch Thermoprozess-Technik*, Band II: Prozesse, Komponenten, Sicherheit, Vulkan Verlag GmbH, Essen, 2003, 3-10

Hammerschmidt, J.; Friedrich, B.; Stoephäus, J.-C.: Aluminiothermische Reduktion von Titanoxid, *Erzmetall* 56 (2003) Nr. 2, 82-93

Noll, T.; Friedrich, B.; Hufschmidt, M.; Modigell, M.; Nohn, B.; Hartmann, D.: Evaluation and Modeling of Chemical Segregation Effects for Thixoforming Processing, *Advanced Engineering Materials* 2003, 5, No. 3, 156-160

Stopic, S.; Friedrich, B.; Fuchs, R.: Sulphuric Acid Leaching of the Serbian Nickel Lateritic Ore, *Erzmetall* 56, Nr. 4, 2003, 204-209

Jessen, K.; Friedrich, B.; Rombach, G.: Al-foam - production, properties and recycling possibilities, *OEA Congress*, München, 2003, CD-ROM

Arnold, A.; Friedrich, B.; Lossin, A.: Equilibria in Pb-As-Sb-O-melts, *EMC* 2003, (accepted)

Stopic, S., Friedrich, B., Anastasijevic, N.: Kinetics of leaching of the serbian nickel lateritic ore, *EMC* 2003, (accepted)

Müller, T.; Friedrich, B.: Development of a new metallurgical process for closed-loop recycling of discarded Nickel-Metalhydride-Batteries, *EMC* 2003, (accepted)

Hecker, E.; Friedrich, B.: Recovery of lead and zinc from QSL- and IS-slag using hollow

electrode carbon insertion process, *EMC* 2003, (accepted)

Müller, T.; Friedrich, B.; Zapp, P.: Influencing the resource requirement in Copper primary production by technique variation, *EMC* 2003, (accepted)

Sauermann, R.; Friedrich, B.: Magnesium thin strip casting, *EMC* 2003, (accepted)

Jessen, K.; Friedrich, B.; Rombach, G.: Recycling of MMCs and Aluminium Foam, *EMC* 2003, (accepted)

Gürmen S.; Müller, T.; Friedrich B.; Duman I.: Slag systems in copper recycling from Cu-Mg scraps, *EMC* 2003, (accepted)

Jessen, K.; Friedrich, B.; Rombach, G.: Al-Foam Production Scrap - Source for Recycling, *MetFoam*, 23.-25.06.2003, Berlin, (to be published)

Krüger, J.: Pb-Zn Shaft Furnace - A Challenging Metallurgy, *EMC* 2003, (accepted)

Friedrich, B.; Köther, T.: The Use Phase in the Aluminium Mass Flow - An Approach for Integration, *EMC* 2003, (accepted)

Friedrich, B.; Niederle, A.: Recycling of Mg-Sludge: An Investigation Realise a Closed Loop of Magnesium, *EMC* 2003, (accepted)

Hübschen, B.; Krüger, J.: Fundamental Research on Deep Bed Filtration of Metals, *EMC* 2003, (accepted)