

Energiesparender Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofen für Schrott minderer Qualität

Der energetisch optimierte Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofen von ABB bietet jedem Stahlwerker ein Schmelzaggregat, mit dem sich Rohstahl auf der Basis minderwertiger Schrottqualitäten wettbewerbsfähig produzieren läßt. Eine ausgeklügelte Technik von Zusatzbrennern sowie Sauerstoffdüsen ermöglicht, durch gezielte Schrottvorwärmung bei gleichzeitigem Abbau der Umweltbelastung erheblich Energie zu sparen.

Bei der Entwicklung des neuen Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofens (EODC-TEAF, Energy Optimized Direct Current Twin Electric Arc Furnace) **1** wurden – basierend auf der bewährten Gleichstromtechnologie von ABB – Methoden gesucht, um den Gesamtenergieverbrauch bei der Erzeugung von Stahl zu optimieren und damit den Anteil an elektrischer Energie zu senken. Als Haupteinsatzstoff hat man dabei Schrott minderer Qualität (also mit geringem Raumgewicht und/oder hohen Anteilen an organischen Verunreinigungen) vorgesehen und in geringeren Mengen auch andere Eisenträger, wie Eisenschwamm und Roheisen.

Im Vergleich mit Elektroöfen hergebrachter Bauweise bietet der neue Ofen von ABB wesentlich bessere Verbrennungsergebnisse der fossilen Brennstoffe bzw. der natürlichen Begleitelemente von Roheisen oder Eisenschwamm. Das ist nur möglich, weil der Nachverbrennungsprozeß im Ofen selbst stattfindet und einer genauen Regelung unterworfen wird.

Table 1 verdeutlicht die Leistungsfähigkeit des Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofens.

Untersuchung der Energiebilanz von Lichtbogenöfen

«Ausgaben» in der Energiebilanz

Die Energiebilanz eines Elektrolichtbogenofens und jedes anderen Schmelzofens weist im wesentlichen folgende drei «Ausgabeposten» aus:

- das Schmelzgut selber
- instationäre Verluste
- stationäre Verluste

Schmelzgut

Je nach Art der Einsatzstoffe schwankt das Ausbringen an Eisen und an erwünschten wie unerwünschten Begleitelementen, ist aber unter normalen Lichtbogenofenbedingungen immer < 1.

Hubert Trenkler
ABB Industrie AG

Das Einsatzgewicht für Schrott wird nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Einsatzgewicht} = \frac{\text{Abstichgewicht}}{\text{Ausbringen}} \quad (1)$$

Bei einem Abstichgewicht von 100 t ergibt dies ein Einsatzgewicht von 109 t, wenn das Ausbringen 92% beträgt.

Um Stahlschrott herkömmlicher Zusammensetzung von Raumtemperatur auf Abstichtemperatur (~1630°C) zu erwärmen, braucht es ungefähr $380 \text{ kWh/t}_{\text{Einsatz}}$.

$$\begin{aligned} \text{Einschmelzenergie} &= \\ &= 380 \frac{\text{kWh}}{\text{t}} \cdot 109 \text{ t} = 41\,420 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (2)$$

Die Einschmelzenergie ist gleichbedeutend mit der physikalisch notwendigen Energie und somit der Mindestenergiebedarf, der nicht unterschritten werden kann.

Instationäre Verluste

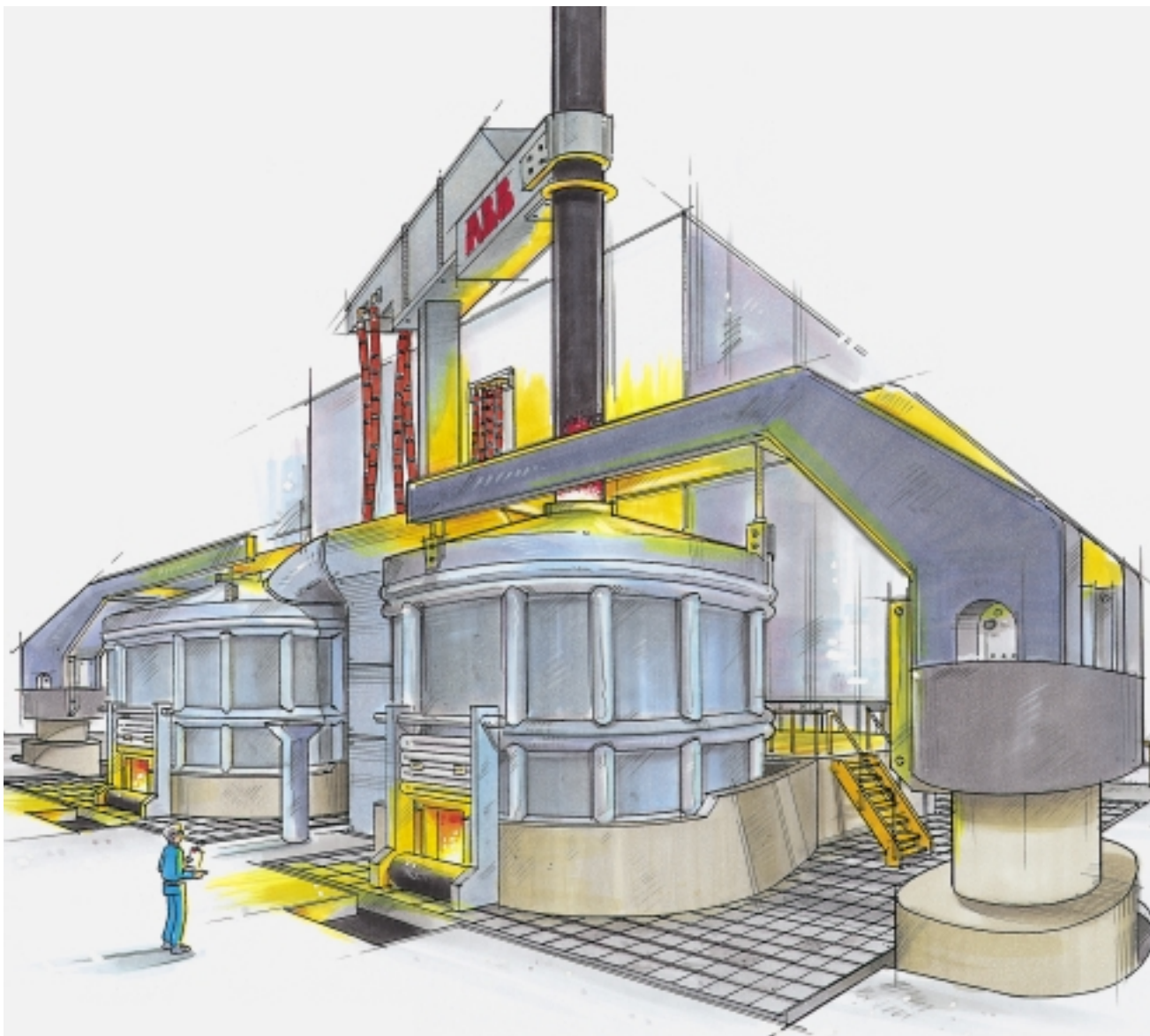
Instationäre Verluste sind jene, die sich während des Schmelzverlaufs, also mit der Zeit, ändern und während operativer Totzeiten nicht oder nur zum Teil auftreten, wie:

- Abgasverluste
- Wärmeaustrag mit der Schlacke
- Strahlungsverluste beim Betrieb des Lichtbogens
- Chargierverluste
- elektrische Verluste

Diese Verluste sind prozeßabhängig, das heißt sie können nicht vermieden, aber in Abhängigkeit von der Prozeßführung verringert oder gar minimiert werden.

Bei den Abgasen und der Schlacke bedeutet das in erster Linie, die Gesamtmengen zu reduzieren. Die Strahlungsverluste lassen sich am besten durch eine Verkürzung der Brenndauer des Lichtbogens beeinflussen.

Die Chargierverluste stellen eine Kombination von Abgas- und Strahlungsverlusten dar. Sie liegen in der Größenordnung von ca. $12\text{--}20 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{min}$ ($\text{m}^2 = \text{Oberfläche der Schmelze}$, $\text{min} = \text{Dauer}$



Der neue Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofen für eine Jahresproduktion von 750 000 t Stahl pro Jahr



für das Deckelöffnen bis zum erneuten Schließen). Für einen 100-t-Ofen bedeutet das ca. 400–450 kWh/min an Verlusten. Sie können am einfachsten durch eine Minimierung der Chargierdauer begrenzt werden.

Da die Abgase nicht nur reine Verluste darstellen, sondern in der Phase ihrer Erzeugung auch Wärmelieferanten sind, liegt es nahe, soviel wie möglich von ihrer fühlbaren wie auch chemisch gebundenen Energie direkt im Schmelzaggregat umzusetzen.

Die elektrischen Verluste in Transforma-

tor, Gleichrichter, Drossel und in den stromzuführenden Teilen sind in erster Linie vom Strom und der Betriebsdauer abhängig. Sie lassen sich, wie die Strahlungsverluste, vor allem durch eine Verkürzung der Brenndauer des Lichtbogens reduzieren.

Stationäre Verluste

Als stationäre Verluste werden diejenigen bezeichnet, die von der Prozeßführung nahezu unabhängig über längere Zeitintervalle auftreten. Dazu zählen:

- der Wärmeverlust des feuerfest gemauerten Ofenherds und vor allem
 - die Kühlverluste über die wassergekühlten Wand- und Deckelelemente.
- Da diese Verluste unabhängig davon auftreten, ob ein Ofen gerade betrieben wird oder steht, sind sie in letzterem Fall besonders schmerzhaft, muß doch dieser Energieverlust später wieder eingeholt werden.

Ein kleines Rechenbeispiel wird dies besser veranschaulichen. Ein Ofen herkömmlicher Bauart mit einem Abstichgewicht von 100 t hat ca. 50 m²

Tabelle 1:
Kennzahlen des Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofens (EODCTEAF)

Jahresproduktion	>750000	t
Abstichgewicht	90	t
Elektrische Leistung	64	MW
Transformatorleistung	100	MVA
Elektroden Durchmesser	28	inch
Elektrodenverbrauch	1,4	kg/t
Verbrauch an:		
Kohle	45	kg/t
Kalk	50	kg/t
Öl	10	l/t
Sauerstoff	60	Nm ³ /t
elektrischer Energie	< 340	kWh/t

wassergekühlte Seitenelemente und ca. 30 m² wassergekühlte Deckenelemente. Jeder Quadratmeter Kühlfläche wird von 150 Litern Wasser pro Minute durchflossen. Das ergibt bei einer Temperaturdifferenz des Kühlwassers von 5°C zwischen Eintritts- und Austrittstemperatur einen Kühlverlust in der Größe von:

$$(50 + 30) \text{ m}^2 \cdot 150 \frac{\text{l}}{\text{m}^2 \text{ min}} \cdot 5 \frac{\text{kcal}}{\text{l}} = 60000 \frac{\text{kcal}}{\text{min}} = 70 \frac{\text{kWh}}{\text{min}} \quad (3)$$

Die gesamten stationären Verluste eines solchen Ofens belaufen sich dann mit den

Herdverlusten auf ca. 80 kWh/min. Mit 80 kWh kann eine Tonne kalten Schrotts auf nahezu 600°C erwärmt werden.

**«Einnahmen»
in der Energiebilanz**

Die «Energie-Einnahmen» eines Elektrolichtbogenofens bestehen in erster Linie aus der Umsetzung von elektrischer in thermische Energie, die im Lichtbogen freigesetzt wird. Neben der elektrischen Energie kommen noch verschiedene andere Energieträger zum Einsatz, die alle miteinander chemisch gebundene Energie im Lichtbogenofenprozeß freisetzen.

Diese chemischen Umwandlungsprozesse können in zwei Gruppen unterteilt werden:

- rein metallurgische Vorgänge
- zusätzliche Verbrennungsprozesse

Metallurgische Prozesse

Die von ihrer Natur her z.T. äußerst komplizierten metallurgischen Vorgänge können, je nach Einsatzstoffen und gewünschten Abstichqualitäten, beträchtliche Energiemengen freisetzen. Bei der Oxidation der Begleitelemente von Roheisen werden beispielsweise Energiemengen frei, die ca. 1/3 des Eigengewichts des Roheisens an Schrott zu schmelzen vermögen.

Obwohl dieser Energiebeitrag den Bedarf an elektrischer Energie reduziert, kann die durch metallurgische Prozesse freigesetzte chemische Energie nicht als eine Substitution der elektrischen Energie angesehen werden, da sie aufgrund des jeweiligen Prozesses so oder so anfällt.

Zusätzliche Verbrennungsprozesse

Eine eigentliche Substitution elektrischer Energie wird durch das Einbringen zusätzlicher fossiler Energieträger zusammen mit Luft/Sauerstoff erzielt.

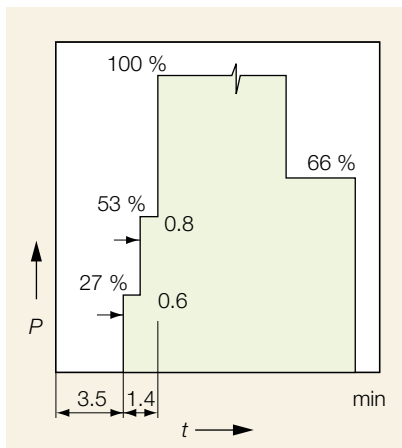
Die heutige Stahlwerkstechnologie bietet eine Vielzahl verschiedener Systeme, von denen hier einige genannt seien:

- Zusatzbrenner
- Sauerstoff- bzw. Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen
- Unterbaddüsen
- Sauerstoffinjektoren

Auf die für den Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofen relevanten Systeme wird später eingegangen.

Fahrdiagramm eines Lichtbogenofens

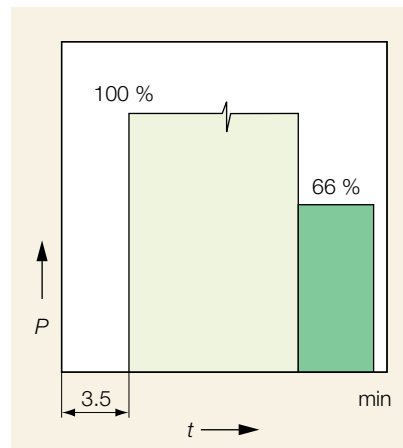
P Leistung
t Zeit



2

Schematisches Fahrdiagramm eines Lichtbogenofens

P Leistung
t Zeit



3

Schematisierte Fahrdiagramme

Die Zusammenhänge zwischen den Fahrweisen eines Ofens und den dabei auftretenden stationären und instationären Verlusten lassen sich am leichtesten graphisch darstellen **2**. Die verschiedenen «Energie-Einnahmen», wie z. B. durch Zu-

satzbrenner, sind in dieser Betrachtung von untergeordneter Bedeutung.

Um den Deckel zu schonen, soll die volle Leistung (100%) erst nach 1,4 min über zwei Vorstufen von 27 bzw. 53% der Gesamtleistung erreicht werden. Die Dauer der 100-prozentigen Leistung richtet sich nach der Menge des Einsatzmaterials. Besteht das Einsatzmaterial im wesentlichen aus Schrott, wird so lange mit 100% Leistung gefahren, bis ca. 70% der eingesetzten Masse eingeschmolzen sind.

Wenn die Charge nahezu eingeschmolzen ist, wird die Leistung auf 66% reduziert. Dies ist gleichbedeutend mit einer Spannungsreduktion und bedingt dadurch eine Längenreduktion des Lichtbogens. Letztere ist notwendig, um die nun freiliegenden, wassergekühlten Seitenelemente vor der Strahlung des Lichtbogens zu schützen.

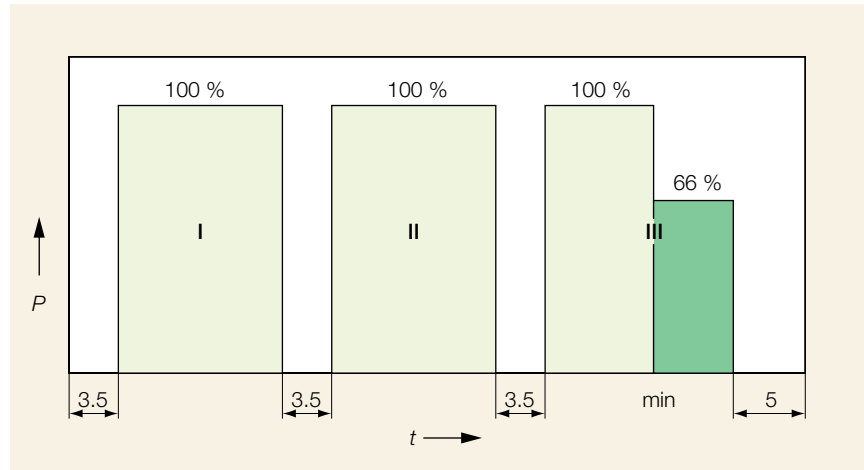
3 stellt eine Schematisierung von **2** dar, wobei die Zeitachse für 100% Leistung stark verkürzt ist. Lediglich die Überhitzungsphase (66% Leistungsspeisung) ist als ein kleinerer, maßstabgetreuer Block dargestellt.

Bei einer Zykluszeit von 60 min entfallen 15,5 min auf operative Nebenzeiten, wie mehrfaches Chargieren, sowie auf die Abstich- und Rüstzeit **4**. Bei einem 100-t-Ofen ergeben sich daraus die in *Tabelle 2* zusammengestellten Verluste:

Bei dieser Fahrweise gehen bei jedem Zyklus ca. 15,5 min Produktionszeit durch operative Nebenzeiten verloren, die zudem ca. 5500 kWh Verluste verursachen. Letztere müssen während der Betriebszeit zusätzlich aufgebracht werden.

In Wirklichkeit liegen die dadurch verursachten Verluste noch um einiges höher, da bei einer gegebenen Anschlußleistung einige Minuten aufgewendet werden müssen, um diese Verluste zu kompensieren. Während dieser Minuten fallen aber auch instationäre Verluste an, die zu gleicher Zeit abgedeckt werden müssen.

Ein erster Schritt zur Verbesserung dieser Situation ist die Einführung eines Doppelofens, der abwechselnd vom



Fahrtdiagramm eines Einzelofens mit 3 Chargierkörben

4

P Leistung

t Zeit

I, II, III 1., 2. und 3. Charge

selben elektrischen System gespeist wird **5**.

Wird der gleiche Zyklus wie in **4** beibehalten, ergibt sich folgende Situation:

- Verringerung der Abstichzeit von 60 Minuten auf 54,5 min durch die Verlagerung operativer Nebenzeiten in den nichtschmelzenden Ofen – Produktionssteigerung auf 111 %
- Erhöhung der Verluste durch den leerstehenden Ofen auf 152 %

Allerdings kann die Situation von **4** nicht direkt auf **5** übernommen werden. Es muß vielmehr die Gesamtleistung erhöht werden, um die zusätzlichen Verluste abzudecken.

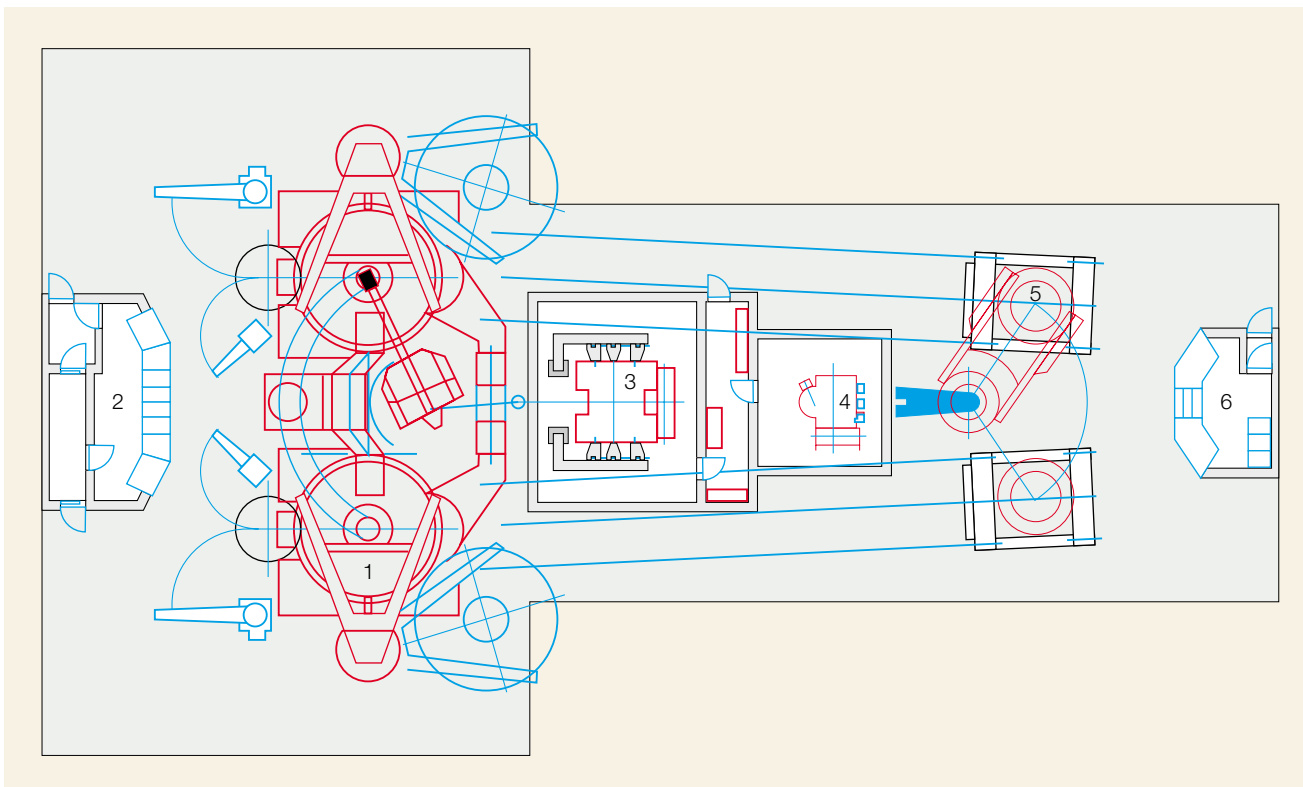
Durch eine Erhöhung der Gesamtleistung wiederum wird die Zykluszeit verringert, das verringert wiederum die

stationären Verluste im leeren Ofen usw. Bei entsprechender Iteration und Anpassung der Gesamtleistung ergibt sich für dieses Beispiel eine optimale Zyklusdauer von 42–43 min mit einer *Produktionssteigerung auf 140 %*. Gleichzeitig erhöhen sich aber auch die Verluste in derselben Größenordnung.

Folglich bringt dieses Konzept zwar eine erhebliche Produktionssteigerung, jedoch keine Energieeinsparung. Zudem entstehen höhere Investitions- und Betriebskosten für das zweite Gefäß.

Tabelle 2:
Verluste eines 100-t-Lichtbogenofens

Verlustart	Dauer min	Chargierverlust kWh	Stationärer Verlust kWh	Gesamtverlust kWh
1. Chargieren	3,5	1400	280	1680
2. Chargieren	3,5	1400	280	1680
3. Chargieren	3,5	1400	280	1680
Abstich	3		240	240
Rüsten	2		160	160
Σ	15,5	4200	1240	5440



Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofenanlage. Der Kontrollraum ist so angeordnet, daß der Ofenmeister freie Sicht auf die Schlackentüren bzw. auf die Lanzenmanipulatoren hat.



1 Gleichstrom-Lichtbogenofen

2 Kontrollraum für den Lichtbogenofen

3 Transformator und Gleichrichter

4 Pfannenofentransformator

5 Pfannenofen

6 Kontrollraum für den Pfannenofen

hohe Schrottsäule im Ofen sollten jedoch nicht mehr als 30–35% des Schrotteinsatzes durch andere Eisenträger ersetzt werden.

Die wassergekühlten Seitenelemente des Oberofens gliedern sich in zwei voneinander getrennte Sektionen gleicher Bauhöhe. Diese konstruktive Maßnahme erlaubt einerseits das schnellere Auswechseln beschädigter Elemente; andererseits wird damit eine wesentlich höhere, operative Flexibilität erzielt, wenn geänderte Einsatzstoffe das hohe Ofenvolumen nicht mehr rechtfertigen.

Bei der hohen Bauweise beträgt der Elektrodenhub 8,5 Meter. Um höhere Momente zu vermeiden, ist der Elektrodentragarm als selbsttragender Aluminiumarm ausgeführt. Der Elektrodenmast selbst besteht aus einer stark versteiften Stahlkonstruktion. Zusätzlich zu diesen Konstruktionen verhindert eine eigene

Verriegelung gemeinsame Bewegungen von Gefäß und Elektrode. Mit diesen Maßnahmen wird eine Betriebssicherheit wie bei herkömmlichen Bauarten erzielt.

Im Sinne einer optimalen Prozeßführung erfordert die Schrottbeschickung einige Aufmerksamkeit. Um Beschädigungen der wassergekühlten Wandelemente sowie der Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen im Betrieb vorzubeugen, dürfen Schrottpartien mit mehr als 0,7 t/m³ maximal bis zur Schlackentür chargiert werden. Zusätzlich zum schwereren Schrott sollten für einen günstigen Betrieb auch etwa ein Drittel des gesamten Kohlebedarfs sowie ein Drittel der Gesamtmenge an gebranntem Kalk bzw. Dolomit in den Ofenkessel gelangen. Die restlichen Zuschlagsstoffe werden während des Einschmelzvorgangs über eine zusätzliche Öffnung im

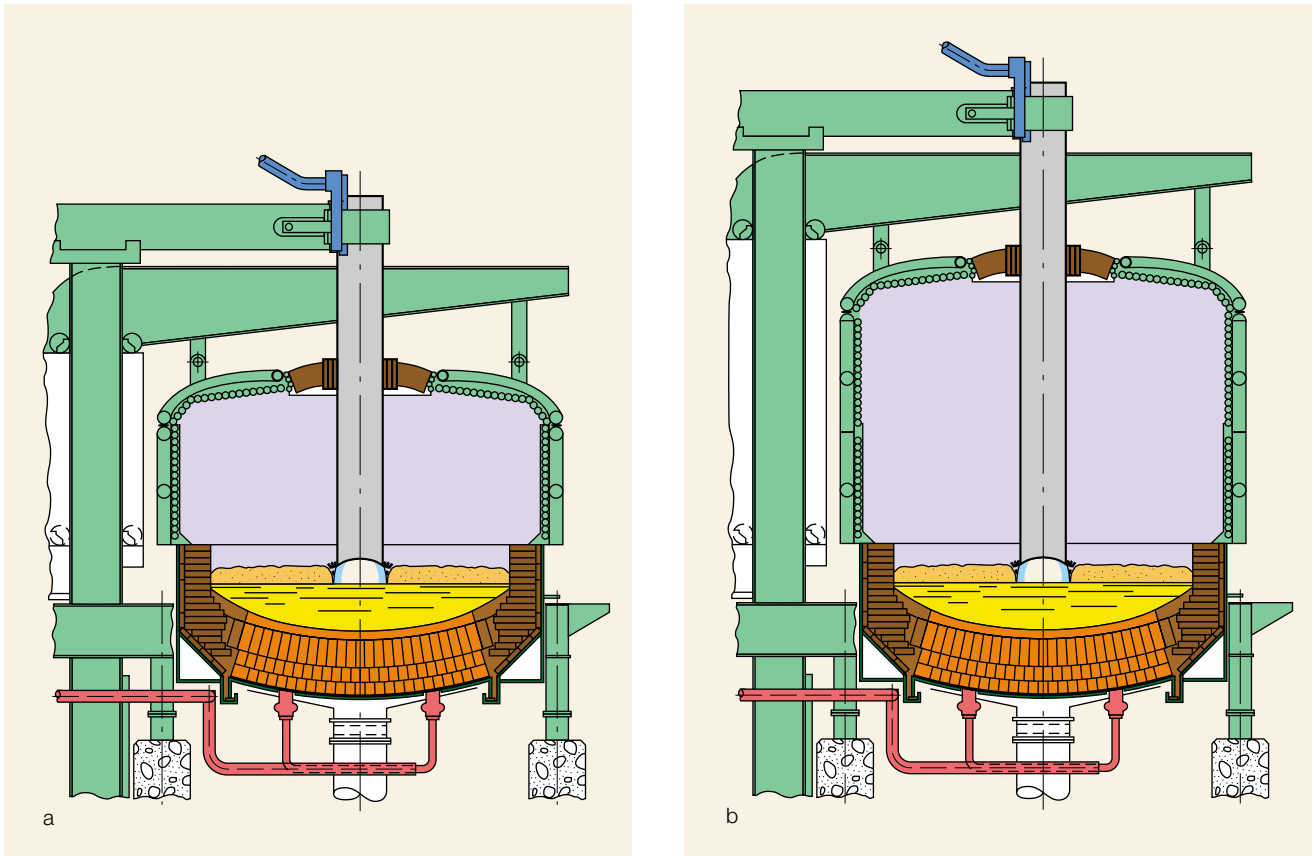
Deckel kontinuierlich oder portionsweise zugeführt.

Das Aufheizen der Stahlpfannen erfolgt in einem Pfannenofenstand mit schwenkbarem Elektrodenmast **7**. Damit verbunden sind zwei voneinander getrennte Schienenstränge zwischen Schmelz- und Nachbehandlungsbereich. Als logische Fortsetzung des Doppelofenprinzips erlaubt diese Arbeitsweise, die Logistik in der Flüssigphase bis hin zur Stranggießmaschine zu vereinfachen und damit zu verbessern.

Einsatzstoffe

Neben anderen Einsatzstoffen, wie Roh-eisen und Eisenschwamm, kommt für diesen Ofentyp dem Schrott eine besondere Bedeutung zu.

In gänzlich unüblicher Manier eignet sich am besten billiger Schrott mit einem



Vergleich eines normalen Gleichstrom-Lichtbogenofens (a) mit einem energetisch optimierten Ofen (b)

8

geringen Raumgewicht ($< 0,6 \text{ t/m}^3$) und hohen Anteilen an organischen Verunreinigungen.

Beides, geringes Raumgewicht und/oder organische Verunreinigungen, ist für gute Vorwärmresultate von großer Bedeutung. Fehlen organische Verunreinigungen, so können fossile Brennstoffe, wie z. B. Reifen, zugesetzt werden.

zwar von hoher Effizienz, in einem Schrotthaufen aber nur von lokaler Bedeutung.

Die Wärmeübertragung durch Konvektion heißer Verbrennungsgase ist zwar nicht so wirkungsvoll wie die der Strahlung, dafür aber nicht lokal begrenzt. Die Wirksamkeit des Wärmeübergangs wird durch die Ver-

weilzeit des Gases (hohe Schrottsäule = lange Verweilzeit) und durch den Temperaturgradienten (kalter Schrott = hoher Wärmeübergang) beeinflusst.

Neben der Strahlungsintensität und der Verweilzeit des Gases (bzw. des Temperaturgradienten zwischen Gas und Schrott) ist die Intensität des Wärmeübergangs im wesentlichen von der Größe der Oberfläche eines Körpers abhängig. Je größer die Oberfläche ist, desto mehr Wärmeenergie kann er pro Zeiteinheit aufnehmen. 9 zeigt, wie sich bei zwei Körpern mit unterschiedlicher Geometrie, aber gleicher Masse die Oberflächen ändern können.

Aber nicht nur der Wärmeübergang ist stark von der Geometrie eines Körpers abhängig, sondern auch die Wärmeleitung im Körper selbst. Körper 2 zeigt, daß der Abstand der Seitenfläche zur Mittellinie viel kürzer ist als bei quadratischem Querschnitt.

Schrott mit kleinem Raumgewicht

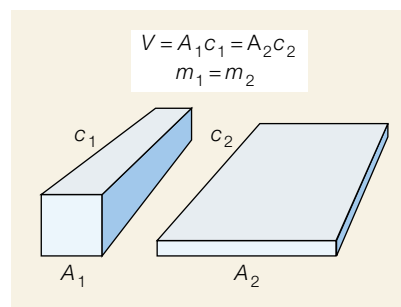
Die besten Vorwärmresultate lassen sich erzielen, wenn das Verhältnis von Schrottoberfläche zu seinem eigenen Volumen hoch ist.

Die Schrottvorwärmung folgt vier physikalischen Prinzipien:

- Wärmestrahlung
- Konvektion von Gasen
- Wärmeübergang
- Wärmeleitung

Die Wärmestrahlung von Flammen ist

Vergleich der Oberflächen zweier Körper mit gleicher Masse (m) bzw. gleichem Volumen (V) bei unterschiedlichen Abmessungen (Ac)



Organische Verunreinigungen

In normalen Lichtbogenöfen sind organische Verunreinigungen unerwünscht, da sich bei den hohen Reaktionstemperaturen teilweise hochgiftige Substanzen, wie Stickoxide, Furane oder Dioxine, bilden. Um deren Gehalt im Abgas zu verringern, sind aufwendige Abgaskühl- und -reinigungsanlagen erforderlich. Zur Vermeidung bzw. Verringerung von Dioxinen ist z.B. zwischen 1200 und 500°C eine Abgaskühlstrecke mit Kühlraten von mehreren 100°C pro Sekunde erforderlich.

Mit einer gezielten Schrottvorwärmung hingegen läßt sich das Temperaturprofil in einem (kalten) Schrotthaufen so steuern, daß die Entstehung dieser unerwünschten, (hoch)giftigen Substanzen von Beginn an unterbunden wird. Mit dieser Technologie wandeln sich die sonst unerwünschten organischen Substanzen in der Phase der Schrottvorwärmung zu wertvollen Brennstoffen.

Der Prozeß

Der Schmelzyklus eines Ofens beträgt 80 min. Er ist in zwei 40minütige Teilprozesse gegliedert:

- 1. Teilprozeß: Abstechen; Wartung, wenn notwendig; Chargieren (ein- oder zweimal); *Schrottvorwärmen*
- 2. Teilprozeß: Elektrisches *Schmelzen*, unterstützt von chemischer Verbrennungswärme; Schaumslaggefahren

1. Teilprozeß: Schrottvorwärmung

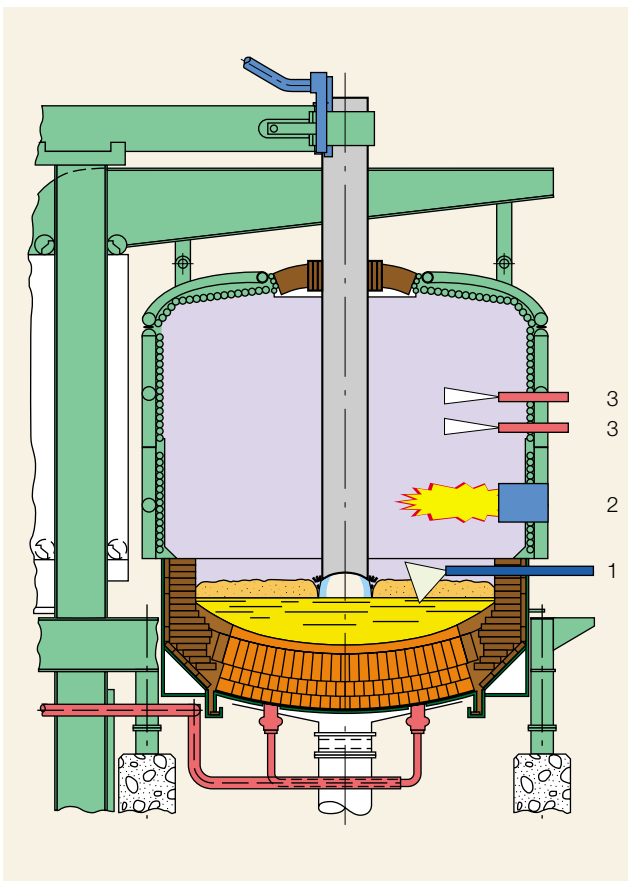
Die Schrottvorwärmung wird so geführt, daß der gesamte chargierte Schrott vor dem «elektrischen» Schmelzen eine mittlere Temperatur von 550°C erreicht. Dieses Temperaturmittel entspricht einem Energieinhalt von 70–80 kWh/t Schrott.

Bei entsprechender Sauerstoffzufuhr wird die für die Vorwärmung notwendige Energie durch Verbrennung fossiler

Brennstoffe und/oder der organischen Verunreinigungen direkt im Ofenkessel aufgebracht. Zu diesem Zweck sind auf vier Ebenen, senkrecht zur Ofenachse, Lanzen, Brenner und Sauerstoffinjektoren angeordnet **10**.

Die unterste Ebene im Bereich der Schlackentür wird mit Hilfe von Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen beheizt, die über einen Manipulator gesteuert werden. In der Ebene darüber (gerade über dem feuerfest ausgemauerten unteren Ofenkessel) sind 4 Brenner mit geringer Leistung und niedriger Durchsatzgeschwindigkeit angeordnet; darüber befinden sich in zwei weiteren Ebenen zueinander versetzt Sauerstoffinjektoren, die – gleich wie die Brenner – Sauerstoff mit geringer Geschwindigkeit tangential zur Ofenmitte in den Ofenraum einblasen.

Die Lanzen und Brenner beheizen den direkt vor ihnen gelagerten Schrott und dienen gleichzeitig als Lieferanten des für die Nachverbrennung notwendigen

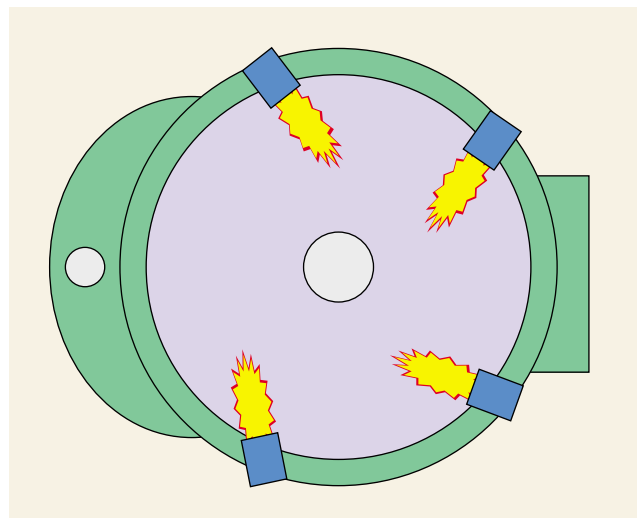


Schematische Darstellung der Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen (1), Brenner (2) und Sauerstoffinjektoren (3) für die Schrottvorwärmung

10

Tangential angeordnete Brenner sorgen für eine gute Vermischung der CO-reichen Abgase mit dem Sauerstoff aus den Injektoren.

11



Kohlenmonoxids. Die Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen erzeugen außerdem zusammen mit der vorhandenen Schlacke die sogenannte Schaumslagge und mit dieser ein Medium, dessen Wärmeübergang auf den kalten Schrott wesentlich besser ist als der von heißem Gas bzw. Abgas.

Durch die tangentielle Ausrichtung der Brenner und Nachbrenner (= Sauerstoffinjektoren) **11** ergibt sich eine wesentlich bessere Vermischung der CO-reichen Abgase mit dem Sauerstoff aus den Injektoren.

Die Nachverbrennung des Kohlenmonoxids, das von den Lanzen und Brennern generiert wird, spielt in der Phase der Schrottvorwärmung eine komplizierte, aber überaus bedeutende Rolle:

- Die Reaktionsenergie (Enthalpie) der Nachverbrennungsreaktion $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$ ist höher als die Enthalpie der Reaktion von $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}$
 $\text{C} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} \quad -26,4 \text{ kcal/Mol}$
 $\text{CO} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 \quad -67,6 \text{ kcal/Mol}$
 $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 \quad -94,0 \text{ kcal/Mol}$
- Durch die Nachverbrennung im Ofen steigt die Energieausbeute bei gleichzeitiger Senkung des Energiever-

brauchs und des Abgasvolumens. Dadurch ergibt sich eine Steigerung des Gesamtwirkungsgrades.

- Mit der Nachverbrennung läßt sich die Wärme inmitten des zu erwärmenden Schrotts erzeugen.
- Abgaswärme, die vom Schrott aufgenommen wird, muß nicht mehr an die Umwelt abgeführt werden; gleiches gilt für die Nachverbrennungswärme, die bei herkömmlichen Verfahren genauso wie die restliche Abwärme größtenteils mittels Kühlwasser in den Abgaszügen abgeführt wird und damit indirekt die Umwelt belastet.

Um einer (lokalen) Überoxidation des Schrotts durch den angebotenen Sauerstoff entgegenwirken zu können, muß in Abhängigkeit der gegebenen organischen Verunreinigungen Kohle oder Koks in der bereits geschilderten Weise zuchargiert werden.

Ein zusätzlicher Türbrenner gewährleistet, daß die Selbstzündung des Lanzen-sauerstoffs im Türbereich ohne Probleme abläuft. Die Heizdauer dieses Brenners ist auf 4–5 min pro Ofenzyklus begrenzt, während die vier anderen Brenner in Abhängigkeit vom Chargiermodus ca. 30 min in Betrieb sind.

2. Teilprozeß: Schmelzen

Der Schmelzprozeß unterscheidet sich im wesentlichen nicht von dem eines herkömmlichen Gleichstromofens. Die Brenner unterstützen die Einschmelzphase für eine Zeitdauer von 10–12 min, während die Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen nahezu über die gesamte Einschmelzphase in Betrieb sind.

Dennoch gibt es fünf signifikante Merkmale, die sich sehr positiv auswirken und damit eine wesentlich zweckmäßigere Arbeitsweise erlauben:

- Die Nachverbrennung während des Einschmelzens und Überhitzens reduziert den elektrischen Energieverbrauch.
- Schaumslagge hat einen wesentlich besseren Wärmeübergang auf Schrott als Gase gleicher Temperatur, sowohl durch den besseren Kontakt als auch durch die unvergleichlich längere Verweilzeit.
- Arbeiten unter Schaumslagge reduziert die Kühlverluste in den wassergekühlten Elementen und erhöht damit gleichzeitig deren Lebensdauer.
- Schaumslagge hat einen wesentlich besseren Kühleffekt; der Lichtbogen brennt unter der Schlacke mit nahezu halbiertes Länge.
- Schaumslagge schützt die Graphitelektrode vor Oxidation: der Elektrodenverbrauch nimmt stark ab.

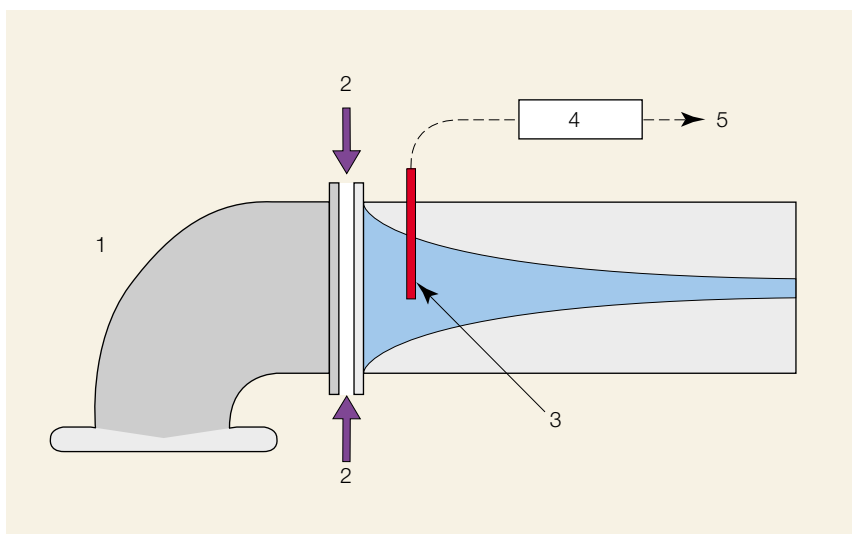
Die Nachverbrennung geht, in Abhängigkeit von der produzierten CO-Menge, auch in der Einschmelzphase weiter und erzeugt damit weiterhin zusätzliche Verbrennungsenergie innerhalb des Ofenkessels.

Solange Schrott im Ofen ist, kommt diese Wärme weiterhin dem Schrott zugute, wenn auch in abnehmendem Maße: Einerseits nimmt die Wärmezufuhr von den heißen Gasen auf den immer wärmer werdenden Schrott ab, andererseits verringert sich gleichzeitig das gesamte Schrottvolumen durch den elektrischen Einschmelzprozeß.

Wenn der Schrott weitgehend eingeschmolzen ist, deckt die zusätzliche Energie aus der Nachverbrennung jene Ver-

Schematische Darstellung der Abgaskontrolle

- 1 Abgaskrümmmer
- 2 Frischluftzufuhr
- 3 Probenahme (CO, CO₂, O₂, T...)
- 4 Analyse- und Steuergerät
- 5 Zu den Kohlenstaub-Sauerstoff-Lanzen, Brennern und Sauerstoffinjektoren



luste, die eine nichtbeheizte Schlackenoberfläche an die Umgebung abgibt (ca. 10 kWh/t Stahl).

Die Schaum Schlacke, die bis jetzt hauptsächlich gegen Ende der Einschmelzzeit und während der Überhitzungsphase erzeugt wurde, entsteht schon in der Vorwärmphase.

Der bereits beschriebene Effekt des besseren Wärmeübergangs von einer Emulsion auf einen Feststoff (im Vergleich zu einem Gas gleicher Temperatur auf einen Feststoff) potenziert sich in diesem Verfahren. Durch die frühzeitige Schrottvorwärmung kann die Schaum Schlacke in der Schrottsäule immer weiter aufsteigen und ihrerseits weiteren Schrott erwärmen. Schrottsorten geringerer Dichte (also mit einem größeren Verhältnis von Oberfläche zu Volumen) begünstigen den Wärmeübergang bzw. -ausgleich.

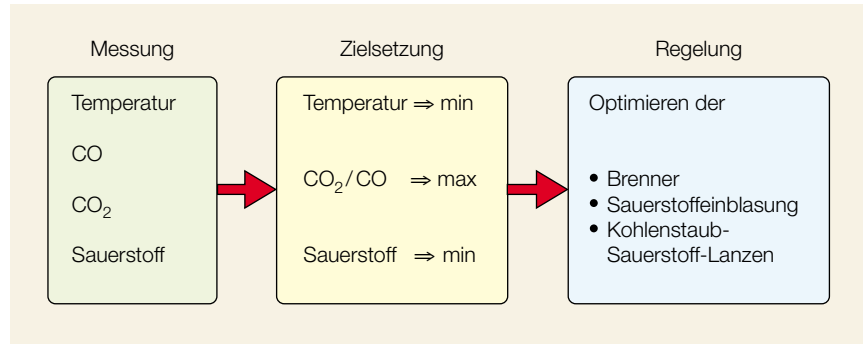
Ursprünglich als Schutz der wassergekühlten Wand- und Deckelelemente gegen die Abstrahlung des Lichtbogens eingeführt, brennt der Lichtbogen unter Schlacke bei gleicher Leistung mit nahezu halbierten Lichtbogenlänge. Gleichzeitig gehen auch die Verluste an die wassergekühlten Elemente zurück.

Je höher also zu Schmelzbeginn diese Schlacke aufschäumt, umso früher werden diese Effekte erzielt. Daneben bietet diese Arbeitsweise zusätzlich den Vorteil, daß die Elektrode wesentlich früher der oxidierenden Atmosphäre entzogen wird und damit der Elektrodenverbrauch stark zurückgeht.

Mit dieser Arbeitsweise lassen sich Abstichgewichte von 85–95 t in Taktzeiten unter 40 min erreichen. Das entspricht einer Jahresproduktion von mehr als 900 000 t Flüssigstahl.

Kontrollsystem für die Verbrennung bzw. Nachverbrennung

Jeder Ofen ist mit einem separaten Ventilstand für die Brenner und die Sauerstoffinjektoren ausgestattet. Die Zuführung zum Lanzenmanipulator wird über den Sauerstoffdruck in einer separaten Leitung geregelt.



Regelungsschema des Verbrennungs- bzw. Nachverbrennungsprozesses

13

Die Brennerregelung erfolgt über die Rücklaufftemperatur des Brennerkühlwassers. Damit kann im Falle einer Blockierung oder anderer Störungen jeder Brenner separat abgeschaltet werden. Um im Normalfall einen einwandfreien Brennerbetrieb gewährleisten zu können, müssen diese auch außerhalb des Betriebs mit geringen Mengen an Brennstoff und Sauerstoff versorgt werden.

Das Regelungssystem für die Verbrennung bzw. Nachverbrennung besteht im wesentlichen aus einem Probeentnahmegesetz, einer Schlauchleitung, dem eigentlichen CO/CO₂/O₂-Analysegerät und einem Steuerkasten 12, 13.

Das Probeentnahmegesetz, eigentlich ein Proberohr mit Selbstreinigungsmechanismus, befindet sich im Abgasstrom direkt am Anfang des stationären wassergekühlten Abgaszuges. Das Proberohr muß sehr sorgfältig installiert werden, um sicherzustellen, daß es keine Falschluff mit einziehen kann. Im Proberohr wird das heiße Abgas kontinuierlich erfaßt, abgekühlt und mittels eines Schlauchs zum Analysegerät geführt. Dort wird das Abgas mengenmäßig auf Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und auf Sauerstoff untersucht. Die Meßergebnisse werden vom Regelsystem in Sollwertsignale umgewandelt und einzeln an die entsprechenden Ventile des Ventilstandes weitergeleitet.

Dies setzt allerdings voraus, daß man nach der Installation der Zusatzbrenner die Ofencharakteristik ermittelt und danach die Zusatzbrenner kalibriert.

Mit der Entwicklung dieses neuartigen Schmelzverfahrens und des Gleichstrom-Doppel-Lichtbogenofens bietet ABB Stahlwerken die Möglichkeit, Rohstahl unter Verwendung schlechter Schrottqualitäten kostengünstig zu produzieren. Der erste Doppelofen dieser Bauart geht im April 1997 in Malaysia in Betrieb.

Adresse des Autors

Hubert Trenkler
 ABB Industrie AG
 Postfach
 CH-5401 Baden/Schweiz
 Telefax: +41 (0) 56 486 7309