Sonderdruck
www.prozesswaerme.net

03 | 2019
ISSN 2567-3742

PROZESSWÄRME
Fachmedium für Thermoprozesstechnik

Erwin Dötsch, Jean-Pierre Hacquin, Dietmar Mitschulat

Steuerung einer Induktions-Schmelzanlage auf Basis virtueller Maschinen

Steuerung einer Induktions-Schmelzanlage auf Basis virtueller Maschinen

von **Erwin Dötsch, Jean-Pierre Hacquin, Dietmar Mitschulat**

Die Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG hat auf dem Weg zur Industrie 4.0 ein Datenmanagementsystem eingeführt, mit dessen Hilfe die Fertigungsverläufe des vielfältigen Produktionsprogramms per App und Smartphone transparent gemacht werden. In diesem Zusammenhang werden hohe Anforderungen an die Steuerung der beiden Induktionsofen-Tandems gestellt, die von dem ABP-Schmelzprozessor Prodapt-Enterprise in Verbindung mit virtuellen Systemen und einem betriebseigenen Server voll erfüllt werden. Die durchgängige Erfassung und Auswertung der Prozessdaten bringt Einsparungen beim Energie- und Materialeinsatz.

Control system of an induction melting plant based on virtual machines

Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG has introduced a data management system on its way to Industrie 4.0. This data system makes the manufacturing processes in the diverse production program transparent via app and smartphone. High demands are placed in this context on the system controlling the two induction furnace tandems, which are completely fulfilled by ABP's Prodapt-Enterprise melt processor together with virtual systems and the company's own server. The on-going recording and evaluation of process data generates savings in the deployment of energy and materials.

Die Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG (KE) (**Bild 1**) ist ein seit über 60 Jahren bestehendes familiengeführtes Unternehmen, das als Kundengießerei mit Modellbau und Konstruktionsberatung Eisengussteile hauptsächlich für den Maschinenbau herstellt. In einer Handformerei und in Automatenfertigung werden Gussrohlinge in Grau- und Kugelgraphitguss mit Stückgewichten von wenigen Kilogramm bis zu 8,5 t in Einzelfertigung sowie in Klein- und Mittelserien gegossen (**Bild 2**). In der Anzahl der 6.000 bis 7.000 unterschiedlichen Modelle drückt sich die Vielfalt der Produkte aus. In **Bild 3** sind signifikante Beispiele mittleren Gussgewichtes dargestellt. 170 Mitarbeiter produzieren etwa 1.000 t guten Guss pro Monat. KE ist nach DIN EN ISO 9001: 2019 zertifiziert und pflegt einen hohen Qualitäts- und Umweltstandard.

Die Sorten- und Mengenvielfalt des Flüssigeisenbedarfs erfordert eine flexible Schmelzanlage. Diese Anforderung wird von zwei ABP-Induktionsofen-Tandems erfüllt. Tandem 1 besteht aus zwei 3 t-Tiegelöfen, Typ ITMK 6000, die von einem 1.800 kW/250 Hz-Umrichter versorgt werden. Zwei 6 t-Tiegelöfen, Typ FS 60 (**Bild 4**), bilden das zweite Tandem, das von einem 3.500 kW/250 Hz-Umrichter gespeist wird. Beide Öfen sind mit dem TwinPower-System ausgerüstet, sodass ihre Leistung in beliebigem Verhältnis elektronisch auf die beiden zughörigen Öfen aufgeteilt werden kann [1].

Die Schmelzanlage wird im Einschichtverfahren gefahren. Dabei wird jeweils nach dem letzten Abstich das Schmelzgut für den Start der ersten Charge der nächsten Produktionsschicht in den heißen Tiegel chargiert. Anschließend kühlen die Öfen auf nahe Raumtemperatur ab, um dann um 6:00 Uhr morgens wieder in den Schmelzbetrieb zu gehen. Dazu werden die 6 t-Öfen ab 3:00 Uhr automatisch mit dem Kaltanfahrprogramm auf

1.000 °C linear hochgefahren, während die 3 t-Öfen erst ab 4:00 Uhr mit dem Kaltanfahrprogramm beaufschlagt werden, um ebenfalls mit 1.000 °C Schmelzguttemperatur ab 6:00 Uhr für die volle Leistungsbeaufschlagung bereit zu sein.

Bild 1: Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG

Entwicklungen bei KE auf dem Weg zu Industrie 4.0

Mit Unterstützung der Hochschule Kempten und mit Förderung durch Mittel der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) hat KE ein Datenmanagementsystem eingeführt mit dem Ziel, den Produktionsablauf transparent zu machen und so zu optimieren, dass Energie- und Materialeinsatz eingespart werden [2]. Dazu werden die Prozessdaten ab der Gattierung und der Formenherstellung bis zum Auspacken der Gussrohlinge erfasst und ausgewertet. Das digitale Monitoring wird per App auf Smartphones durchgeführt, indem u. a. Barcodes auf den Pfannen und Kästen eingesetzt werden, die der Mitarbeiter scannt und an eine Datenbank übermittelt (**Bild 5**). Auf diese Weise lässt sich nachverfolgen, welcher Kasten zu welcher Zeit mit welcher Schmelze gefüllt wurde. Das bringt beispielsweise die Möglichkeit, wichtige Bauteile schneller durchzuschleusen, ohne die Fertigungskapazität zu erhöhen. Ein weiterer Vorteil besteht in der möglichen Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz dadurch, dass das Verhältnis von Formsand zu Schmelze optimiert und exakt nur die Menge an Metall eingeschmolzen wird, die für den jeweiligen Guss tatsächlich benötigt wird.

Auch der spezifische Energieverbrauch der Schmelzöfen in Höhe von durchschnittlich 611 kWh/t Schmelze ist ein Hinweis auf den Nutzen des Datenmanagements. Dieser Wert ist im Zusammenhang mit dem Einschichtbetrieb und dem Produktionsprogramm zu sehen: Erstens ist bei dem täglichen Kaltanfahren jedes Mal die Speicherwärme der Feuerfestzustellung aufzubringen und zweitens fallen bei der Bereitstellung von Schmelzemengen, die über dem Fassungsvermögen eines einzelnen Ofens liegen, unvermeidlich hohe Warmhaltezeiten an. Unter diesen Voraussetzungen ist der wenig über 600 kWh/t liegende Energieaufwand ein günstiger Wert, der auf die transparente Fertigungslogistik zurückzuführen ist.

Bild 2: Abguss eines 8,5t-Maschinenbettes

In diesem Zusammenhang hat die Steuerung der Schmelzanlage eine zentrale Bedeutung. Die anspruchsvollen Voraussetzungen für die Durchführung des beschriebenen Datenmanagementsystems auf Seiten des Schmelzbetriebs wurden geschaffen durch die Installation des ABP-Kontrollsystems Prodapt-Enterprise in Verbindung mit einem betriebseigenen Server auf Basis virtueller Systeme.

Steuerung mittels virtueller Systeme

Die in Gießereien eingesetzten PC-Systeme sind oft nur zu einem Teil ihrer Kapazität ausgelastet. Dadurch bleiben Ressourcen ungenutzt und führen zu höheren Betriebskosten. Ein Weg aus dieser unbefriedigenden Situation ist die bei KE eingesetzte Nutzung von virtuellen Systemen. Dabei wird eine spezielle Software verwendet, um Hardwarefunktionen zu simulieren und virtuelle Computer zu erstellen. Auf diese Weise können mehrere Computer mit unterschiedlichen Betriebssystemen auf einem Server ausgeführt werden. Dies führt

Bild 3: Träger aus EN-GJS-400-15, je 484 kg

Bild 4: 6 t/3.500 kW-Induktionsofen-Tandem, Typ ABP FS 60

Bild 5: Barcode-Scannen an einem Formkasten

neben besserer Auslastung des Servers zu einer höheren Verfügbarkeit der Anwendungen, da die Anfälligkeit gegen Hardwareausfälle sinkt. Das Hardwarekonzept für den KE-Schmelzbetrieb ist in **Bild 6** dargestellt.

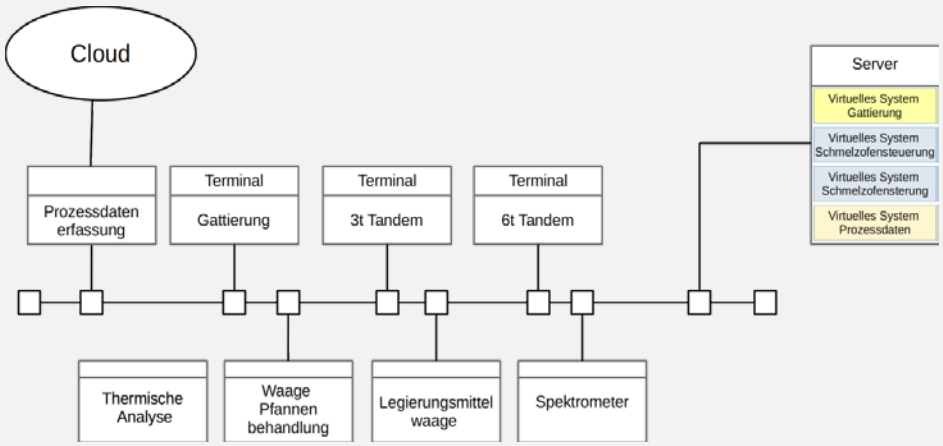

Bild 6: Hardwarekonzept der Schmelzbetrieb-Steuerung

Auf dem zentralen Server sind die virtuellen Maschinen mit den Kontrollsystemen für die unterschiedlichen Gewerke des Schmelzbetriebs installiert. Der Datenaustausch zwischen den Anwendungen auf den virtuellen Maschinen und den Komponenten im Feld erfolgt über TCP/IP basierte Protokolle. Sofern Feldkomponenten nicht netzwerkfähig sind, werden sie durch entsprechende Geräte erweitert und über eine Software, einen sogenannten Konnektor, in den Datenaustausch integriert.

Damit bietet sich die Möglichkeit, weitgehend alle prozessrelevanten Daten der einzelnen Gewerke zu erfassen und für die Auswertung in einer Prozessdatenbank bereichsübergreifend zu speichern, sodass für jedes Gussteil der Herstellungsprozess nachvollziehbar wird. Die Überwachung dieser Produktionsdaten eröffnet die Möglichkeit, Fehler frühzeitig zu erkennen und entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten.

Moderne Anlagen überwachen sich selbstständig und informieren den Betreiber, wenn das Aggregat den normalen Betriebsbereich verlässt. In diesem Zusammenhang erfolgte die Implementierung einer erweiterten Überwachung der Kühlsysteme für den Ofen- und den Umrichterkreis sowie der Kühlstation. Diese Daten können zwischen Betreiber und Hersteller ausgetauscht werden und bilden in bewerteter Form einen ersten Schritt in Richtung eines regelbasierten Anlagenmonitorings.

Zur Steuerung des Schmelzprozesses wird der anschließend beschriebene Schmelzprozessor Prodapt-Enterprise eingesetzt. Mit dem Gattiersystem wird entsprechend dem von der Arbeitsvorbereitung vorgegebenen Programm die Chargenzusammensetzung ermittelt und an den automatischen Gattierkran übertragen. Dieser füllt dann die berechneten Mengen an eisentragendem Schmelzgut in den Chargierwagen, von wo sie anforderungsgerecht in den Tiegel chargiert und geschmolzen werden. Gleichzeitig werden die ebenfalls vom Gattierrechner vorgegebenen Zuschlagstoffe von der Ofenbühne aus per Hand in den Tiegel chargiert. Die am Ende des Schmelzprozesses gezogene Probe wird im Spektrometer analysiert, das Ergebnis im Gattierrechner mit der Sollanalyse verglichen. Daraus folgen die Angaben für die auf der Ofenbühne bereitzustellenden Korrekturstoffe. Dabei werden die ebenfalls vom Gattierrechner vorgegebenen zusätzlichen Zuschlagstoffe berücksichtigt, die auf dem Gießereiflur bereitgestellt und beim Abstich in die Pfanne gegeben werden.

Neben dem Spektrometer wird eine Thermoanalyse für die

Kontrolle der Schmelzequalität stichprobenartig angewandt. Dort werden die C- und Si-Gehalte ermittelt sowie ein sogenannter K-Faktor als Maß für den Keimbildungszustand der Schmelze.

Schmelzprozessor Prodapt-Enterprise

Der ABP-Prozessor Prodapt-Enterprise bietet eine durchgängige Lösung für die Kontrolle des Schmelzbetriebs. Er unterstützt den Bediener beim Führen des Ofens in den Betriebsarten Sintern, Schmelzen und Kaltstart. Die Prozessbilder auf dem Monitor informieren den Bediener schnell und ausführlich über die Situation des Schmelzprozesses, anstehende Störungen und die aktuellen Messwerte (**Bild 7**). Neben einer wirtschaftlichen Fahrweise werden damit hohe Verfügbarkeit und Betriebssicherheit der Schmelzanlage erreicht.

Die Prozessbilder sind so angelegt, dass der Benutzer neben den aktuellen Daten über einen Mausklick auf den Verlauf der Messwerte zugreifen kann. Darüber hinaus können im Störmeldesystem den einzelnen Meldungen Handlungsanweisungen in Form von Bildern und Texten zugeordnet werden.

Als Beispiel ist in **Bild 8** das Übersichtsbild vom 6 t-Tandem mit den Öfen 3 und 4 dargestellt. Beim normalen Schmelzablauf steht dieses Bild auf dem Monitor über dem Bedienpult und gibt dem Bediener in klarer Information die notwendigen Hinweise über das aktuelle Geschehen in den Öfen. Die großen Zahlen zeigen von oben nach unten an: Ofeninhalt in kg, Schmelzetemperatur in °C, Leistungsbeaufschlagung in kW. Der horizontale grüne Balken (unter dem Ofenbild) ist ein Maß für den Tiegelverschleiß, worauf später genauer eingegangen wird. Darunter befinden sich die Chargen- und die Werkstoffnummer sowie eine Kennzahl für den Bediener. Der senkrechte orange Balken zeigt die Höhe der laufenden Leistung an.

Der eingangs geforderten Nachvollziehbarkeit des Schmelzprozesses trägt der Prodapt-Enterpise dadurch Rechnung, dass Gattierungsauftrags- und Schmelznummer verknüpft werden und somit die Zuordnung gegeben ist. Darüber hinaus werden die am Ofen durchgeführten Arbeiten protokolliert. Diese Protokollierung speichert neben den allgemeinen Daten der Schmelze den Behandlungsverlauf mit minütlicher Auflösung. Zum Behandlungsverlauf gehören der Aufheizvorgang sowie die Prozessereignisse wie Tarierung der Waage, Temperaturmessung und die Abgüsse. Zu jedem Ereignis werden der Zeitpunkt, die Dauer, der Ofeninhalt und die Temperatur der Schmelze erfasst. Darüber hinaus werden die Kenndaten des gewählten Werkstoffs und die gemessenen Analysen in der Prozessdatenbank archiviert.

Neben der Prozessführung erfasst die Visualisierung des

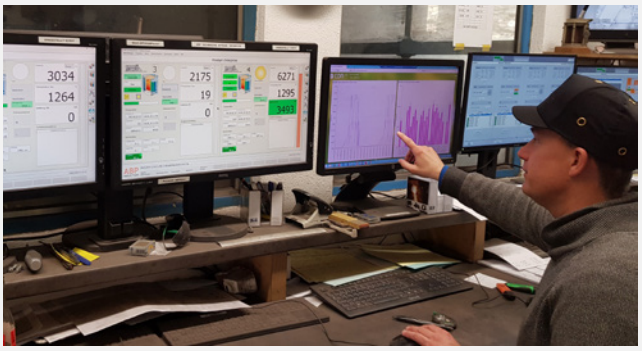

Bild 7: Monitor-Überwachung des Schmelzbetriebs im Steuerungsraum

Prodapt-Enterprise den aktuellen Status des Kühlsystems, der Hydraulik und der Energieversorgung. Dabei werden die Grenzwertverletzungen oder Störungen durch Farbumschläge in den Messfeldern und Symbolfeldern dargestellt. Stellvertretend für diese Detailbilder ist in **Bild 9** das Ofen-Kühlsystem beschrieben.

In einer schematisierten Darstellung des Aggregats sind die erfassten Daten dargestellt. Die Messwertfelder zeigen über den Wert hinaus Grenzwertverletzungen durch Farbumschlag an und bieten beim Anklicken den Verlauf des Wertes in den letzten 8 Stunden. Die Symbole sind animiert ausgeführt, d. h. der Status wird durch Farben angezeigt. Das System erfasst zudem die Wassertemperaturen und -mengen der einzelnen Ofenkühlkreise. Bei Trendverletzungen werden Warnungen generiert und an die Instandhaltung weitergeleitet.

Die schnelle und gezielte Reaktion im Störungsfall ist ein wesentlicher Faktor für die Verfügbarkeit der Schmelzanlage. Dazu gibt es zunächst beim Auftreten einer Störung in der Kopfzeile der Prozessbilder eine Klartextmeldung. Entsprechend ihrer Klassifikation wird die angezeigte Mel-

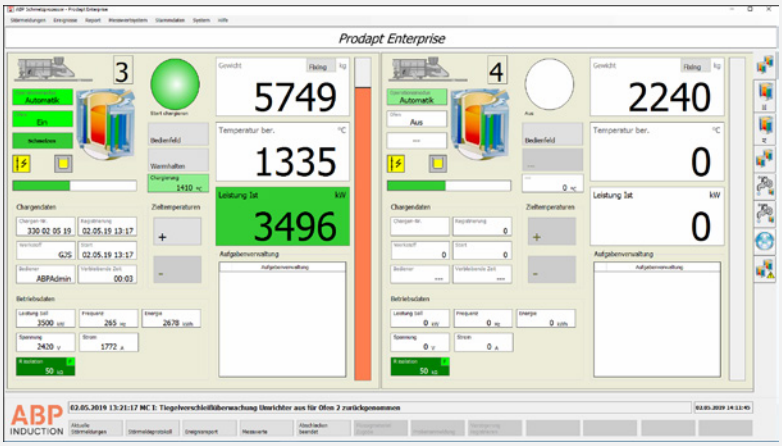

Bild 8: Ofenübersicht des 6 t-Tandems

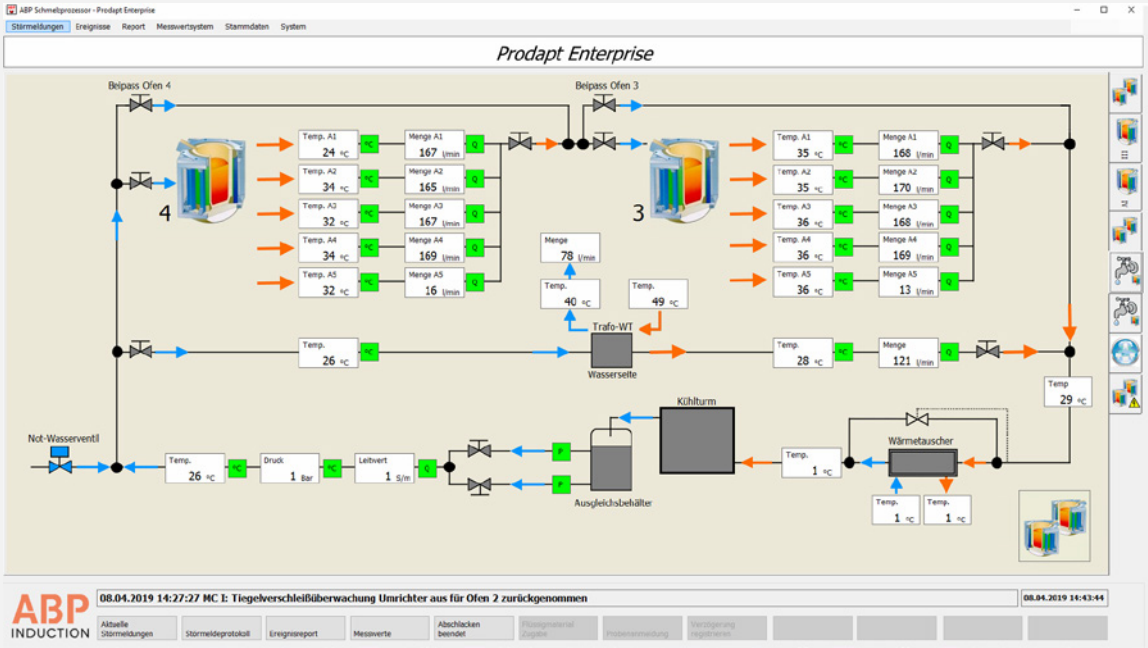

Bild 9: Detailbild des Ofen-Kühlkreises

dung farblich hinterlegt. Diese Information wird durch das Detailbild „Abschaltungen" ergänzt, in dem alle Störungen aufgelistet sind, die zum Abschalten der gesamten Anlage oder des betreffenden Ofens führen können. Der dort erscheinende konkrete Hinweis vereinfacht dem Benutzer die Bewertung des Störfalls. Zusätzlich erhält der Betriebsverantwortliche eine Information per SMS, was sich besonders in Stillstandzeiten, beispielsweise beim Kaltanfahren in der Nacht, bewährt hat.

Überwachung des Tiegelverschleißes

Die Tiegelüberwachung hat eine besondere Bedeutung

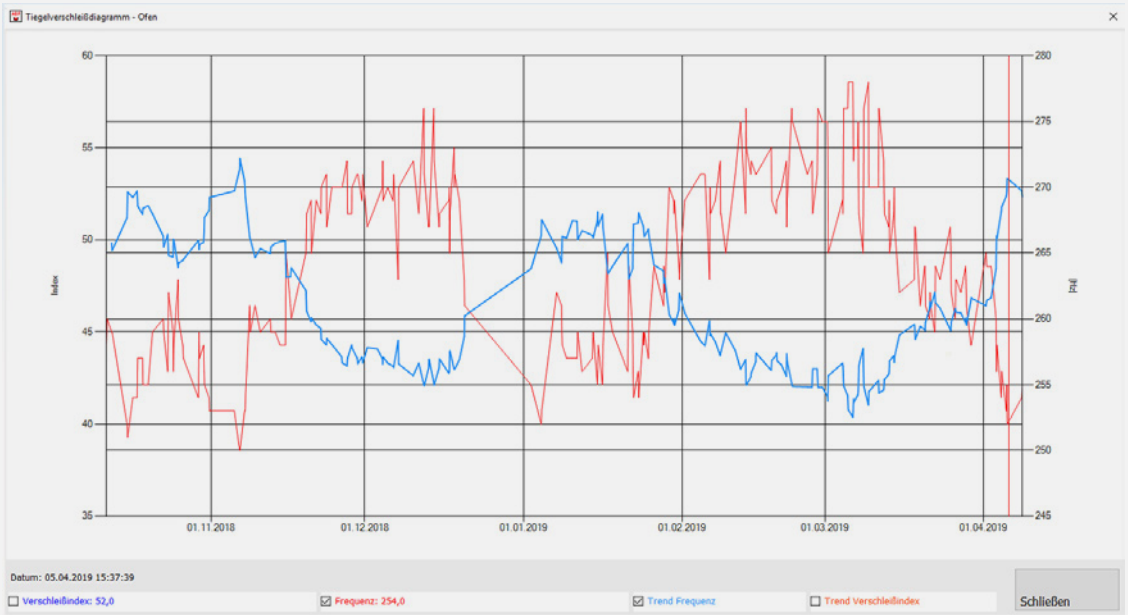

Bild 10: Detailbild Tiegelverschleißdiagramm

für den störungsfreien Betrieb der Schmelzanlage. Neben der regelmäßigen Sichtkontrolle nach dem Abstich bei dunkelroter Oberfläche der Tiegelwand erfolgt sie per:

- Kontrolle des Widerstandes zwischen kontaktierter Schmelze und Spule (Erdschlussanzeige)
- Messung und Auswertung von Wirkleistung und Frequenz mithilfe des Prodapt-Enterprise.

Das System Erdschlussanzeige wird an anderer Stelle [3] ausführlich beschrieben; hier soll auf die zweite Methode, nämlich die Nutzung der Prodapt-Daten näher eingegangen werden. Ihre Aussagefähigkeit in Bezug auf den Tiegelverschleiß beruht auf der Änderung der Induktivität der Spule bei Änderung ihres Abstandes von der Schmelze. Dementsprechend steigen Wirkleistung und Frequenz mit abnehmender Wanddicke an. Im Schmelzbetrieb werden daher einmal pro Charge bei voll gefülltem Ofen und definierter Temperatur, d. h. bei gleichen Messbedingungen, die Frequenz und eine Verschleißzahl ermittelt. Letztere wird berechnet aus der jeweils vorgegebenen Leistung und dem Verhältnis der sich dabei einstellenden Spannung zur Nennspannung.

Die ermittelten Werte der Frequenz und der Verschleißzahl werden über der Zeit aufgetragen und in einem Prozessbild in ihrem Verlauf während einer Futterreise dargestellt. **Bild 10** zeigt als Beispiel den Verlauf der Messwerte über mehrere Tiegelreisen. Am Ende einer Tiegelreise werden die graphischen Aufzeichnungen mit dem aktuellen Zustand des verschlissenen Tiegels verglichen und in Zusammenhang gebracht. Auf diese Weise lassen sich aus dem Verlauf der nächsten Tiegelreisen entsprechende Folgerungen für die zu erwartende Tiegelstandzeit und den Zeitpunkt der Neuzustellung ableiten.

Eine vereinfachte und anschauliche Darstellung des Verschleißverlaufs ist in den Übersichts-Prozessbildern (hier Bild 8) realisiert. Dort sind die Messwerte von Frequenz und Leistung auf die Länge eines Balkens umgerechnet. Zu Beginn einer Futterreise hat der horizontale grüne Balken die volle Länge; er nimmt dann mit fortschreitend dünner werdender Wand ab bis zum vollständigen Verschwinden bei Erreichen der vorgegebenen Restwanddicke.

Für die Auswertung dieses Signals stellt die Bezeichnung INTEGRAL eine kennzeichnende Aussage dar. Aus den physikalischen Zusammenhängen ergibt sich, dass die beschriebene Ermittlung der die Wanddicke kennzeichnenden Messwerte sich immer auf den gesamten Tiegel im Bereich der Aktivspule bezieht. Einen lokalen Feuerfestverschleiß in Form einer ringförmigen Auswaschung oder eines sogenannten Elefantenfusses wird auf den gesamten Tiegel umgerechnet und dementsprechend in seinem Ausmaß nicht identifiziert. Wie eingangs dieses Abschnitts erwähnt sind daher die Prodapt-Signale immer im Zusammenhang mit der fachmännischen optischen Kontrolle zu interpretieren. Auf diese Weise bietet INTEGRAL eine zuverlässige und übersichtliche Hilfestellung bei der Tiegelbeurteilung.

Ausblick

Der Nutzen des durchgängigen Datenmanagements ist trotz der bereits erreichten Ziele noch weiter ausbaufähig, woran Anlagenbauer und -betreiber gemeinsam arbeiten. So ist beispielsweise vorstellbar, dass die Ergebnisse der Thermoanalyse stärker in die Verbesserung der Schmelzequalität eingebunden werden oder auf Basis der vorliegenden Daten Algorithmen entwickelt werden, die in der Arbeitsvorbereitung die Abstimmung zwischen Schmelz- und Formereibereich weiter verbessern. Weiterhin ist die Rückführung von Qualitätsmerkmalen auf die Prozesskette denkbar. Mithilfe der Prozessdatenerfassung und Auswertung von Toleranzen lassen sich Fehler aus Abweichungen ableiten. Dafür können automatisch generierte Algorithmen Anwendung finden, die speziell auf den Gießereiprozess ausgelegt sind.

LITERATUR

[1] Dötsch, E.: Induktives Schmelzen und Warmhalten. 3. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag, 2019

[2] https:// www. hs-kempten.de/home/news-details/article/3975indus.html

[3] Dötsch, E.; Forsthövel, Ch.; Rische, M.: Spulen- und Tiegelüberwachung beim Schmelzbetrieb von Induktionstiegelöfen. ewi – elektrowärme international (2013) Nr. 1, S. 54-58

AUTOREN

Dr.-Ing. **Erwin Dötsch**
ABP Induction Systems GmbH
Dortmund
0231 / 997-2451
erwin.doetsch@abpinduction.com

Jean-Pierre Hacquin
Kemptener Eisengießerei Adam Hönig AG
Kempten (Allgäu)
0831 / 58110-34
EDV@ke-ag.de

Dietmar Mitschulat
ABP Induction Systems GmbH
Dortmund
0231 / 997-2526
dietmar.mitschulat@abpinduction.com

ABP
INDUCTION

KE
KEMPTENER EISENGIESSEREI
ADAM HÖNIG AG
www.KE-AG.de