



FOTO: SHB

Instandgesetzter Lichtbogenofen beim Abstich.

# Modernisierung von Drehstrom-Lichtbogenöfen in Stahlgießereien

VON PETER KUHLOW, PARCHIM,  
WOLFGANG WEBER, RIESA, UND  
GUNTHER SACHSE, LEIPZIG

## Aufgabenstellung

Zunehmende Verschleißerscheinungen, Leistungsabfall und Störungen sowie Ersatzteilprobleme des 8-t-Lichtbogenofens (**Bild 1**) führten zum Auftrag für die kompletten Instandsetzung und Modernisierung der Ofenanlage, außer Ofenleistungsschalter, Ofentransformator mit Drosselspule, Hochstromleitung mit den Stromseilen bis zu den Elektrodentragarmen.

In einem vorgegebenen Zeitplan waren die Demontage, die Instandsetzung, die Montage und die Inbetriebnahme mit Ein-

weisung des Bedien- und Leitpersonals durchzuführen.

Vorgesehen war der Einsatz einer neuen Ofenregelung mit gleichzeitiger Erneuerung der gesamten Hydraulikanlage und den erforderlichen Elektrodenregelventilen. Alle Hydraulikzylinder sollten regeneriert und wieder eingebaut werden. Gleichzeitig war die gesamte Ofensteuerung für alle Haupt-, Hilfs- und Nebenanlagen zu erneuern. Dazu gehören nachfolgende Anlagenteile:

- > der Ofenleistungsschalter mit Wandler,
- > der Ofentransformator mit den Transformatorschutzeinrichtungen,
- > die Hydraulikanlage,
- > die Ofenkühlung,

- > das Hauptsteuerpult Warte und die Vort-Steuerpulte,
- > die komplette Ofensensorik und Signaleinrichtungen,
- > die Notabschaltungen.

Als Umbauzeitraum wurden sechs Wochen einschließlich Inbetriebnahmen und Warmfunktionsproben geplant.

## Elektroanlage

### Schaltanlage

Die bestehende Schaltanlage für die Steuerung und Regelung der Ofenanlage wurde komplett demontiert. **Bild 2** zeigt das alte Bedienpult. Die neu konzipierte Schaltanlage (**Bild 3**) enthält die Niederspan-

nungseinspeisung und alle erforderlichen Abgänge für Hilfsbetriebe, die Ventilsteuerungen sowie alle Steuerungskomponenten für die Signalverarbeitung.

Die Spannungsversorgung wurde mehrfach untergliedert, um im Fall von Kabelschäden eine Notfallbedienung der Ofenbewegungen zu ermöglichen.

Für die Signalverarbeitung wurde eine SPS-Steuerung Siemens Simatic-S7 eingesetzt.

Die Einbindung der Prozesssignale erfolgt je nach Erfordernis digital, analog oder über Feldbus. Die Feldbusanbindung wurde zur Gewährleistung einer möglichst hohen EMV (elektromagnetische Verträglichkeit) auch für kurze Strecken über LWL (Lichtwellenleiter) realisiert.

### Bedienpulte

Bei der Konzipierung und Positionierung der Bedienpulte wurde darauf Wert gelegt, den Anlagenbedienern flexible Bedienmöglichkeiten unter Einhaltung der höchsten Sicherheitsanforderungen in die Hand zu geben. Somit wurde der Umfang der Bedienmöglichkeiten auf dem Hauptpult (Bild 4) und an den Vorort-Pulten am Ofen erweitert.

Das zentrale Außensteuerpult ist in der Nähe des Lichtbogenofens (LBO) angeordnet. Von diesem Pult aus werden nachfolgende Hydraulikzylinder angesteuert:

- > Elektroden 1 bis 3 heben/senken,
- > gemeinsames Heben aller Elektroden,
- > Deckel heben/senken,
- > Deckel schwenken und
- > Ofen kippen, vor/zurück.

Beispielsweise ist es möglich, das Ofenkippen von vier verschiedenen Bedienstellen aus mittels Analog-Joystick zu bedienen. Durch die Strukturierung der Anlagenbedienung in mehrere, gegeneinander verriegelte Freigabebereiche sind Fehl- bzw. Doppelbedienungen ausgeschlossen.

Es sind weitere Vorort-Pulte für Abstich, Abschlacken und den Ofentürhub montiert. Alle Vorort-Pulte sind durch stabile Schutzhauben gegen mechanische Beschädigungen geschützt.

An jeder Bedienstelle sind mit Vorhängeschloss abschließbare Personenschutzschalter angeordnet. Für die Absicherung des Elektrodenwechsels gibt es eine separate Bedienstelle.

### Visualisierung

Die Visualisierung der Ofenanlage wurde mittels Siemens-Touch-Panel und WinCC flexibel realisiert (Bild 4). Umfang und Inhalt der Anzeige- und Bedienmasken wurden individuell mit dem Kunden abgestimmt und enthalten somit exakt auf die Bedürfnisse des Anlagenbetreibers zugeschnittene Informationen.

## KURZFASSUNG:

Am Beispiel eines 1984 in Betrieb genommenen 8-t-Lichtbogenofens wird die umfassende Instandsetzung und Modernisierung der Ofenanlage beschrieben. Dazu gehören die elektrotechnische Anlage, die Hydraulik und der mechanische Teil des Ofens. Besonderer Wert wurde auf die bedienerfreundliche Ausführung, die Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Forderungen und die Verbesserung der Mess-, Steuer- und Regelungstechnik gelegt.

Chargenbegleitende Messungen wurden vor und nach der Instandsetzung durchgeführt. Das Bedien- und Instandhaltungspersonal wurde im erforderlichen Maße eingewiesen.

Vergleichende Betrachtungen zu den Ergebnissen der Kennzahlen vor und nach der Instandsetzung zeigen die Effektivität der Maßnahmen, die sicher auch für andere Gießereien von Interesse sind.



Bild 1: Lichtbogenofen 1 vor der Instandsetzung.

FOTO: AT5 SACHSE



Bild 2: Bedienpult – alte Ausführung.

FOTO: AT5 SACHSE

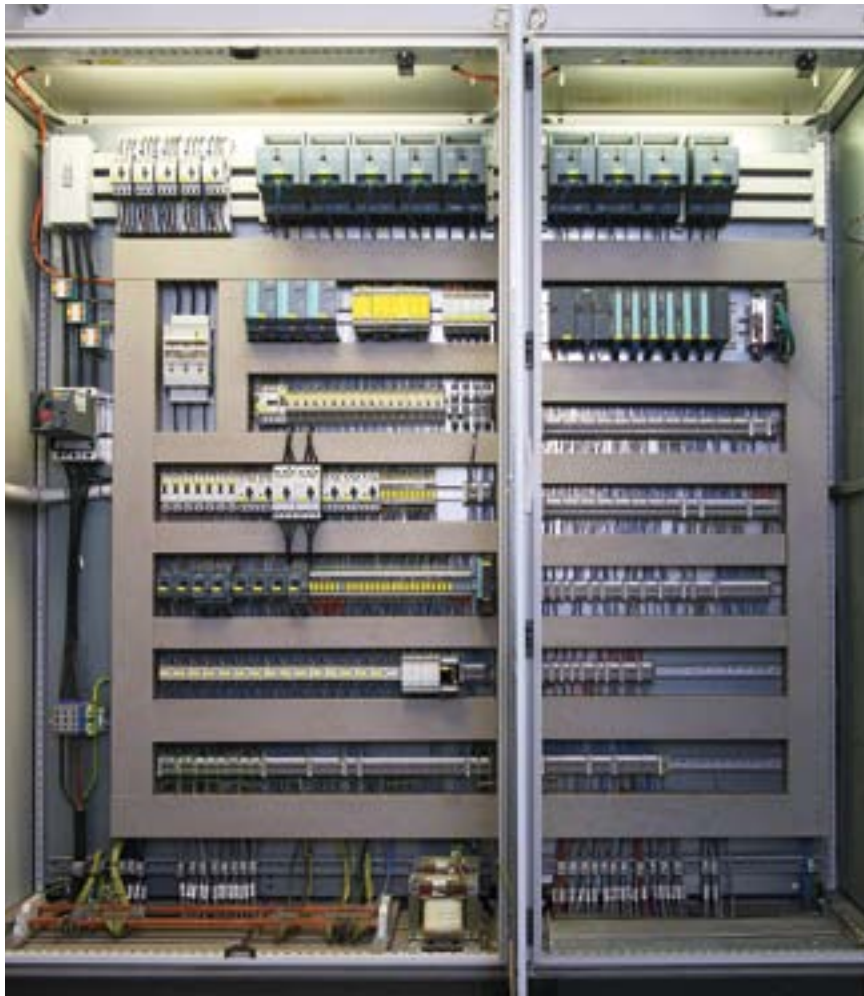


FOTO: ELMO

Bild 3: Der neue Schaltschrank.



FOTO: SHB

Bild 4: Das neue Hauptbedienpult.

### Steuerungskonzept und Elektrodenregelung

Die Steuerung und Regelung der Ofenanlage wird durch diskrete Pultbedienung und Eingaben über den Visualisierungsmonitor bedient. Die vollständig überholte Hydraulikanlage wird nun zeitgemäß durch eine einzige Bedienhandlung gestartet und automatisch überwacht.

Die Elektrodenregelung ist speziell auf die Erfordernisse dieser verhältnismäßig kleinen Lichtbogenöfen zugeschnitten und wurde ebenfalls in der SPS-S7 implementiert. Durch Adaption der Regelparameter wird erreicht, dass sich das Regelverhalten an den Schmelzfortschritt anpasst [1].

Die Sollwertvorgaben für die Regelung können für jede Elektrode separat und unabhängig angewählt werden. Dies ermöglicht dem Bediener eine unsymmetrische Einstellung der Sekundärströme je nach Erfordernis und Schrottbeschaffenheit.

Der Schutz der Ofenanlage vor Überströmen wurde durch Einbau redundant wirkender Überwachungseinrichtungen sichergestellt. Diese Redundanz wurde durchgängig realisiert. Sie ist durch getrennte Signalwege für die Stromerfassung, durch separate Auswertesysteme und schließlich durch getrennte Stellglieder für den Elektrodenhub gewährleistet.

Eine zeitgemäße Elektrodenbruchsicherung durch Überwachung der Drücke in den Elektrodenzylindern gehört ebenso zum Standard der Modernisierungsmaßnahme wie der Einbau einer modernen Kippwinkelerfassung und -anzeige.

### Sonstiges

Die Integration autark arbeitender Nebenaggregate in die Ofensteuerung wird dem Kundenwunsch entsprechend individuell ausgeführt. Im vorliegenden Beispiel betraf dies die Abgasregulierung, deren Bedienung und Anzeige in die Visualisierung aufgenommen wurde.

### Hydraulikanlage

#### Konzept

Das Konzept zur Überholung der Hydraulikanlage umfasste die komplette Erneuerung der stark verschlissenen Wasserhydraulikanlage unter Wiederverwendung und Regenerierung der Hydraulikzylinder. Der Betriebsdruck der Anlage von max. 30 bar blieb erhalten. Damit können die erforderlichen Elektrodenverstellgeschwindigkeiten für einen stabilen Elektrodenbetrieb erreicht werden. Die hydraulischen Handventile wurden gegen elektrisch ansteuerbare Magnetventile gewechselt.

Als Hydraulikflüssigkeit kam HLP-46 D zum Einsatz. Diese Druckflüssigkeit ist ein hochwertiges Mineralöl mit ausgezeichnetem Viskositäts- und Temperaturverhalten,

das geringe Wassermengen aufnehmen kann und ein ausgezeichnetes Schmutztragvermögen besitzt.

Zu Umbaubeginn erfolgte die komplette Demontage der alten Hydraulikanlage. Die Anlagenteile und Rohrleitungen wurden demontiert und verschrottet. Die Hydraulikzylinder kamen zur Regenerierung in die Werkstatt. Nach der Demontage wurden die Gruben und Kanäle des LBO komplett gesäubert. Anschließend begannen sofort die Neuverrohrung der Gesamtanlage und die Montage der neuen Hydraulikanlage.

### Hydraulikraum

Der Hydraulikraum wurde nach der Demontage der Altanlage gesäubert, die Wände wurden neu gestrichen. In diesem Raum wurde der neue Hydrauliktank mit einer Kapazität von 2400 l Hydraulikflüssigkeit aufgestellt. **Bild 5** zeigt den Hydraulikraum nach dem Umbau.

Die beiden Axialkolbenpumpen sichern einen redundanten Betrieb des LBO und sind direkt auf dem Tank montiert. Die Druckspeichereinheit ist neben dem Tank aufgestellt.

Eine dritte Pumpe versorgt im Bypass einen Heizer, einen Kühler und einen Filter, um dem Öl immer gleichmäßig optimale Bedingungen zu schaffen.

Alle Funktionen sind überwacht und werden der Programmsteuerung zur Registrierung und Auswertung übermittelt.

### Lichtbogenofen

In der Nähe des LBO sind die Steuerblöcke mit den entsprechenden Ventilen montiert.

Für die Elektrodenregelung kommen vorgesteuerte Proportionalventile zum Einsatz. **Bild 6** zeigt die Proportionalventile. Zur genauen und reproduzierbaren Einstellung der Volumenströme werden digitale Leistungsverstärker verwendet. Die Position des Hauptkolbens im Ventil ist lageregelt.

Für das schnelle Elektrodenheben wird je Elektrode eine Eilgangsteuerung (Bypass - Ventil) aufgebaut.

Eine zweite Druckspeichereinheit für den Notbetrieb ist in der Nähe der Regelventile angebracht. Sie ist so ausgelegt, dass ein begonnener Abstich beendet bzw. die Elektroden bei Ausfall der Steuerung mit Handventilen aus dem Schmelzbad gefahren werden können.

### Ausführungshinweise

Das Ofenkippen wird über ein Proportionalventil angesteuert und gestattet ein sanftes Abstechen des LBO. Die Elektrodenverriegelung an den Elektrodenarmen wird über Handventile aktiviert.

In den Druckleitungen zu den drei Elektrodenzylindern sind Druckmessdosen zur Ansteuerung einer „Elektrodenbruchsicherung“ montiert. Diese verhindert beim Aufahren der Elektroden auf nichtleitende Partikel im Schrotteinsatz das Abbrechen der Graphitelektroden. Für den Notbetrieb zur Elektrodenbewegung und zum Kippen des Ofens sind Ventile mit Handhebeln eingesetzt. Ein pneumatisch betätigtes, von der Steuerspannung unabhängiges Sicherheitsnotventil wird zum Trennen der Hydraulikleitung der Speicherstation verwendet. Alle Hydraulikleitungen wurden komplett erneuert.

### Kühlwasserversorgung

Die Kühlwasserversorgung am LBO wurde ebenfalls komplett erneuert. Die Anlage (Verteiler, Wasserauffangbecken, Verrohrung) wurde in Chrom-Nickel-Stahl-Ausführung montiert.

### Mechanische Anlage

Die mechanische Ofenanlage wurde zur Überholung komplett demontiert.

Die Stromseile wurden nur abgebaut, diese mussten bereits vor ca. drei Jahren komplett erneuert werden. Die dabei eingesetzten isolierten Seile waren in einem guten Zustand.



FOTO: LIEBSCHER HYDRAULIK

Bild 5: Hydraulikraum nach dem Umbau.



FOTO: ELMO

Folgende Anlagenteile kamen nach der Demontage zur Überholung in die Werkstatt:

- > drei Elektrodenarme,
- > drei Elektrodenführungssäulen,
- > die komplette Elektrodenführung,
- > die Deckelhub- und Deckelschwenkvorrichtung mit Antrieb und
- > alle Hydraulikzylinder.

Diese Teile wurden in der Regel mit bereitgestellten Ersatzteilen überholt. An den Elektrodentragarmen wurden die Elektrodenklemmung, die Kontaktbacken, die wassergekühlten Stromrohre und die Betriebsisolation begutachtet. Festgestellte Mängel wurden beseitigt.

Als Schwerpunkt der mechanischen Überholung stellten sich die stark verschlissenen Tragarmführungen heraus. Die Führungsleisten waren stark eingelaufen und mussten komplett überarbeitet werden. Aus diesem Grund wurden alle Führungsrollen mit größerem Rollendurchmesser neu gefertigt, um die entstandene Bearbeitungstoleranz wieder auszugleichen.

Der Deckelhub-/Deckelschwenk-Antrieb war verschlissen und musste komplett instandgesetzt werden. Die Lager wurden erneuert. Beide Hydraulikantriebe wurden ebenfalls überholt.

Erforderliche zusätzliche Ersatzteile wurden kurzfristig beschafft. Alle mechanischen Anlagenteile wurden einer Farbbehandlung unterzogen. Das Ofengefäß und die Ofenwiege wurden vor Ort auf einem Reparaturplatz abgestellt, gesäubert und begutachtet. Nach der Reparatur von Schadstellen wurden beide Anlagenteile einer Farbbehandlung unterzogen.

Die Montage der überholten mechanischen Ofenanlage erfolgte entsprechend Ablaufplan. Das Bild auf S. 40 zeigt den instandgesetzten Ofen.

### Ergebnisse

#### Messung

Zum Nachweis der Verhältnisse vor und nach der kompletten Instandsetzung wurden chargenbegleitende Messungen an ausgewählten Chargen durchgeführt. Die Messungen wurden in Anlehnung an die geltende Prüfnorm IEC 60676 mittels AC Power Analyser D5155 durchgeführt (Messintervall 60 s). Das Messprotokoll beinhaltet:

- > Elektrodenzuordnung Kanal a, b, oder c und aktuelle Uhrzeit,
- > Sekundärstrom/Phase und Mittelwert,
- > Spannung am Messpunkt/Phase und Mittelwert,
- > Wirkleistung/Phase und Mittelwert,
- > Leistungsfaktor  $\cos\varphi$ /Phase und Mittelwert,
- > Resistanz/Phase und Impedanz/Phase,
- > Energieverbrauch Phase und  $\Sigma$  Energieverbrauch (kumulativ).

Zu Beginn jeder Messung erfolgt die Zuordnung pro Elektrode zum jeweiligen Kanal a, b oder c. Außerdem werden Werte wie z. B. Einsatzmasse, Chargennummer, kWh-Zählerstand Ofen, Umschaltung Spannungs- und Stromstufen sowie Primärspannung erfasst. Der Einbau von Reihenklemmleisten zum Anschluss der Messtechnik ist sinnvoll. Die Messungen vor Umbaumaßnahme (betriebswarmer Ofen)

zur Zustandsaufnahme erfordern einen zeitlichen Aufwand von maximal drei Chargen. Sie dienen der Einschätzung des momentanen Zustandes elektrischer, elektrothermischer und mechanischer Eigenschaften und sind ca. drei Wochen vor Umbau zu realisieren. Außerdem werden folgende Daten erfasst: Leistungsschalter (Schutzeinstellung), Transformator, Drosselspule, Hochstromleitung, Temperaturen von Anlagenteilen, Elektrodentragarmführung u. a. Anschließend Auswertungen mittels der Ofenkennlinien für ausgewählte Transformatorstufen lassen Aussagen über zweckmäßige Arbeitsbereiche und Verschleißerscheinungen zu. Zusätzliche Betrachtungen zu Einschmelzzeiten (in min), zu Heizraten (in °C/min), zum Strahlungsindex (in MWV/m<sup>2</sup>), zur Fahrweise in Abhängigkeit vom Einsatz, zum spezifischen Elektroenergieverbrauch (in kWh/t) und Graphitelektroden (GE)-Verbräuchen (in kg/t) (sind möglich [2]).

Bei der Inbetriebnahme waren etwa fünf Chargen erforderlich, um ein günstiges Betriebsverhalten mit entsprechenden Einstellungen zu erreichen. In den folgenden zwei Chargen wurden Feinjustagen und minimale Korrekturen an Eingabewerten durchgeführt. Damit ist sichergestellt, dass die Anlage entsprechend den Voraussetzungen optimal funktioniert. Bild 7 zeigt die Mess- und Einstellwerte beim Einschmelzen vor und nach der Instandhaltung.

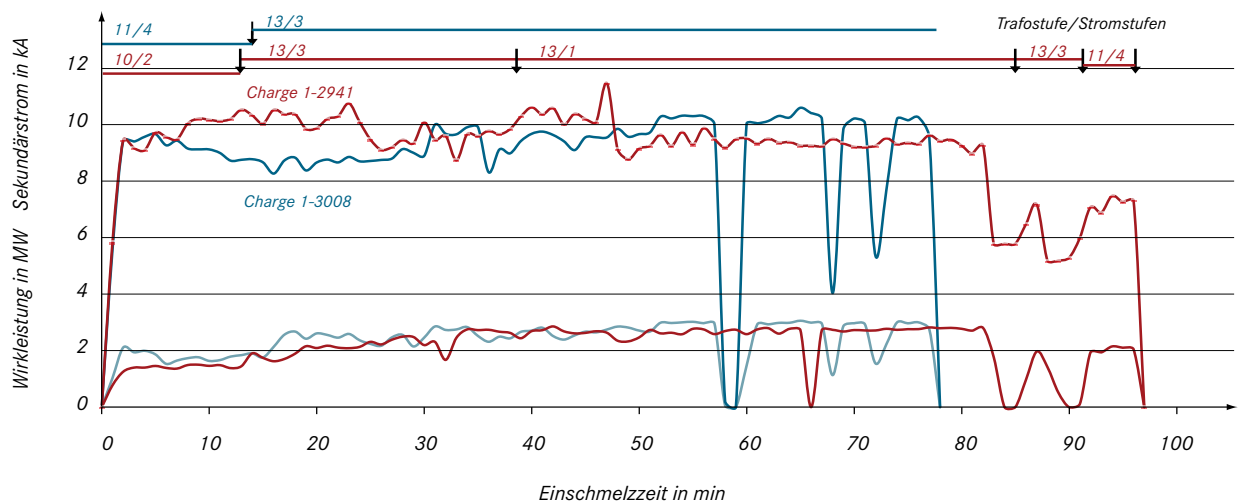
Das betriebsinterne Qualitätsmanagement bewertet monatlich die Daten zu Verbräuchen und kann im Vergleich zur Auswertung nach Inbetriebnahme Veränderungen besser kontrollieren und zeitnah

**Tabelle 1: Vergleich der Kennzahlen und Messwerte vor und nach der Instandsetzung/Modernisierung.**

	Vor Modernisierung		Nach Modernisierung		Ergebnis
	Charge I-2941 Datum: 2.2.12		Charge I-3008 Datum: 28.3.12	Basis korrigiert Einsatz 1545 °C	
Einsatzmasse (kalter Satz) in t	8,200		7,900	<b>8,200</b>	<b>8,200</b>
Einschmelzzeit (1545/1537 °C) in min	94		77,00	79,8	
Lastzeit in min	91,2		73,9	76,7	<b>-14</b>
Mittlere Einschmelzleistung (Lastzeit) in tk. S./h	5,397		6,414	6,356	<b>0,959</b>
Mittlere Einschmelzleistung brutto in tk. S./h	5,234		6,156	6,104	0,870
Elektroenergieverbrauch in kWh	3655		3220	3342	
Mittlerer Energieeintrag (Lastzeit) in kWh/min	40,1		43,6	43,6	
Spezifischer Elektroenergieverbrauch in kWh/t	445,7		407,6	407,6	<b>-35</b>
Spezifische Leistung in kW/t	293		331		
Badtemperatur Einschmelzende in °C	1550		1545		
Mittlere Stromstärke (rms) in kA	9,428		9,381	9,381	
Wirkwiderstand in mV	9,020		9,902		
Verlustwiderstand (Dr. + Tr. + Leitung) in mV	0,987		0,887		<b>-0,1</b>
Lichtbogenwiderstand in mV	8,033		9,015		
Lichtbogenspannung in V	75,7		84,6		
Lichtbogenlänge in mm	55		65		
Wirkleistung in kWh/h	2405		2614		209
Elektrische Verlustleistung in kWh/h	263		234		
Wärmeverluste in kWh/h	268		260		<b>-8</b>
Lichtbogenleistung in kWh/h	2142		2380	2120	
Nutzleistung in kWh/h	1874		2120		<b>246</b>
Elektrothermischer Wirkungsgrad	0,779		0,811		0,033
Elektrischer Wirkungsgrad	0,891		0,910		
Strahlungsfaktor (ohne Abdeckung) in MWV/m <sup>2</sup>	89		110		22
GE-Verbrauch (berechnet) in kgGE/t	3,047		2,557	2,565	<b>-0,48</b>

**Erläuterungen:**

Einschmelzen Basis 1545 °C;  
 alle Messwerte wurden durch ATS Sachse GmbH bereitgestellt;  
 Wirkleistung primär/sekundär Faktor 1,034;  
 die Primärenergie wurde zu Beginn und am Ende der Schmelze gemessen;  
 zum bereinigten Vergleich wurden die Energieverbrauchswerte „vor Instandhaltung“ mit dem Faktor 0,9933 neue Energiemessung korrigiert;  
 die Reduzierung des Verlustwiderstands durch gut instand gesetzte Kontaktbacken beträgt erfahrungsgemäß mindestens 0,1 mΩ (-26,5 kWh/h bei 9,4 kA);  
 der Anstrich des Ofengefäßes reduziert die Wärmeverluste am Ofengefäß um ca. 3 % (-7,8 kWh/h beim Einschmelzen, ca. 15,6 kWh/h beim Frischen und Feinen).



**Bild 7: Wirkleistung und Sekundärstrom vor und nach der Modernisierung (Quelle: ATS Sachse).**

**Tabelle 2: Korrekturfaktoren für den thermischen Zustand ( $k_{th}$ ) des LBO.**

	Charge				
	1	2	3	4	5
Faktor $K_{th}$	1,20	1,10	1,05	1,02	1,00
Ofenzustand	kalt				warm

**Tabelle 3: Richtwerte Warmhalten, mittlere Leistung, Rauchgasklappe zu („0“), betriebswarmer Ofen.**

Temperatur in °C	Mittlere Leistung	
	in kWh/h	in kWh/min
1500	520	8,7
1600	592	9,9
1650	629	10,5
1700	668	11,1

Einfluss darauf nehmen. Eine messtechnische Überprüfung der Ofenanlage ist im Abstand von zwei Jahren zweckmäßig. Damit können Unregelmäßigkeiten der LBO-Anlage erkannt und beseitigt werden.

**Vergleich**

Der Auftrag für die komplette Instandsetzung und Modernisierung war nicht an den Nachweis von Kennzahlvorgaben geknüpft. Vereinbart waren aber chargenbegleitende Messungen vor und nach der Instandsetzung/Modernisierung des Lichtbogenofens. Das Ergebnis solcher umfangreichen Maßnahmen ist nicht nur für den Auftraggeber von Interesse. Deshalb wurden ausgewählte, vergleichbare Chargen mit folgenden Werten und Kennzahlen für das Einschmelzen analysiert:

- > Einschmelzleistung,
- > Einschmelzwirkleistung,
- > Elektroenergieverbrauch,
- > Graphitelektrodenverbrauch,
- > mittlerer Elektrodenstrom (rms-Werte),
- > sonstige elektrothermische Werte.

Unterschiede der Einsatzmassen und der Zählerfehler Elektroenergiemessung wurden beim Vergleich in der **Tabelle 1** berücksichtigt. Ofentransformator und Drosselspul sind unverändert.

Die Senkung des spezifischen Elektrodenverbrauchs wurde theoretisch ermittelt [3]. Bei gleichen mittleren Elektrodenströmen resultiert die Einsparung aus der Einschmelzzeitverkürzung, den besseren Eigenschaften und Einstellmöglichkeiten der Elektrodenregelung. Damit sind weniger Kurzschlüsse (kleinerer Spitzenabbrand) sowie geringere Elektrodenbrüche (Bruchsicherung) verbunden.

**Tabelle 2** enthält Korrekturfaktoren für die Berücksichtigung des thermischen Ofenzustandes (Speicherwärme). Damit las-

sen sich in etwa die folgenden Kennzahlen korrigieren oder bei vorgegebenen Chargen/Tag die Mittelwerte der Schmelzzeit, der Schmelzleistung, des Elektroenergieverbrauchs, des Elektrodenverbrauchs und der Heizrate berechnen. Anhaltswerte für die Warmhalteleistung zeigt **Tabelle 3**.

Bei der Vorgabe der Einstellwerte für die eingangs beschriebene Elektrodenregelung wurde auch die Vermeidung hoher Lichtbogenbrennflecktemperaturen realisiert. Beim Warmhalten und geringer Heizrate wurde eine etwas höhere Bogenspannung bei stromschwachen Lichtbögen vorgegeben. Das vermeidet metallurgisch unerwünschte, örtliche Brennflecküberhitzungen [4].

**Fazit**

Die nach 28 Jahren Betriebszeit erfolgte umfassende Instandsetzung und Modernisierung des LBO 1, Typ IHF 31 (Hersteller KGYV, Ungarn), in der SHB Stahl- und Hartgusswerk Bösdorf GmbH, Knautnaundorf bei Leipzig, diente der Wiederherstellung der vollen Funktionalität.

Der Einsatz einer SPS 7-basierten Elektrodenregelung, einer bedienerfreundlichen MSR-Technik (Mess- Steuer- und Regelungstechnik) und Verbesserungen der Schutz- und Sicherheitstechnik haben den LBO zu einem leistungsfähigen und zuverlässigen Schmelzaggregat gemacht. Messungen vor und nach der Instandhaltung ermöglichten den Vergleich von ausgewählten Chargen, die eindeutig die erzielten Verbesserungen belegen.

Gerade für die Stahlgießereien ist die hier aufgezeigte Lösung eine preisgünstige Alternative zur Neuinvestition eines Lichtbogenofens.

Die Autoren danken den Mitarbeitern der ausführenden Firmen ELIMO GmbH, Riesa, Liebscher Hydraulik, Gröditz, Metall- und Anlagenbau GmbH, Gröditz, ATS Sachse GmbH, Leipzig, und den Mitarbeitern des Auftraggebers SHB Stahl- und Hartgusswerk Bösdorf GmbH, Knautnaundorf.

Besonders ist Herrn Gert Lungkwitz, ELIMO GmbH, für die Programmierung und Visualisierung sowie die Arbeiten zum Fachbericht zu danken.

Dipl.-Ing. Peter Kuhlow, Ingenieurbüro für Elektrowärme Kuhlow, Parchim, Dipl.-Ing. (FH) Wolfgang Weber, ELIMO GmbH Riesa, Riesa, Gunther Sachse, ATS Sachse GmbH, Leipzig

**Literatur:**

- [1] Krüger, K.: Modellbildung und Regelung der elektrothermischen Energieumsetzung von Lichtbogenöfen. Dissertation. Fachbereich Maschinenbau, Universität der Bundeswehr, Hamburg. Fortschrittberichte VDI Reihe 6: Energietechnik Nr. 382. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 1998.
- [2] Kuhlow, P.: Energieverluste und Möglichkeiten zur Verbrauchssenkung an Lichtbogenöfen in Eisen- und Stahlgießereien. *elektrowärme international* 63 (2005), [Nr. 2], S. 74-79.
- [3] Kuhlow, P.: Graphitelektroden - Möglichkeiten zur Verbrauchssenkung. *elektrowärme international* 61 (2003), [Nr. 3], S. 117-124.
- [4] Kuhlow, P.: Berechnungen zum Lichtbogen von Lichtbogenöfen. *elektrowärme international* 68 (2010), [Nr. 4], S. 115-122.