

Optimierung von Recycling-Prozessen durch Variationen in Prozess- und Konstruktionstechnik eines Submerged Arc Furnaces (Elektroreduktionsofen)

Roland König, Martin Köneke, Andreas Liedtke und Ralf Nörthemann

1.	Klassischer Submerged Arc Furnace: Erzeugung von Ferro-Legierungen, metallurgischem Silizium, Kalzium-Karbid, Roheisen.....	308
2.	Technologische Trends.....	309
3.	Verfahrensvariationen.....	310
4.	Flexibilität.....	314
5.	Pilotanlagen und Datenerfassung.....	316
6.	Zusammenfassung.....	317
7.	Quellen.....	318

Schon seit vielen Jahren wird der Submerged Arc Furnace (SAF) zur *Reinigung* von Schlacken gerade, aber nicht nur, im Nichteisenbereich verwendet. Vor etwa zwei Jahrzehnten wurde die energieintensive Verglasung von Schlacken untersucht. In den letzten Jahren lag der Fokus auf sehr individuellen Anforderungen von diversen Recyclingprozessen: Ob Einschmelzen von (Stahlwerks-) Stäuben, Reduktion von Schwermetallen, Umschmelzen, Einsatz von Reverts, selektives Verdampfen oder zur Homogenisierung von Prozessen, stets antwortete die Ofentechnik mit Variationen auf diese speziellen Herausforderungen. Dieser Beitrag soll an Hand von Beispielen aufzeigen, wie Variationsmöglichkeiten den Submerged Arc Furnace an die Besonderheiten und Individualität der Recyclingprozesse anpassen: unter anderem verschiedene Ofenformen, Typen von Elektroden, der gezielte Eintrag von Materialien z.B. durch Lanzen, die Kombination mit vorgeschalteten Aggregaten, die Wahl von Gleichstrom- oder Wechselstromeintrag oder verschieden hoher Energiedichten. Modulare Gestaltung, sinnvolle Leistungsreserven und Überwachungstechnologie oder der Einsatz von variablen Pilotanlagen, die exemplarisch vorgestellt werden, stellen die für Recyclingprozesse meist notwendige Flexibilität sicher.

1. Klassischer Submerged Arc Furnace: Erzeugung von Ferro-Legierungen, metallurgischem Silizium, Kalzium-Karbid, Roheisen

Der heute am ehesten unter dem Begriff Submerged Arc Furnace (SAF) bekannte Elektro-Reduktionsofen stammt letztendlich vom Hochofen ab, nur dass er wie ein Elektro-Lichtbogen-Ofen (Elektrischer Arc Furnace, EAF) elektrisch betrieben wird. Die früher geläufige Bezeichnung Elektro-Niederschachtofen deutet darauf hin. Und so waren es auch Roheisen und Kalzium-Karbid, die zu Beginn der Karriere des SAF im Ofen gewonnen wurden. Recht bald erweiterte sich das Produktportfolio vom Kalzium-Karbid hin zu Ferro-Legierungen; und somit war auch die Brücke zwischen der Eisen-Metallurgie und der Chemie gebaut. [4]

Wenn man überhaupt von einem klassischen SAF sprechen kann, so besitzt er ein rundes Gefäß und drei Elektroden. Der Schmelz- und Reaktionsprozess findet dabei unterhalb des Möllers statt oder im Schlackenbad. Der physikalische spezifische elektrische Widerstand von Möller und/oder Schlacke bildet dabei das Medium zur Erhitzung, wenn Spannung angelegt wird und Möller oder Schlacke von Strom durchflossen werden. Es handelt sich also um eine Widerstandserwärmung.

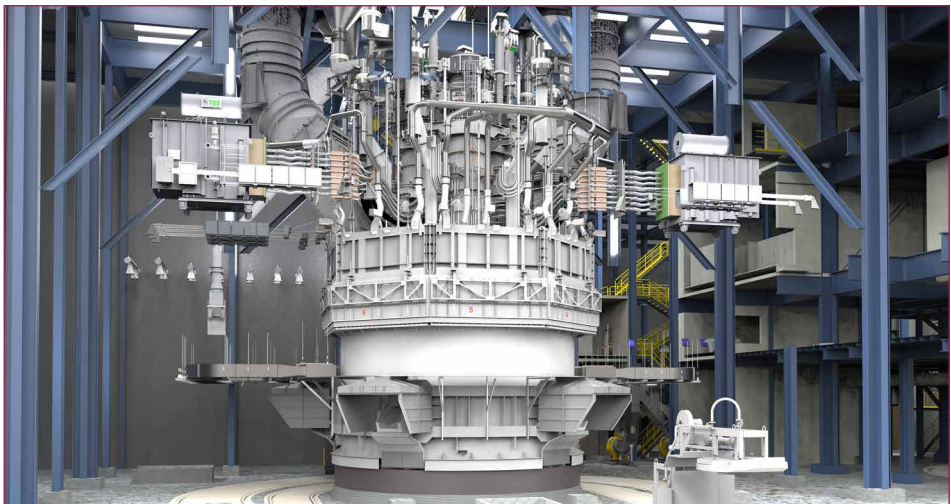


Bild 1: Moderner halbgeschlossener Submerged Arc Furnace mit Energiezuführung

Der Energieeintrag erfolgt dabei vom Transformator über teilweise flexibel ausgeführte Hochstromleitungen und über Stromrohre zu den Elektrodenhalterungen. Diese bestehen im Wesentlichen aus zwei Baugruppen: der Nachsetzvorrichtung im oberen Teil, mit denen die Elektrode entsprechend des Verbrauchs weiter nach unten gedrückt wird, um möglichst immer eine konstante Position der Elektrodenunter Spitze zu erreichen und dem unteren Teil, welcher die Aufgabe hat, über die Kontaktbacken den Strom auf die eigentliche Elektrode zu übertragen. [5]

Im Detail lässt sich dieses System noch weiter differenzieren: Dazu sind bekannt der beim EAF übliche seitliche *Elektrodenstragarm* mit und ohne Nachsetzvorrichtung – beim SAF vor allem bei DC- und Kleinöfen verwendet –, der im Gebäude stehend oder hängend über dem Ofen angeordnete sogenannte *Elektrodenstrang* – der Klassiker beim SAF – und der *Kompakt-Elektrodenstrang*, bei dem Nachsetzvorrichtung und Kontaktbackenvorrichtung kombiniert sind – bewährt u.a. bei leistungsstarken DC-Öfen.



Bild 2: Elektrodenstragarm, Elektrodenstrang und Kompakt-Elektrodenstrang im Vergleich

Elektrisch funktioniert diese Form des Energieeintrags sowohl mit Gleichstrom- als auch mit Wechselstromsystemen. Die Präferenzen dazu werden später beschrieben.

2. Technologische Trends

Einige Bauteile rund um die kupfernen Kontaktbacken werden zunehmend aus anti-magnetischen Materialien gefertigt, wobei meist das besonders effektive Kupfer gewählt wird, um elektrische Verluste durch Ummagnetisierungs-Effekte zu vermeiden. Diese Ausführung ist jedoch teurer gegenüber austenitischen Stählen, so dass sie vorwiegend bei stromintensiven Prozessen zum Einsatz kommt.

Ausgehend von Ofenbauformen für schlackereiche Prozesse wie Ferro-Nickel begannen bereits in den 1960er Jahren Einsätze von SAF für Absetzprozesse, wie z.B. die Reinigung von bleihaltigen Schlacken z.B. im Werk Metallurgie Hoboken (heute Umicore) in Belgien oder von Schlacken aus der Kupferherstellung z.B. im Werk Hamburg der Norddeutschen Affinerie, der heutigen Aurubis AG. [1]

Parallel dazu fanden immer mehr neue Verfahren und Komponenten Einzug in den SAF. Ausgehend vom konkreten Aufgabenprofil, sei es Einschmelzen, Umschmelzen, Absetzen, Verdampfen, selektive Behandlung oder z.B. Homogenisieren, werden die geeigneten Komponenten und Verfahrenswege ausgewählt.

3. Verfahrensvariationen

Zum Einschmelzen von Materialien, insbesondere von metallhaltigen Stäuben, aber auch zur Herstellung und zum Recyceln von Materialien wie Steinwolle, eignen sich am besten Öfen mit einer hohen Energiedichte. Das einzuschmelzende Material wird dabei vorzugsweise in den Bereich zwischen oder rund um die Elektroden chargiert. Dort bildet sich der heißeste Bereich des Schlackenbades aus, vor allem aber herrschen hier aufgrund der thermischen Verhältnisse Schlackenströmungen vor, die eine Aufnahme des eingetragenen Materials erleichtern und den Staub unter die Schlackenoberfläche ziehen. Als Maß für die Energiedichte in erster Näherung hat sich die sogenannte *Herdbelastung* etabliert, ein eigentlich trivialer Wert, nämlich der Quotient aus der Nennleistung des Ofens in Kilowatt und der Herdoberfläche, in Einheiten kW/m^2 . Als Anhaltswert für das Einschmelzen können Werte von 300 kW/m^2 bis 600 kW/m^2 genannt werden. Die Herausforderung ist hierbei die Verwendung eines standhaften Ausmauerungs- und Kühlsystems. Die Bezeichnung System ist bewusst gewählt. Ein System, weil gerade bei den hohen Energiedichten die Kühlung so beschaffen sein muss, dass der Ofen nicht ausgekühlt wird, aber die Badtemperaturen im Kontaktbereich mit der Ausmauerung so niedrig sind, dass chemische Prozesse zwischen Schlacke und Feuerfestmaterials deutlich reduziert werden. Solch ein System erfordert eine optimale Abstimmung von Badtemperatur, Wärmedurchgang der Ausmauerung und Kühlleistung. [2]

Bei Eintrag von Stäuben soll die bestmögliche Aufnahme des Staubs in die Schlacke erreicht werden. Dies geschieht entweder durch Chargieren möglichst direkt in den bzw. neben den Lichtbogen. Oder man verwendet Hohlelektrodensysteme (HES), welche den Eintrag mittels Förder- oder meist eher nur Sperrgas direkt in das Zentrum des Lichtbogens unterhalb der Elektrode ermöglicht. Bei kleineren Öfen bis etwa 10 MW geht der Trend dabei eher zum Hohl-Elektroden-System, bei größeren Öfen hat sich das Chargieren durch mehrere Beschickungsrohre in die Region des Lichtbogens in den letzten zehn Jahren etabliert, insbesondere in Verbindung mit der Gleichstromtechnologie, die dann auch meist nur mit einer Zentralelektrode arbeitet. Dabei wird dann die gesamte Energie in der Ofenmitte konzentriert.

Im Gegensatz zu Anlagen vergangener Generationen ermöglichen leistungsstarke Thyristoren im Zusammenhang mit

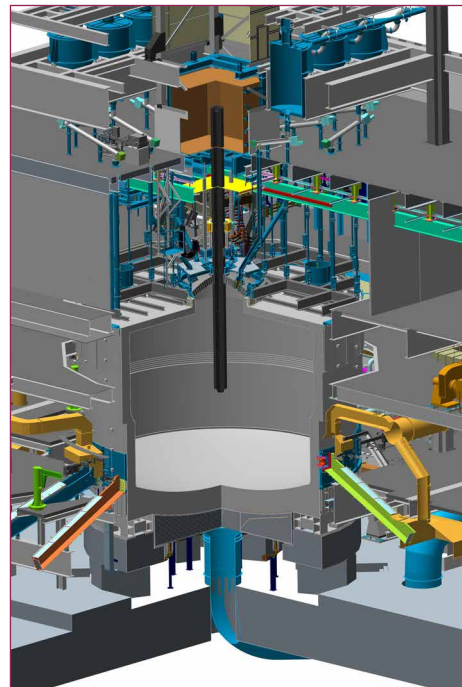


Bild 3: Geschlossener DC-Submerged Arc Furnace mit zentraler Elektrode, ohne Hohlelektroden-System

leistungsstarker Steuerungssoftware heute stabile Lichtbögen ohne große mechanische Regelbewegungen der Elektroden.

Da die Konzentration der Energie in der Ofenmitte bei solchen Prozessen – Einschmelzen, insbesondere von staubförmigem Material – grundsätzlich angezeigt ist, wird bei AC-Prozessen mit in der Regel drei Elektroden diese Art der Energieverteilung dadurch erreicht, dass ein besonders kleiner Elektroden-Teilkreis gewählt wird, auf dem die Elektroden angeordnet sind.

Das direkte Einschmelzen von staubförmigen Reststoffen macht ein aufwändiges Agglomerieren z.B. durch Sintern, Pelletieren oder Brikettieren überflüssig. Die Schlacke ist meist als solche das Produkt mit guten Eluat-Eigenschaften.

Sollten die Einsatzmaterialien allerdings einen hohen Metallgehalt aufweisen, so kann es sinnvoll sein, sozusagen *inerte* Schlacken zu verwenden. Das bedeutet, dass eine gezielt zusammengesetzte/ausgewählte Schlacke nur als Schmelzmedium und Energieträger im Ofen eingesetzt wird und möglichst am Prozess kaum teilnimmt. Nichtsdestotrotz sind solche Schlacken nach einiger Zeit auszutauschen.

Ziel solcher Prozesse ist ein Inertisieren, Kompaktieren oder Konditionieren der Reststoffe.

Eine etwas andere Zielrichtung beim Recyceln ist hingegen das Absetzen von Metall und Stein aus einer Primärschlacke, besser bekannt als *Slag-cleaning*. Hierbei ist eine möglichst ruhige Prozessführung gewünscht, um ein Absetzen von Metallteilchen in der Schlacke zu ermöglichen. Daneben laufen einige Reduktionsprozesse an den Kontaktflächen mit Kohlenstoff ab. Den ruhigen Ofenbetrieb erreicht man durch mäßige Herdbelastungen bis maximal 150 kW/m^2 und entsprechend lange Verweilzeiten im Ofen. Unterstützt werden können solche Prozesse durch zusätzliches Rühren, z.B. magnetinduziert. [7]

In Fällen mit geringen und energiearmen Restreaktionen, aber hohen Stoffströmen, würde sich die Notwendigkeit großer Ofendurchmesser/-volumen mit niedriger Nennleistung und daher sehr geringen Herdbelastungen ergeben. Um in diesen Fällen die Bildung von inaktiven *Tot-Zonen* zu vermeiden, wechselt man in solchen Fällen die Ofenbauform von klassisch rund auf rechteckig. Die Elektroden sind dann hintereinander angeordnet. Platziert man dann Ein- und Auslauf gegenüberliegend an den kurzen Stirnseiten, so erhält man einen maximalen Weg der Schlacke durch den Ofen.

Bei größeren Öfen, was bei diesem Ofentyp mit Ofengefäßlängen über etwa 15 m bis 20 m definiert werden kann, werden die Elektroden teilweise versetzt angeordnet, in einer Art Zick-Zack-Linie. Mit dieser Lösung wird der Volumenstrom über die ganze Ofenbreite besser vom Wirkungsbereich der Elektroden erfasst und der Reaktionsraum vergrößert. Eine weitere Steigerung ist der Einsatz von sechs statt drei Elektroden. Bei dieser Variante, ansonsten eher bei großen FeNi-SAF bekannt, sind bei der üblichen Schaltung jeweils zwei Elektroden an einer Phase des Drehstromnetzes angeschlossen. Das ermöglicht eine gute Regelung der Elektroden. Auch sechs Elektroden können sinnvoll versetzt angeordnet werden.

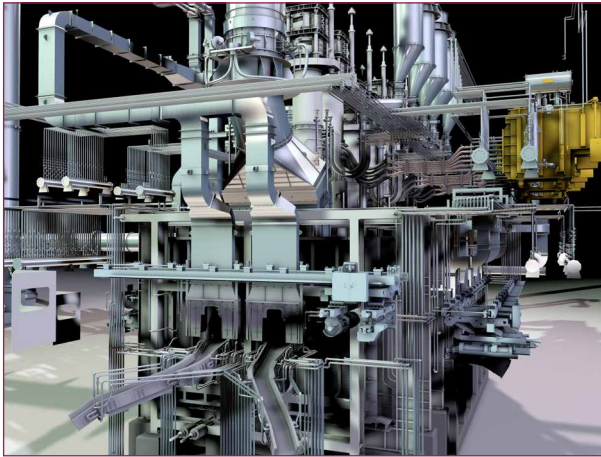


Bild 4:

24 MVA-6-Elektroden-Rechteck-Submerged Arc Furnace zur Schlacken- und Mattebehandlung

Soll das Produkt des Recyclingprozesses möglichst homogen sein, kommt auch ein zusätzlicher Ofen in Frage, der im Wesentlichen nur die Temperatur vergleichmäßig und die Vermischung vollendet, der Homogenisierungs-ofen. Meistens wird mit solchen Anlagen eine Qualitätssteigerung angestrebt, in dem Schwankungen der Zusammensetzungen oder der physikalischen Eigenschaften eines Produktes minimiert werden.

Man nutzt einen Ofen mit z.B. einem dreifachen Volumen einer Stundenproduktion als Durchlauf-ofen. Durch das große, weitgehend gleichbleibende Volumen werden *Spitzen* abgefangen oder sozusagen *verdünnt*. Die Ofenbauform hat dann eher mehrere Elektroden mit recht großem Elektrodenabstand für eine gute Stabilisierung der Schmelzwärme und das Vermeiden von Anbackungen an den Seitenwänden, die das nutzbare Volumen ja verringern würden und kontraproduktiv wären. Auf diese Weise können sehr gleichbleibende Produktqualitäten erzielt werden.

Die Option ist auch als Kombi-Ofen bekannt. Dann werden sozusagen zwei Öfen in einem Gefäß vereinigt, dann aber mit zwei Dreiphasensystemen, also mit zwei mal drei selbständig steuerbaren Elektroden. Die Gefäßform kann hierbei auch Richtung oval ausgeführt werden oder mit einem zusätzlichen Wehr variiert werden. Ein Wehr aus einer feuerfesten oder gekühlten Konstruktion bietet den Vorteil, dass eine thermische Verbindung der Schmelzbereiche gewährleistet bleibt, aber elektrische Zonen teilweise getrennt bleiben und das Strömungsprofil bestmöglich beeinflusst werden kann. So kann z.B. dann nur Material bestimmter Dichte in die zweite Zone übertreten. Wichtig ist es auch oft, sogenannte Kurzschlussströmungen zwischen Einlauf- und Auslauf zu unterbinden. Produktionstechnisch bieten *Zwei-in-eins*-Öfen den Vorteil, dass im Gegensatz zu getrennten Öfen nur eine Ofensteuerung zu bedienen ist, weniger Abstiche zu bedienen und zu warten sind und dass auch nur ein Badniveau im Auge behalten werden muss. Allerdings darf nicht verschwiegen werden, dass solche Öfen immer Sonderkonstruktionen sind, so dass sich Synergieeffekte im Hinblick auf Investitionskosten sehr in Grenzen halten.

Eine Variante von diesem Typ sind die zeitweilig z.B. von Mitsubishi gelieferten Öfen mit unterschiedlichen Höhen des Herdbodens. Mit dieser Maßnahme erzielt man bei gleichmäßigem oberflächlichem Badstand die Nutzungsmöglichkeiten der Eigenart verschiedener Badhöhen und Badvolumina. Ausmauerungstechnisch ist solch eine Lösung eher aufwändig.

In diese Kategorie fallen auch Trapezbauformen. Ein solche Ausführungsform ermöglicht es zum Beispiel, im ersten Bereich des Ofens eine große Badbewegung mit turbulentem Charakter zu erreichen – mit den Eigenschaften Reaktion, Reduktion und Temperaturerhöhung – und im zweiten Bereich schon alleine durch die größere Fläche und ein größeres Volumen eine Geschwindigkeitsverlangsamung und Beruhigung der Strömung zu erzielen, mit dem Ergebnis eines Absetzens von schwereren Teilchen.

Angesprochen wurden schon Variationen bei den Badhöhen. Es muss keinesfalls die übliche Badhöhe von etwa 1.000 mm sein. Diese Höhe bietet zwar in vielen Fällen einen guten Kompromiss aus optimalem Energieeintrag, wirtschaftlichem Kühl- und Ausmauerungskonzept und gutem Reaktionsverhalten. Großen Volumenströmen, insbesondere in Verbindung mit geringem Energieeintrag, können aber durch die Wahl größerer Badhöhen akzeptable, warmzuhaltende Ofengrößen entgegengehalten werden. Bei geringen Leistungen können im Gegenzug niedrige Badhöhen durchaus angemessen sein, um ein Einfrieren des Ofenbodens zu vermeiden.

Ein weiterer Grund für zum Teil deutlich höhere, maximal vorgesehene Badhöhen sind Pufferspeicher. Der SAF eignet sich bei entsprechender Planung auch gut als Zwischenspeicher zur Pufferung im Prozess. Das heißt, dass er bei Bedarf mehr Material als normal aufnehmen kann, zeitweilig weniger abgeben kann oder nach einer Speicherphase auch Bedarfsspitzen im Nachlauf bedienen kann. Das bedeutet dann nicht, dass der Ofen grundsätzlich mit zum Beispiel 2.000 mm Badhöhe betrieben wird; es ist aber kurzfristig möglich, den Badspiegel auf diesen Betrag anzuheben. [3]

Zum Erreichen bestimmter Prozessverläufe, für die z.B. eine intensive Vermischung oder Gasreaktionen wichtig sind, sind Reduktionsöfen alleine nicht das Mittel der Wahl. Hier ist es hilfreich und sinnvoll zum Kombiprozess zu greifen. Bei diesem wird



Bild 5: Kupferschlacken-Absetzofen mit Kippstuhl-Chargierung

ein elektrischer Pfannenofen, welcher sehr individuell zu handhaben ist, einem SAF vorgeschaltet. Die Individualität der Batchfahrweise des Pfannenofens ergänzt so die Vorteile des kontinuierlichen Prozesses des Reduktionsofens. Der Pfannenofen ermöglicht das turbulente Einblasen von Gasen wie z.B. Erdgas oder CO in die schmelzflüssigen Bäder. Durch Wechselfannen kann der verfahrensbedingte höhere Ausmauerungsverschleiß ohne nennenswerte Betriebsunterbrechungen berücksichtigt werden. Nach Abschluss des Prozessschrittes *Pfannenbehandlung*

wird der Inhalt der Pfanne dann über einen sogenannten Kippstuhl in den rund oder eckig ausgeführten SAF chargiert.

Nichtsdestotrotz kann auch ein SAF konsequent für einen Batchprozess ausgelegt werden. Dann wird dieser meist kippbar ausgeführt, um Chargenreste zu vermeiden. Dreht es sich dabei um eine schnelle oder auch teilweise Entleerung über einen großzügig dimensionierten Schlackenabstich, so sieht man in der Regel große Kippwinkel und schnelle Bewegungsmöglichkeiten vor. Mit solch einer Technik können gezielt einzelne, sich etwa durch Dichteunterschiede separierte, Badschichten abgegossen und gewonnen werden. Dreht es sich eher um eine Vermeidung von Chargenresten vor einer nächsten Charge, so sind Neigungswinkel von 10° bis 15° ausreichend.

Eine Herausforderung ist beim SAF die Gestaltung: Ein einfaches System ist nicht möglich, da die Elektroden weit in den Ofen hineinreichen und ein freies Kippen somit verhindern. Also ist entweder der maximal mögliche Kippwinkel zu berechnen und über die Steuerung zu begrenzen; ein weiteres Kippen – falls gewünscht – ist erst nach Herausfahren der Elektrode aus der Begrenzung des Ofendeckels möglich. Bei kleineren Öfen kann ein anderer Weg gewählt werden: Die Gesamtmassen des Ofens samt Inhalt sind eher gering, so dass es eine Option ist, das gesamte Ofengefäß mit Tragarm, Ofendeckel und eingeführten Elektroden um z.B. 10° bis 15° zu kippen. Dies erleichtert das Handling und beschleunigt den Vorgang. Größere Neigungswinkel sollten aber im Hinblick auf eine mögliche Bruchgefahr der Elektroden vermieden werden.

Insbesondere solche Öfen für Batchbetrieb eignen sich auch zur Ausrüstung mit Lanzen oder Düsen, um staubförmige Feststoffe einzutragen oder um Primärenergie wie Erdgas als weitere Energie-, aber auch Reduktionsquelle, zu nutzen.

4. Flexibilität

Ein SAF, der keinen besonders intensiven Prozessen ausgesetzt ist, hat eine Lebenserwartung von mindestens dreißig Jahren. Ein langer Zeitraum für den Betrieb eines Werkes. In nicht wenigen Fällen ändern sich die Ziele eines Prozesses, gelangt man zu neuen den Prozess verbessernden Erkenntnissen oder eher noch werden Ofenaggregate für andere Reststoffe eingesetzt. Und nicht immer ist es mit einem Wechsel der Ausmauerung getan. Hilfreich ist hier das von SMS patentierte System des modularen Ofens: Ofenboden, Abstichbereich, Seitenwände und Kühlung, Ofendeckel sowie Anschlüsse sind als modularer Baukasten ausgeführt. Ein Umstieg von einem ausgemauerten auf einen wassergekühlten Deckel ist schnell vollziehbar, da alle Verbindungsstellen firmenintern genormt sind. Wenn die Erprobung eines neuen Kühlsystems angesagt ist, dann wechselt man unkompliziert 1/3 der oberen Seitenwand aus. Und es gibt noch mehr Möglichkeiten: Veränderungen des Elektroden-Teilkreises oder gar der Anzahl der Elektroden sind möglich durch Wechseln der Kulissenführung im Zentrum des Ofendeckels. Die Idee ist ein Baukasten. Kleinere Öfen sind so aus Modulen zusammensetzbar, Modernisierungen sind schnell in Teilen umsetzbar und Ersatzteile sind Baukastenteile. Von der elektrischen Seite her sorgen entsprechende Schnittstellen oder BUS-Systeme für eine weitere Anpassbarkeit.



Bild 6: Modular aufgebauter Pilotofen

Beim Thema Ausmauerung sei erwähnt, dass systemische Ausmauerungen, d.h. bezüglich Wärmedurchgang und chemische Beständigkeit auf die Produkte abgestimmte Kombinationen aus Kühlung und Feuerfestmaterialien auch den Einsatz von anspruchsvollen Materialien oder bei hohen Temperaturen ermöglichen. Gerade auch die Möglichkeit, über infrarotgestützte Online-Schlacken- und Metalltemperaturmessungen die Recyclingprozesse von der Temperatur her gezielt zu steuern, schafft Spielraum für selektive Behandlungen.

Werden Öfen in einer gasdichten Bauart ausgeführt besteht die Möglichkeit, auch gasförmige Metalle z.B. durch spätere Kondensation zurückzugewinnen. Das klassische Beispiel hierfür ist die Zinkverdampfung: Gezielte Temperatursteuerung, Verdampfung und nachfolgende Kondensation führen hier zur Wiedergewinnung des Metalls. Ein anderes Beispiel ist die silicothermische Gewinnung von Magnesium.

Weiter oben wurde bereits erwähnt, dass es während der Lebensdauer eines SAF oft zu Änderungen kommt. Oftmals bedeuten solche Veränderungen auch Verschiebungen der Betriebspunkte. Die meisten Öfen verfügen über ausreichend elektrische Reserven im Spannungsbereich; die Reserven im Strombereich sind meist knapper, da sie unmittelbar mehr Einsatz von Kupfer in Transformator und Hochstromsystem bedeuten. Das heißt, dass auf der einen Seite geringe Änderungen möglich sind. Aber auch, dass für den Fall, dass man das Leistungsniveau insgesamt erhöhen möchte, die normalerweise eingesetzten Trafos schnell an ihre Grenzen stoßen. Die Berücksichtigung von Transformator-Leistungsreserven von vornherein schafft hier die Reserven, die man später benötigt; und dies ohne zeitkritische Umrüstung bei im Verhältnis zum Gesamtinvest der Neuanlage nur kleinen Mehrpreisen.

Empfehlenswert ist eine Leistungsreserve von 20 bis 25 %. Und solch eine Reserve schafft einen weiteren großen Vorteil: Das Thema Energieflexibilisierung ist in vielerlei Munde. Eine flexible Abnahme von Stromenergie ermöglicht Verträge mit geringen Strompreisen oder Bonuszahlungen. Nun würde *flexibel* ja mit Abschaltungen eine Einbahnstraße aufweisen; die Produktion würde geringer. Die Lösung ist flexibler Energieeintrag in beide Richtungen. Dies erfordert eine entsprechende Reserve im elektrischen Bereich, um auch kurzzeitig mit z.B. 20 % höherer Leistung zu fahren. Und wenn man dies kann, ist man gut in der Lage, zeitweilig auch mit deutlich reduzierter Leistung den Ofen zu betreiben und dennoch die gesetzten Produktionsziele

zu erreichen. Kurzzeitige Überlastphasen werden heute anders bewertet als das mittel- bis langfristige Betreiben eines SAF im Überlast-Modus. Ergänzt durch eine effektive Ofen- und Ausmauerungsüberwachung offeriert eine von vornherein mitinstallierte Leistungsreserve bei der Energieversorgung alle Voraussetzungen für niedrige Energiepreise und hohe Wirtschaftlichkeit.

5. Pilotanlagen und Datenerfassung

Immer komplexere Recyclingprozesse erfordern immer mehr Untersuchungen im Vorfeld. Aber nicht alles lässt sich rechnerisch mit den einschlägigen Programmen oder durch Simulationen untersuchen. Manches erfordert grundlegende Tests, Versuche im kleinen Maßstab und dann ein Upscaling, zum Teil sogar in mehreren Schritten. Lange Zeit war es schwierig, geeignete Versuchsaggregate zu finden. Auch SMS tat sich schwer mit dem Anbieten solcher Aggregate, da die Engineeringkosten bei solch kleinen Anlagen überproportional hoch sind und die Verkaufspreise am Ende verzerren; oder umgekehrt: Die kleinen Versuchsaggregate sind nicht gut verkäuflich wegen extremer Preise.

Das Bild hat sich geändert. Zwar ist immer noch der Projektierungskostenanteil recht hoch. Und es wird auf die individuelle Eigenschaft geachtet. Aber durch Nutzung von modularen Komponenten und Ausweisen von gewissen Leistungsbandbreiten lassen sich nun Pilotanlagen zu attraktiven Preisen darstellen. Im kleinen Leistungsbereich bis etwa 500 kW verwendet man vorzugsweise DC-Anlagen, schon aufgrund des geringeren Raumbedarfs der Elektroden im Ofendeckel. Die Elektrik lässt sich gut als *Black Box* konzipieren. Eine manuelle Steuerung ermöglicht den Betrieb; eine PLC und ein HMI lassen sich mittels Profi-Bus-Schnittstellen seitens des Kunden – oder des Lieferanten, falls gewünscht – auch nachträglich ergänzen.

Eine beispielhafte Ausführung ist ein Pilotofen mit 250 kW, etwa 1.500 mm Herddurchmesser, mit 80 mm Graphitelektroden-Durchmesser, in schließbarer Variante, mit Einblasmöglichkeit und in um 10° kippbarer Ausführung. Er besitzt einen leitenden Boden, eine bedarfsweise zuschaltbare Kühlung, rostfreie



Bild 7: Montage eines kippbaren Kleinofens aus der Submerged Arc Furnace - Produktfamilie

Ausführung und eine über Profi-Bus-Schnittstelle frei programmierbare Steuerung. Zur möglichst einfachen Betriebsführung wurde komplett auf Hydraulik verzichtet und wurden Elektro-Spindelantriebe eingesetzt.

Was fehlt für gute Recyclingergebnisse ist eine bedarfsorientierte Überwachung der Anlagen. Soviel wie nötig, aber auch so wenig wie möglich. Dazu gehören neben den Klassikern wie Thermoelementen nun Gasdetektoren im Ofenraum und Abgaskamin, Lichtwellenleiter in der Ausmauerung zur Überwachung der Ausmauerung und Vorhersage des Verschleißes, Radarsysteme zur Überwachung des Chargier-Status und IR-Kameras zur Datenerfassung aller Abstichttemperaturen. [6]

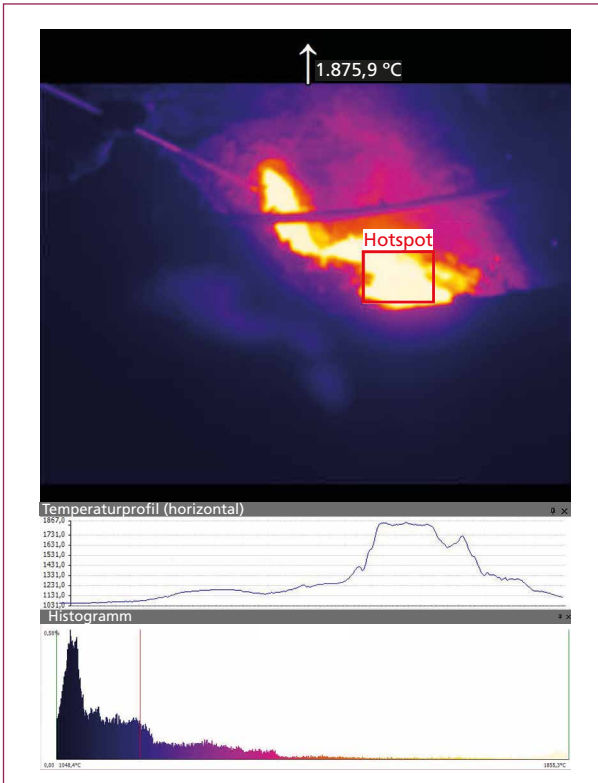


Bild 8:

Online-Schlackentemperaturmessung

6. Zusammenfassung

Der SAF ist längst nicht mehr der runde Ofen mit 10 m Durchmesser und drei Elektroden wie in den Jahren von 1930 bis 1980/1990. Wie gezeigt lassen sich gerade Anforderungen der Recyclingprozesse gut in einem SAF darstellen, da mechanische und elektrische Komponenten sehr gut individuell an diese Prozesse angepasst werden können: Ob gezieltes Schmelzen, das Einblasen von Stäuben, eine genaue Temperaturregelung, ruhige Absetzprozesse oder turbulente Misch- und Reaktionsprozesse, es gibt die entsprechende Variation des SAF, von sehr kleinen Dimensionen als Pilotofen bis hin zu leistungsstarken Großanlagen.

7. Quellen

- [1] Degel, R.; Schmale, K.; Kleinschmidt, G.; Oterdoom, H.: AC- and DC-Smelter technology for ferrous metal production. INFACON XII, Helsinki, 6th-10th June 2010
- [2] Degel, R.; Kempken, J.; Kunze, J.; König, R.: Design of modern large capacity FeNi-smelting plants. INFACON IX, 18. - 21. Feb. 2007; Delhi, India
- [3] Degel, R.; Germershausen, T.; Nörthemann, R.; Köneke, M.; van Niekerk, A.: Innovative electric smelter solutions of the SMS group for the ferro alloy and Si-metals industry. Infacon XIII in June 2013; Almaty, Kazakhstan
- [4] Durrer, R.; Volkert, G.: Metallurgie der Ferrolegierungen. Kapitel 2, 2. Auflage 1972, Springer-Verlag
- [5] Gasik, M: Handbook Ferroalloys. Kapitel 6, 2013, Verlag Elsevier Science & Technology
- [6] Haupt, J.; Nörthemann, R.: Entrepreneurial development of a new non-ferrous plant. 6th CRU Silicon Market Forum; Prag, 2016
- [7] König, R.; Schmidl, J.; Warczok, A.; et.al.: Highly efficient slag cleaning...; Cobre 2013, Santiago de Chile

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel • Elisabeth Thomé-Kozmiensky • Daniel Goldmann (Hrsg.):
Recycling und Rohstoffe – Band 11

ISBN 978-3-944310-40-4 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2018

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Dr.-Ing. Olaf Holm,
Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Claudia Naumann-Deppe, Janin Burbott-Seidel, Sandra Peters,
Ginette Teske, Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk- sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.