

IN REGELMÄSSIGER FOLGE stellen wir Ihnen an dieser Stelle die wichtigsten Institutionen, Institute, Verbände und Organisationen im Bereich der elektrothermischen Prozesstechnik vor. In dieser Ausgabe im Profil: IME – Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling der RWTH Aachen.

# IME – Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling

Das IME 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, Reinigung 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 Georessourcen und Materialtechnik. 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 im Jahr 1999 rückt die Prozesstechnik zur Entwicklung und Optimierung von Verfahren für komplexe Hochleis-

tungsmetalle in den Vordergrund. Hierbei verfolgt das IME das Ziel, neu entwickelte Verfahren ausgehend von anwendungsorientierten Grundlagenarbeiten experimentell bis in den Demonstrationsmaßstab zu erproben. Diese industriennahe Entwicklung erfolgt immer unter Berücksichtigung von Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. 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 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 schmelzflüs-

siger Phasen, oder auch die Bereitstellung einer aktuellen institutseigenen Bibliothek mit über 20.000 Büchern und Zeitschriften für Besucher.

Das IME verfügt über vielfältige, langjährige Kooperationen mit europäischen universitären Forschungseinrichtungen, von denen exemplarisch NTUA in Griechenland, MUL in Österreich, DonTu in der Ukraine, University of Maribor in Slowenien, UNL in Frankreich oder auch UB in Serbien zu nennen sind. Aufgrund der nationalen und internationalen Anerkennung decken die Projekte die gesamte Spannweite der Metallurgie und Metallraffination ab, wobei die Sektoren Leichtmetalle und hochschmelzende Metalle besondere Schwerpunkte bilden.

Alle Aktivitäten werden maßgeblich unterstützt und gefördert durch den Verein „Freunde des IME e.V.“ zur Förderung des Instituts für Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling. 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 mithilfe von Mitgliedsbeiträgen und zweckgebundenen Spenden. Zu den Mitgliedern zählen Unternehmen wie auch über 150 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.

Neben dem Institutsleiter und dem Oberingenieur Dr.-Ing. Reinhard Fuchs beschäftigt das Institut auf über 2.000 m<sup>2</sup> Fläche im Herzen von Aachen derzeit über 32 wissenschaftliche Mitarbeiter sowie 29



**Bild 1:** Außenansicht des IME

Mitarbeiter im technischen und Verwaltungsdienst. Darüber hinaus bildet das IME Auszubildende zu Industriemechanikern, Chemielaboranten sowie Kauffrauen für Bürokommunikation aus. Mit besonderer Freude verzeichnen wir ein starkes Interesse ausländischer Ingenieure, am IME zu forschen und zu promovieren.

Lediglich 20 % der Mitarbeiter werden über Landesmittel finanziert. Der überwiegende Teil der Mitarbeiter wird aus Drittmitteln bezahlt, die vom Land NRW, vom Bund, von der Europäischen Union und sonstigen Förderinstitutionen wie z. B. BMU, AiF und zu etwa 1/3 direkt aus der Industrie kommen.

Im Rahmen des wöchentlichen Lehrstuhlseminars stellen Studierende ihre Abschlussarbeiten vor. Dreimal pro Semester werden Industrievertreter als Referenten zum Industrieseminar eingeladen.

## LEHRE

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 praxisnah 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 in einem 6-semestrigen Bachelorstudiengang zum „Bachelor of Science in Werkstoffingenieurwesen“ und im aufbauenden 4-semestrigen deutsch- oder englischsprachigen Masterstudiengang zum „Master in Werkstoffingenieurwesen bzw. Metallurgical Engineering“ ausgebildet. Der Aufbau des Bachelorstudiums Werkstoffingenieur-

wesen legt ein solides Fundament in der Mathematik und den Naturwissenschaften Physik und Chemie. Vom ersten Semester an bereiten die fachspezifischen ingenieurwissenschaftlichen Grundlagenfächer auf eine spätere Vertiefung vor. Hierbei leistet das IME seinen Beitrag im Rahmen der Vorlesung „Metallurgie und Recycling der NE-Metalle“. 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. Im letzten Semester wird ein Betriebspraktikum für 12 Wochen absolviert. Somit lernen die Studierenden bereits während ihres Studiums die spätere Arbeitswelt kennen.

Im Masterstudiengang Werkstoffingenieurwesen wird neben einführenden, fachspezifischen Grundlagenfächern eine große Vielfalt an Vertiefungsrichtungen angeboten. Die Studierenden können aus einem Fächerkatalog für eine Vertiefungsrichtung mit je zwei Hauptvertiefungs- und einem Nebenvertiefungsfach entscheiden. Das IME bietet die Hauptvertiefungsfächer „Thermische Gewinnungsverfahren der Nichteisenmetalle“ und „Thermische Raffinationsprozesse für Nichteisenmetalle“ an. Hierbei werden die einzelnen verfahrenstechnischen Schritte metallurgischer Prozesse (unit operations), ihre theoretischen Grundlagen sowie die anlagentechnischen Details vorgestellt. Als Nebenvertiefungsfach können die Studenten eins der folgenden Module auswählen: „Hydrometallurgie“, „Ressourceneffizienz beim Metallrecycling“, Planung und „Wirtschaftlichkeit metallurgischer Anlagen“ und „Metallurgie und Prozesstechnik von Aluminium-Schmelzen“ angeboten. 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 arbeitenden Firmen in Deutschland 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 Südafrika, Österreich, die Schweiz und Ostdeutschland.

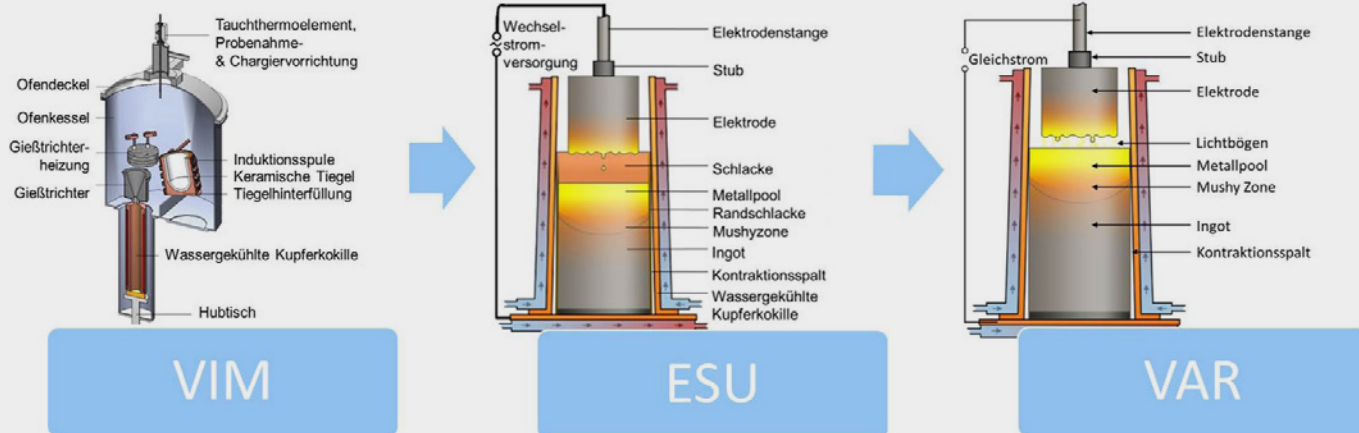
## ELEKTRISCHE AGGREGATE DES INSTITUTS

### Triple Melt Route im Demo-Maßstab

Da vor allem in der Luft- und Raumfahrt höchste Sicherheitsanforderungen zu erfüllen sind, ist die genaue Einhaltung enger Toleranzen in der chemischen Zusammensetzung sowie die Minimierung möglicher Erstarrungsfehler und Materialdefekte während der Legierungsherstellung unabdingbar.

Um das Risiko des Materialversagens bestmöglich zu reduzieren, erfolgt die Herstellung moderner Hochleistungswerkstoffe durch das sogenannte, auf **Bild 2** dargestellte Triple Melt Verfahren. In einem ersten Schritt wird die grundlegende Zusammensetzung der Legierung durch das konstituierende Erschmelzen im Vakuuminduktionsofen (VIM) erzeugt, während im darauffolgenden Elektroschlackeuerschmelz- (ESU) und Vakuumlichtbogenumschmelzprozess (VAR) die notwendige Gefügehomoogenität und der erforderliche Reinheitsgrad sichergestellt werden. Zudem wird über die kontinuierliche Weiterentwicklung der Legierungszusammensetzung und durch Optimierung der Herstellungsverfahren eine steile Verbesserung der Materialeigenschaften angestrebt.

Um alle Teilprozesse des Triple Melt Verfahrens optimieren zu können, werden am IME im 100 kg Maßstab für alle Prozesse sowohl theoretische als auch praktische Untersuchungen durchgeführt sowie neuartige Verfahrensansätze entwickelt. Während des Vakuuminduktionsschmelzens liegt der Schwerpunkt auf der Entfernung schädlicher gasförmiger Komponenten wie beispielsweise Wasserstoff, Stickstoff oder Sauerstoff. Durch das Einschmelzen unter definierten atmosphärischen Bedingungen besteht ebenfalls die Möglichkeit den Verlust leicht flüchtiger (z. B. Mangan) oder



**Bild 2:** Triple Melt Verfahren

hoch reaktiver Elemente wie beispielsweise Titan oder Aluminium zu begrenzen und somit die chemische Zusammensetzung sehr genau einzustellen.

Das anschließende Umschmelzen der mittels VIM erzeugten Blöcke durch ein Schlackenbad und die sukzessive Erstarrung in einer wassergekühlten Kupferkokille, im sogenannten ESU-Verfahren, bildet anschließend den ersten Refinations- bzw. Reinigungsschritt. Durch den intensiven Kontakt zwischen flüssiger Schlacke und Metall erfolgen eine Tiefentschwefelung sowie eine signifikante Reduzierung des Gehaltes nichtmetallischer Einschlüsse. Deren Entfernung ist zwingend erforderlich, da solche Einschlüsse im späteren Bauteil unter Belastung potenzielle Stellen zu Rissbildung darstellen und somit ein Versagen hervorrufen können. Zudem resultiert aus der Wasserkühlung der Kokille eine hohe Wärmeabfuhr, was eine homogene Erstarrungsstruktur (Verringerung von Seigerungen) der Legierungen begünstigt.

Um die Reinheit der so erzeugten Werkstoffe nochmals zu erhöhen, erfolgt abschließend das Umschmelzen der mittels ESU erzeugten Blöcke im VAR-Prozess. Durch das Umschmelzen unter Vakuum wird somit erneut eine Entfernung unerwünschter leicht flüchtiger Elemente erreicht. Zudem erfolgt durch Dichtentrennung ein Aufschwimmen nichtmetallischer Einschlüsse, welche im ESU-Verfahren nicht

von der Schlacke aufgenommen wurden, auf dem flüssigen Metallpool. Durch die dort vorherrschende Strömung sammeln sich diese am Rand des Blockes und können anschließend nach der Erstarrung mechanisch durch Abdrehen des Blockes entfernt werden. Eine weitere Homogenisierung der Erstarrungsstruktur findet auch hier statt, wodurch letztendlich ein sehr dichtes, homogenes Gefüge mit einer sehr geringen Anzahl an Fremdpartikeln und Verunreinigungen erzeugt werden kann. Hierbei liegen aktuelle Forschungsarbeiten auf der Einstellung optimaler Prozessparameter sowie auf der Untersuchung der Refinationswirkung dieses Prozesses für unterschiedliche Legierungssysteme.

**Mikrowelle**

Als neuestes Aggregat wurde am IME eine Mikrowellen-Anlage in Betrieb genommen. Die Anlage wird dafür verwendet, Dünnschichtmodule aus der Photovoltaikindustrie zu recyceln, indem die Funktionsschichten durch selektive Einkopplung der Mikrowellen abdestilliert werden.

Wesentliches Merkmal der links auf **Bild 3** zu sehenden Anlage sind die 8 Mikrowellen-Generatoren, sogenannte Magnetrons, mit einer Leistung von jeweils 6 kW, die symmetrisch um die Kammer angeordnet sind. Durch diese Bauweise wird eine größtmögliche Feldhomogenität erreicht. Jedes der Mag-

netrons lässt sich jedoch auch separat ansteuern und die jeweilige Leistung anpassen. Die Kammer ist so ausgelegt, dass sowohl unter Schutzgas als auch unter Vakuum gearbeitet werden kann. Darüber hinaus ermöglicht eine Wärmebildkamera die kontinuierliche Überwachung der Proben temperatur (Bild 3 rechts). Die Kühlung der empfindlichen Elektronik wird durch eine neu aufgebaute Rückkühlanlage sichergestellt.

**Mini-Drehtrommelofen**

Der Mini-Drehtrommelofen (Mini-DTO) ist ein kleiner widerstandsbeheizter Ofen mit einem Schmelzvolumen von 0,3 l und ist somit vom Volumen her vergleichbar mit anderen IME-Öfen im Labormaßstab. Der Ofen besteht aus einem Stahlrahmen, welcher einen widerstandsbeheizten Graphittiegel enthält und thermisch isoliert ist. Der Ofen ist mit einem manuell zu öffnenden Deckel verschließbar.

Als herausragende Eigenschaften des Ofens sind die folgenden zu nennen:

- Der gesamte Ofen kann kontinuierlich in einem Winkel zwischen 0° und 65° gekippt werden.
- Der Graphittiegel kann rotieren, wobei die Rotationsgeschwindigkeit stufenlos zwischen 0 und 40 U/min eingestellt werden kann. Diese Rotation wird dabei durch einen Elektromotor sichergestellt.
- Der Heizprozess wird nicht durch die

Bewegung des Ofens beeinflusst oder gar beeinträchtigt.

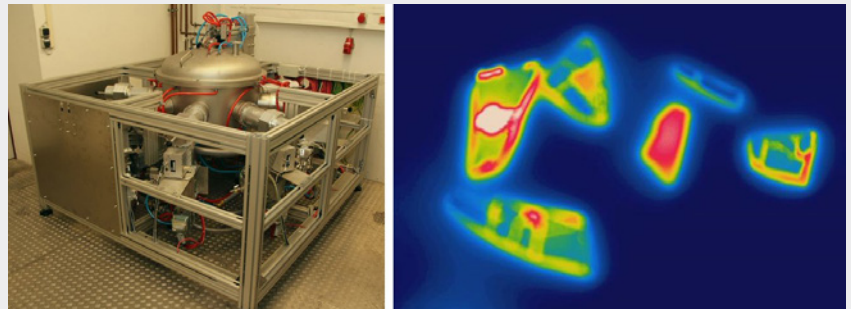
- Im Graphittiegel kann eine Temperatur von 1.200 °C erreicht werden.

Der Ofen verfügt über ein elektrisches Steuerungssystem, mit dem Temperaturprofile, Rotationsgeschwindigkeit und Neigung des Ofens kontrolliert werden können. Der Mini-DTO arbeitet unter Argon als Schutzgas. Hierfür ist der Gaseinlass in den Ofendeckel integriert. Durch ein weiteres Loch im Ofendeckel können Thermoelemente oder Gasmesssysteme in den Ofen eingeführt werden. Dies ist genauer auf **Bild 4** zu sehen.

### Schmelzkristallisation zur Herstellung hochreiner Metalle

Das IME-Labor zur Herstellung hochreiner Metalle ist mit unterschiedlichen Aggregaten ausgestattet. Insbesondere „Hightech“-Metalle, wie Indium, Germanium, Selen, Tellur usw. werden hier gereinigt. Der extrem hohe Siedepunkt solcher Elemente erschwert die Raffination durch Vakuumdestillation. Deshalb kommen andere Verfahren, wie z. B. die fraktionale Raffination durch Zonenschmelze, „Kühlfinger“-Kristallisation oder auch Einkristall-Methoden infrage. Diese Verfahren haben eine sehr hohe Selektivität sowie einen deutlich geringeren Energieverbrauch gegenüber der Destillation. Aber auch andere Metalle wie z. B. Aluminium oder Silizium können u. a. durch das Zonenschmelz-Verfahren raffiniert werden. Die am IME vorhandenen Anlagen des High-Purity-Metall-Labors sind folgende:

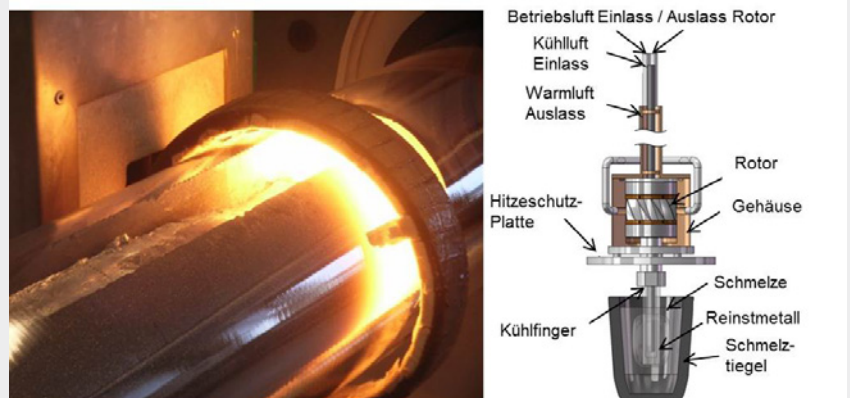
- Zonenschmelze: Das Prinzip des Zonenschmelzens besteht darin, dass beim Erstarren einer Schmelze die Konzentration an Verunreinigungen in dem Kristall (Produkt) geringer ist als in der Schmelze. Die Methodik basiert auf der Einstellung einer schmalen, geschmolzenen Zone, in **Bild 5** erkennbar, die langsam von dem Ende eines Barrens zum anderen Ende bewegt wird. Die Schmelzzone wird häufig durch ein Hochfrequenz-Induktionsfeld (10 kHz bis 1 MHz) erzeugt, welches gleichzeitig ein zusätzliches elektromagnetisches



**Bild 3:** Mikrowelle zum Recycling von Solarpanels; rechts im Bild: selektiv angekoppeltes Einsatzgut



**Bild 4:** Mini-Drehtrommelofen

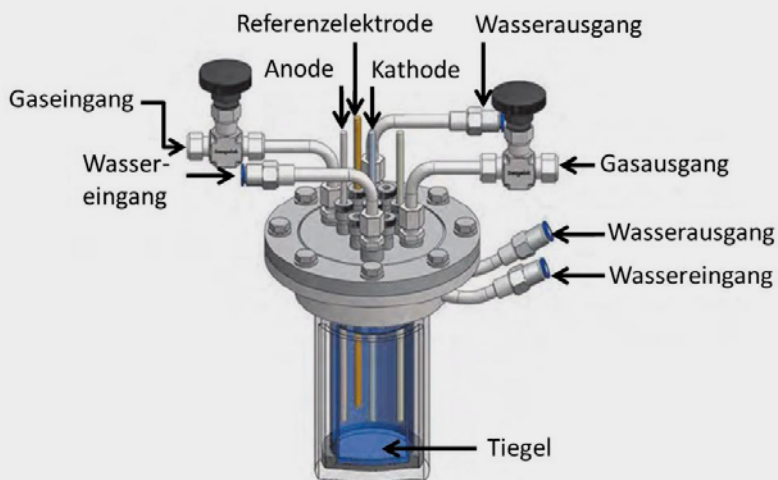


**Bild 5:** Aggregate zur Schmelzkristallisation; links: Zonenschmelzen, rechts: Kühlfinger

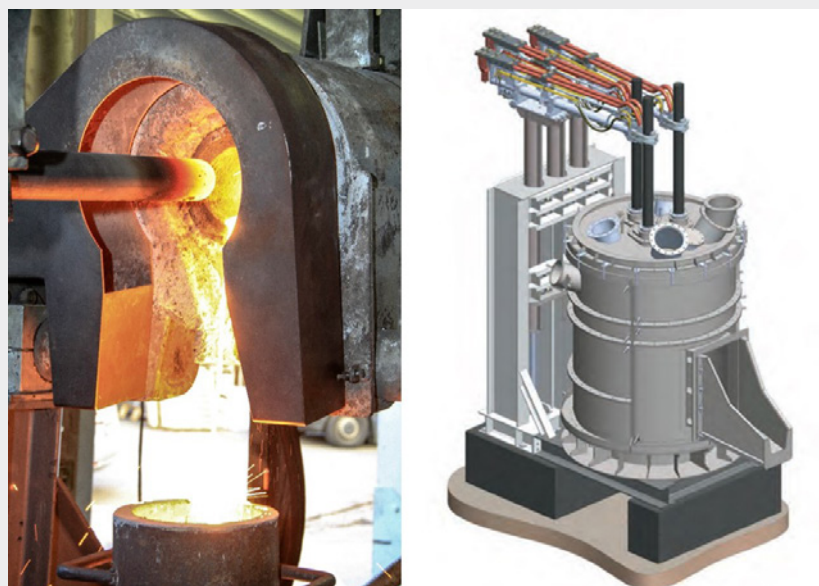
Rühren der Schmelze bewirkt.

- Statischer Kristallisator: Ähnlich den Grundprinzipien des Zonenschmelzens wird in diesem Aggregat durch fraktionale Kristallisation eine effektive und hohe Raffination von Metallen ermöglicht. Das Konzept erlaubt dieses ohne jegliche beweglichen Teile. Dazu wird der Ofen in eine Vielzahl an Heizzonen eingeteilt. Ein ausgeklügeltes

Steuerungssystem ermöglicht es, die Zonen einzeln auf die gewünschte Temperatur zu heizen sowie danach ein frei einstellbares Abkühlprofil automatisch abfahren zu lassen. Je nach Leitfähigkeit des Metalls können hierdurch starke oder schwache Temperaturgradienten eingestellt und dann über die Software zeitlich in ihrer absoluten Höhe abgesenkt werden.



**Bild 6:** Schmelzflusselektrolyse im Labormaßstab



**Bild 7:** Elektrolichtbogenöfen; links: kipper ELBO im Labormaßstab, rechts: ELBO im Pilotmaßstab

■ **Kühlfinger Kristallisator:** Hierbei handelt es sich um ein Verfahren mit einer rotierenden innengekühlten Kristallisationseinheit, die in die zu reinigende Schmelze getaucht wird. Die Kühlfinger-Methode, in Bild 5 dargestellt, wurde ursprünglich zur Raffination von Aluminium entwickelt und kontinuierlich für diesen Werkstoff verbessert. Das Ziel dieser Entwicklung war die Entfernung von eutektischen Verunreinigungen, wie Fe, Si, Cu und Mg, sowie

peritektischen, wie Ti, V und Zr, weil die Reinigung peritektischer Verunreinigungen durch Zonenschmelzen nicht realisierbar ist. Zuerst wird das unreine Metall geschmolzen, anschließend wird ein Kühlkörper in dieser Schmelze eingesetzt, während ein kaltes Medium in diesem Körper zur Kühlung strömt, woraufhin sich hochreines Metall auf der Oberfläche des Kühlkörpers abscheidet. Eine optimierte Rotationsgeschwindigkeit und ein angepasster Kühlmittel-

durchfluss stellen sicher, dass sich das hochreine Metall glatt und ohne Einbau von Restschmelze auf dem Kühlfinger niederschlägt, von wo es anschließend abgezogen werden kann.

### Schmelzflusselektrolyse

Für die kostenintensive Herstellung von Titanlegierungen über den Krollprozess werden alternative Herstellungsrouten gesucht. Hierbei wird durch die Schmelzflusselektrolyse eine gute Möglichkeit geboten. Ebenso werden für die Herstellung von seltenen Erden Schmelzflusselektrolysen verwendet. Trotz intensiverer Forschung der letzten Jahre ist dieser weit verbreitete Prozess in China noch auf einem relativ rudimentären Niveau. Die in **Bild 6** dargestellte Elektrolysezelle am IME verfügt über ein Volumen für bis zu 500 ml Elektrolyt. Diverse Elektrolyten auf Chlor- oder Fluorsalzbasis können eingesetzt werden. Die anodische Gasentwicklung wird von zwei Seiten betrachtet. Zum einen werden durch elektrochemische Messungen wie Stromdichte-Potenzialkurven und zyklischer Voltammetrie die relevanten Elektrodenvorgänge durch Messen von Elektronenübergängen bestimmt. In kurzer zeitlicher Verzögerung können durch moderne Abgasanalytik die gasförmigen Reaktionsprodukte kontinuierlich aufgezeichnet und den elektrochemischen Effekten zugeordnet werden. Die elektrochemischen Messungen werden durch einen Laborpotenziostaten im Regelbetrieb bei 10 V und bis zu 5 A durchgeführt. Bei Bedarf können höhere Ströme von bis zu 40 A eingestellt werden. Bei der Abgasanalyse handelt es sich um ein FT-IR-Spektrometer, das in der Lage ist bis zu einem Messwert pro Sekunde im ppm-Bereich für alle wesentlichen infrarotaktiven Gase zu berechnen.

### Hochdruckautoklav als Laugungsaggregat

Eines der am IME zur Verfügung stehenden Laugungsaggregate ist ein widerstandsbeheizter Hochdruckautoklav, ausgelegt für Laugungsreaktionen von bis zu 300 °C bei einem maximalen Arbeitsdruck von 100 bar. Eine automatische Temperaturregelung sorgt über den elektrischen Heiz-

mantel oder die im Deckel angebrachte Kühlspirale für die Regulierung der Temperatur sowohl bei exothermen als auch endothermen Reaktionen. Das Reaktionsgefäß hat eine Kapazität von einem Liter und besteht, wie alle mit dem Laugungsmittel in Kontakt stehenden Bauteile, aus Titan. Hierdurch sind Versuche sowohl mit aggressiven Säuren als auch Basen umsetzbar. Der Rührer wird elektrisch betrieben und sorgt neben im Inneren des Gefäßes angebrachten Wellenbrechern für die nötige Durchmischung. Zudem verfügt der Autoklav über ein Probenentnahme- und Zudosierungssystem, wodurch auch während eines Versuches laufend Proben genommen und weitere Reaktanden hinzugegeben werden können. Die genommenen Proben werden dabei in einem Probenkühler rasch abgekühlt, um den Reaktionsfortschritt zu unterbinden. Dadurch können Kinetikuntersuchungen auch bei Hochdrucklaugungen realisiert werden. Neben der Veränderung des Laugungsmediums ist ebenso die Einleitung reaktiver Gase und somit die Veränderung der Atmosphäre während der Laugung möglich. Dies bietet zum Beispiel bei der Laugung von sulfidischen Verbindungen unter Sauerstoffzugabe den Vorteil den Schwefel zu oxidieren und vom Metall abzutrennen. Anders als bei der Oxidation in der Pyrometallurgie (sog. Rösten) entsteht bei der Drucklaugung kein Abgas, sondern direkt Schwefelsäure.

### Elektrolichtbogenöfen

Sowohl in der Eisen- und Stahlindustrie als auch in der Nichteisenindustrie werden Elektrolichtbogenöfen eingesetzt. Für Grundlagenversuche stehen am IME zwei Gleichstrom-Elektrolichtbogenöfen im Labormaßstab zur Verfügung. Beide verfügen über eine maximale Leistung von 100 kW ( $U_{\max} = 100 \text{ V}$ ,  $I_{\max} = 1.000 \text{ A}$ ). Die Tiegelgröße im kippbaren Lichtbogenofen beträgt 6 Liter, die Graphitelektrode hat einen Durchmesser von 50 mm, die Boden-

elektrode ist aus Kupfer und wird mit Wasser gekühlt. Der zweite Ofen ist nicht kippbar, lässt sich jedoch geschlossen betreiben. Die Chargierung erfolgt in diesem Fall über eine Zellradschleuse und eine 50 mm Hohlelektrode. Der größte Ofen des IME ist ein Lichtbogenofen im Pilotmaßstab. Dieser in **Bild 7** dargestellte Ofen ist in spezieller modularer Weise schachtförmig aufgebaut, um für die unterschiedlichsten Anwendungsfälle einsetzbar zu sein. So ist sowohl direktes Lichtbogenschmelzen als auch der Betrieb über Widerstandsbeheizung durch in die flüssige Phase eingetauchte Elektroden möglich. Die Betriebsweise des Ofens kann sowohl offen als auch geschlossen erfolgen. Die Beschickung kann einerseits über den Deckel, andererseits über eine Hohlelektrode erfolgen. Außerdem steht ein Einblassystem für feinkörniges Material zur Verfügung. Das Kühlsystem ist variabel ausgelegt und gliedert sich in vier Zonen. Die Abmessungen des Ofens betragen: Höhe 3,2 m, Durchmesser 2,2 m, Herdinnendurchmesser 1,6 m. Hieraus ergibt sich ein Schmelzvolumen von ca. 1,5 m<sup>3</sup>. Die Innenhöhe von 2 m erlaubt eine Schachtofen-Fahrweise, die unter anderem das Vorwärmen von chargiertem Schrott ermöglicht. Die Stromversorgung wurde mit Transformator, Gleichrichter und Netzfilter flexibel ausgelegt. So ist entweder ein Gleich-, Wechsel- oder Drehstrombetrieb möglich. Es können bis zu drei Deckel-Elektroden und eine im Ofenboden integrierte Elektrode, die aus einem Kupferblech in Kombination mit leitendem FF-Material besteht, eingesetzt werden. Die Trafo-Anschlussleistung beträgt 1 MVA (max. 10 kA bei 100 VDC / 5 kA bei 200 VDC). Verschiedene Deckelaufsätze mit einer, zwei oder drei Durchführungen für die gewünschte Elektrodenanzahl stehen zur Verfügung. Die Ofensteuerung und -regelung wurde den verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten angepasst und weist über 200 PLT-Stellen (Sensoren/Aktoren) auf. Damit ist das Aufstellen einer geschlossenen Energiebilanz möglich. Je nach Anwen-

dungsfall ist die Anlage bei Bedarf anpassbar und erweiterbar. Im Blickpunkt der Forschungsarbeiten am IME steht zurzeit unter anderem die direkte carbothermische Wertmetallreduktion aus der beim Erschmelzen von Tiefsee-Manganknollen entstehenden Schlacke. Hierbei handelt es sich um eine silikat-, eisenreiche Manganschlacke; die zu reduzierenden Wertmetalle sind im Wesentlichen Nickel, Kupfer und Kobalt. Der Ofen wird hierbei als Schlackenreduktionsofen in SAF Fahrweise betrieben. Für die Weiterverarbeitung von Rotschlamm werden ebenfalls Versuche zur Eisengewinnung durchgeführt. Mit Koks als Reduktionsmittel wird der Hämatitgehalt im Rotschlamm nahezu vollständig zu metallischem Eisen reduziert. Der Betrieb in offener Fahrweise mit eingetauchter Elektrode (SAF) ermöglicht zeitgleich das Hinzufügen von weiteren Schlackenbildnern, um die Eigenschaften der Schlacke hinsichtlich ihrer nachfolgenden Verwendung in der Baustoffindustrie oder zur Herstellung von Glasfasern einzustellen. In vorhergehenden Arbeiten zur Rotschlammverarbeitung wurde ebenfalls die carbothermische Reduktion von Al und AlSi-Legierungen getestet. Dazu brannte ein offener Lichtbogen in einer Schüttung als  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2/\text{Koksgrus}$ -Pellets und erzeugte ausreichend hohe Temperaturen für eine gemeinsame Reduktion von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{SiO}_2$  zu einer AlSi-Vorlegierung. Im geschlossen Lichtbogenofen unter Argonatmosphäre wurde die carbothermische Reduktion von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit Gasphasenabscheidung von reinem Aluminium untersucht.

Kontakt:

**Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernd Friedrich**  
Leitung und Geschäftsführung  
IME Metallurgische Prozesstechnik und Metallrecycling  
RWTH Aachen  
Intzestr. 3  
52056 Aachen  
Tel.: 0241 / 8095851  
www.ime-aachen.de