

C-Pegelregelung in Gasaufkohlungsanlagen – Ein neuer Weg in der ganzheitlichen Betrachtung?!

Control of C level in gas carburizing systems – A new route for holistic observation?!

Die hoch spezialisierten Verfahren in Gasaufkohlungsanlagen erfordern eine dafür angepasste Automatisierungstechnik. Der Bediener erwartet dabei eine einfache, übersichtliche und unverwechselbare Handhabung bei der Erstellung und Aktivierung von Rezepturen. Der neue Programmregler GSM-F erfüllt diese Anforderungen. Durch konsequente und eine am Verfahrensablauf orientierte Programmierung konnte der Spagat zwischen Bedienerfreundlichkeit und komplexen thermochemischen Vorgängen realisiert werden. Im folgenden Beitrag werden die Prozessanforderungen und die erarbeiteten Lösungsansätze aufgezeigt.

The highly specialized processes involved in gas carburization installations necessitate an appropriately adapted automation and control technology. The user, on the other hand, expects simple, easily comprehensible and unequivocal operation for the drafting and activation of formulations. The new GSM-F programmable controller meets these requirements. Consistent programming orientated around the actual process sequence has made it possible to achieve both user-friendliness and realization of these complex thermochemical processes. This article examines the process requirements and the conceptual solutions that have been drafted.

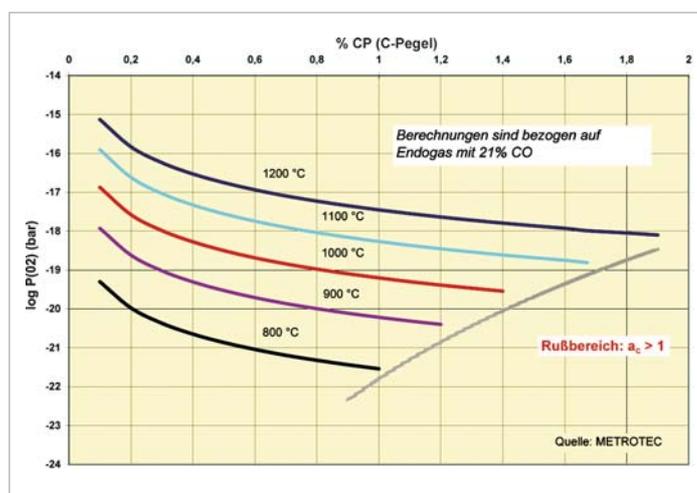
Im Bereich der Gasaufkohlungsöfen sind zwei Prinzipien sehr weit verbreitet. Diese sind, in vielen Varianten, der Durchlaufofen und der Chargenofen.

Der Chargenofen ist ein abgeschlossener Raum, in dem eine Charge in bestimmten Zeitintervallen verschiedenen Temperaturen und Gaskonzentrationen ausgesetzt wird. Der Durchlaufofen hingegen transportiert eine Charge längs eines Weges durch verschiedene Temperatur- und Gaskonzentrationszonen. Regelungstechnisch ist der Durchlaufofen als eine einfache Untergruppe der Chargenöfen zu betrachten, da jede Zone für sich als konstant gehalten wird. Letztgenannte müssen über die Prozessdauer mit variablen Sollwerten versorgt werden. Demzufolge wird im Weiteren nur noch der Chargenofen betrachtet.

Der Zweck eines solchen Ofens besteht in aller Regel darin, einem Stahlbauteil, der Charge, im austenitischen Zustand die Randschicht mit Kohlenstoff anzureichern und damit die gewünschte Oberflächenhärte zu verleihen. Dabei muss ein bestimmtes Temperaturprofil eingehalten werden. Zusätzlich muss eine Gasglocke die Charge umhüllen, die es erlaubt, Kohlenstoff definiert und kontrollierbar abzugeben.

Bild 1: C-Pegel in Abhängigkeit des Sauerstoffpartialdruckes bei verschiedenen Temperaturen

Fig. 1: C level as a function of oxygen partial pressure at various temperatures



In vielen Fällen wird ein sogenanntes Trägergas verwendet, das je nach Art zusätzlich meist entweder mit Alkanen als Kohlenstoffträger (z. B. Erdgas oder Propan) angereichert oder mit Luft abgemagert wird. Ein solches Gasgemisch erzeugt bei höheren Temperaturen (über 800 Grad) eine Kohlenstoffaktivität, die als die treibende „Kraft“ betrachtet werden kann, mit der der Kohlenstoff in das Metall drängt.

Eine direkte Methode zur Messung der Kohlenstoffaktivität oder des von ihr ausgelösten Kohlenstoffstromes in das Material gibt es noch nicht. Daher werden diese Werte mittels indirekter Messverfahren ermittelt. Weitverbreitet ist jedoch die Erfassung des C-Pegels mit Sauerstoffsensoren. Damit wird ein Sauerstoff-Partialdruck gemessen (**Bild 1**) und in einen C-Pegel umgerechnet, wobei als Zusatzparameter das verwendete Schutzgas als bekannt und im chemischen Gleichgewicht angenommen wird.

Der C-Pegel C_p ist eine aus der Praxis entstandene Messgröße. C_p ist definiert als eine prozentuale Gewichtszunahme einer reinen Eisenprobe (Testfolie) vor und nach einer Kohlenstoffanreicherung und wird in „Gewichts-%“ angegeben. Beispielsweise kann diese Gewichtszunahme mit einer Waage sehr anschaulich nachgewiesen werden. Neuere Messverfahren haben die-

 **Dipl.-Ing. Klaus Vogelei**
PMA Prozeß- und Maschinen-Automation GmbH, Kassel
Tel. 05 61/5 05 13 16
E-Mail: vog@pma-online.de

 **Karlheinz Hanzlik**
Metrotec GmbH, Kirchheim
Tel. 0 70 21/86 21 73
E-Mail: k.hanzlik@metrotec.de

Tabelle 1: Einstellparameter einer Rezeptur

Table 1: parameters of recipe

Rezeptur	Sollwert	Chargenergebnis
Ohne Legierungsfaktor	Gewünschter C-Pegel in der Atmosphäre	Höher oder niedriger als der Sollwert, je nach Legierung
Mit Legierungsfaktor	Gewünschter C-Pegel in der Charge	= gewünschter Wert

se Methode ersetzt, verdeutlichen aber nicht den Vorgang des Aufkohlens.

Einführung des Legierungsfaktors

Es ist nun nahe liegend, den C-Pegel als Steuergröße bei der Gasaufkohlung zu verwenden. Da im realen Verfahrensprozess keine reinen Eisenteile, sondern verschiedene Legierungen verwendet werden, haben diese nach der Wärmebehandlung einen anderen C-Pegel als der mittels einer Wäageprobe (Folienprobe) ermittelte. Der Grund hierfür ist in der Materialzusammensetzung zu suchen. Es gibt Legierungselemente, welche die Löslichkeit des Kohlenstoffes fördern, und andere, die sie behindern.

Deshalb wurde ein sogenannter Legierungsfaktor eingeführt, der diesen Gegebenheiten Rechnung tragen soll. Er wird berechnet aus:

$$C_{pL} = 10^{(log C_p - 0,05\%Si - 0,013\%Mn + 0,014\%Ni - 0,013\%Mo)}$$

wobei C_{pL} der C-Pegel im legierten System ist.

Programmregler mit sicherer Bedienung

Mit dem neuen C-Pegel-Programmregler (Bild 2) wurde erstmals dem Bediener die Auswahlmöglichkeit gegeben, Rezepturen zu erstellen, die den Legierungsfaktor direkt berücksichtigen. Dies bedeutet, dass die Erstellung einer Rezeptur, gemäß Tabelle 1, wie folgt zu verstehen ist:

Die zunehmende Miniaturisierung von Reglern hat auch zur Folge, dass mit immer weniger Bedientasten immer mehr Funk-

tionen ausgelöst werden müssen, was oft durch Mehrfachbelegungen der Tasten gelöst ist. Dadurch entsteht für den Bediener an der Anlage das Problem, unter Zeitdruck und Stress zu entscheiden und aus einer gegebenen Vielfalt das Richtige auszuwählen.

Das neue Konzept hat diese Problematik aufgegriffen und dezentrale Bedienelemente (Taster, Schüsselschalter) vorgesehen, deren Funktion eindeutig und klar ersichtlich ist: z.B. START, STOP, RESET, SPRUNG (an eine vorgewählte Position im Programm), Charge im Ofen, Ofen leer, etc.

Detaillierte und oft überladene Graphiken von Reglern und Regelfunktionen, die den Bediener ohnehin nur dann interessieren, wenn sie nicht mehr funktionieren, wurden in die Inbetriebnahme- und Service-Ebene verschoben. Dort sind auch alle automatischen Funktionen wie Sensorspülung, Gasparameter, Prozessfaktoren, Vorkonditionierung etc. untergebracht. Für den Bediener am Ofen sind nur noch Rezepturen, Ist- und Sollwerte sowie Alarmer zugänglich.

Regelungstechnisches Konzept

Im Folgenden wird ausschließlich die Regelung der Atmosphäre im Reaktionsraum (der Retorte) anhand eines Chargenprozesses beschrieben (Bild 3).

Weitere mögliche Anlagenteile wie Materialbeschickung und -entnahme, anschließendes Abschrecken (z.B. Ölbad), Abfackeln der brennbaren Abgase oder Über-

wachung von Sicherheitsbedingungen (z.B. Explosionsgefahr, Übertemperatur) etc. werden hier nicht im Detail betrachtet.

Das Ziel der Verfahrenstechnik ist es, eine Ofenatmosphäre mit vorgegebenen, gleichbleibenden Eigenschaften (C-Pegel, Temperatur) in engen Toleranzgrenzen zu erzeugen und damit eine sichere Aussage über Qualität und Güte des Aufkohlungsprozesses zu erhalten.

Zunächst jedoch muss der Prozess verschiedene Vorbereitungsphasen durchlaufen, bevor die Aufkohlung beginnen kann. Die jeweiligen Sollwerte von Temperatur und C-Pegel werden von einem Programmgeber mit Bandbreitenüberwachung vorgegeben. Der Durchfluss des Trägergases wird meist fest eingestellt. Je nach Prozesszustand muss entweder aufgekohlt und/oder abgemagert werden. Die gezeigten Atmosphärenregler haben daher entweder 2-Punkt oder 3-Punkt Stellverhalten.

Der aktuelle C-Pegel (= 0 ... ≈2, einheitenlos) wird als Funktion der EMK (O₂-Sonde) und der Prozesstemperatur sowie einiger Materialkonstanten berechnet. Nachfolgend sind die wichtigsten Prozessphasen beschrieben:

- Beschickung: Einsatz des kalten Materials in den betriebswarmen Reaktionsraum (Temperatureinbruch).
- Anheizen und Halten: Programmstart; Anfahren und Ausregeln auf Solltemperatur (z. B. 930 °C) und anschließend kurzzeitiges „Halten“ (Warten auf Angleichen von Kern- und Oberflächentemperatur).
- Aufkohlung: Freigabe von Träger- und Kohlungsgas (ca. 850 °C), Ausregeln auf Cp-Programmsollwert (z. B. 1,3).
- Die Aufkohlungsdauer liegt im Bereich von Minuten bis Tagen und ist von der gewünschten Eindringtiefe des Kohlenstoffes abhängig (je nach Verwendungszweck des Chargenmaterials).



Bild 2: Atmosphärenregler GSM-F
Fig. 2: The GSM-F atmosphere controller

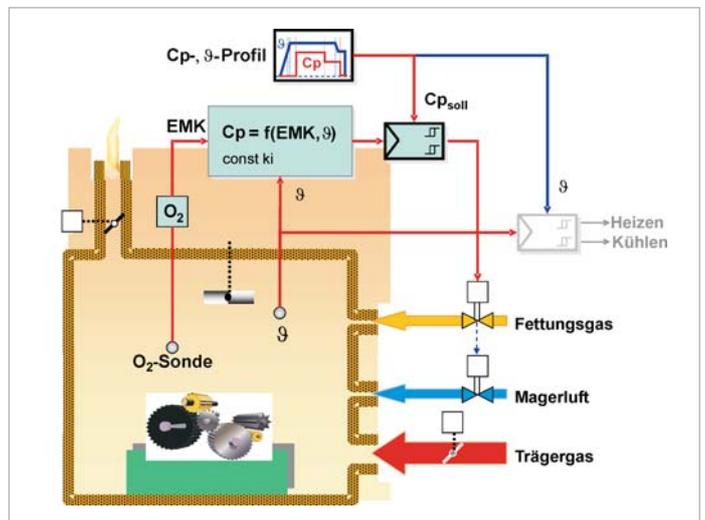


Bild 3: Regelung des Aufkohlungsprozesses am Beispiel eines Kammerofens
Fig. 3: Control of the carburization process, using the example of a chamber furnace

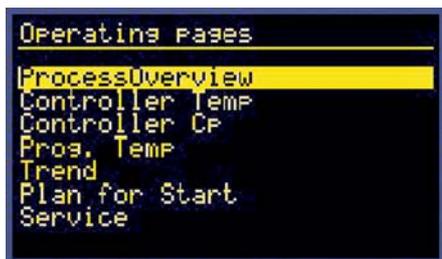


Bild 4: Hauptmenü
Fig. 4: Main menu



Bild 5: Prozessübersicht
Fig. 5: Process overview



Bild 6: Cp-Reglerbedienung
Fig. 6: Cp controller operation

- Diffusion: Ausgleich der Kohlenstoffkonzentration im Randbereich des Materials (Absenken auf Cp ca. 0,8).
- Entnahme und Abkühlung: Abschalten der Regelung. Schnelles Abkühlen; Einfrieren kristalliner Strukturen zur Erzielung des gewünschten Härtegrades (z. B. nach Vickers VH).
- Chargen-Vorkonditionierung: Rezeptauswahl, Sondenspülung und -prüfung.

Zur Störfallvermeidung werden die Istwerte von Temperatur und C-Pegel kontinuierlich auf Bandbreite überwacht. Rußalarm wird ausgelöst, wenn der Cp-Wert den aktuellen Sollwert für eine unzulässige Zeit überschreitet. Zu diesem Zweck wird zusätzlich das Zeitintegral $\Delta Cp \cdot t$ auf Grenzwert überwacht.

Vorbereitend zu jeder Charge wird die Sonde mit Luft gespült (gereinigt) und anschließend getestet, ob der zuvor eingefrorene Messwert innerhalb einer vorgegebenen Zeit wieder erreicht wird. Ist dies nicht der Fall, wird Sondenalarm ausgelöst.

Optional können zusätzlich eingerichtet werden:

- Regelung (3-Punkt) der indirekten Beheizung und Kühlung
- Steuerung oder Regelung des Druckes im Reaktionsraum während der Aufkohlungsphase
- Einstellen und Überwachen des Trägergasdurchflusses
- Zwischenkühlung (anwendungsabhängig; Phasenwandlung, kristalline Strukturumwandlung)

Die Eingänge von O₂-Sonde und Temperatur können im Servicemodus kalibriert werden.

Sichere Bedienung und Anzeige

Die eingangs angedeutete Bedienerfreundlichkeit wird durch eine konsequente Menüführung in Anwendersprache erreicht. Über das Hauptmenü (**Bild 4**, nach dem Einschalten automatisch in der Anzeige) sind weitere Bedien- und Anzeigeseiten wie Prozessübersicht, Regler, Programmgeber, Trend, Chargenparameter und Service

anwählbar. Einen Überblick über die wichtigsten Prozesszustände gibt **Bild 5**. Beispielhaft zeigen **Bild 6** und **Bild 7** Cp-Regler und Programmgeber.

Ereignisgesteuerter Farbumschlag, direkte/inverse Darstellung in der Anzeige sowie die Möglichkeit einer blinkenden Anzeige vermitteln dem Bedienpersonal bereits von Weitem einen optischen Eindruck, in welchem Zustand sich der Prozess befindet, und ob Störungen vorliegen oder alles im „Grünen Bereich“ ist.

Warten auf START: -> Grüner Hintergrund
Programm läuft -> Grüne Anzeige

Achtung:
Sensibler Bereich -> Rote Anzeige

Akute Störung (**Bild 8**) -> Roter Hintergrund

Bei Auftreten kritischer Prozesszustände kann zusätzlich automatisch eine Alarmseite aufgeschlagen werden, die bis zu 48 wahlweise quittierungspflichtiger Alarme in der zeitlichen Reihenfolge ihres Auftretens listet.

Erweiterungen

Es steht nicht im Widerspruch zu dem oben aufgezeigten, einfach gehaltenen Atmosphärenregler, einen PC als übergeordnete Prozessführungsebene einzusetzen. Dieser kann beispielsweise die Chargenprotokollierung mit dem Software-Tool MSI-C als „Prozess-Beobachter“ oder die Erstellung von Rezepturen übernehmen.

Neben der Online-Berechnung Diffusionsgleichung zur Ermittlung und x/y-Darstellung der Kohlenstoffverteilung im Material wird die Charge mit allen Prozessparametern

in einer Datenbank hinterlegt. Über einfache Suchkriterien wie Datum, Auftragsnummer etc. können diese Daten wieder abgerufen und z. B. ein Protokoll mit grafischer Darstellung des Prozessverlaufs erzeugt werden.

Weitere Ausbaumöglichkeiten zur kontinuierlichen Berechnung und Vorgabe von Prozess-Sollwerten aus einem geforderten Härteprofil sind in Erprobung.

Fazit

Die komplexe C-Pegel Berechnung, die Signalverknüpfungen sowie alle beschriebenen Regel- und Überwachungsfunktionen werden mit einer kompakten Multifunktionsseinheit realisiert, die neben Einheitssignalen und einem Temperatureingang auch über einen hochohmigen O₂-Sondeneingang verfügt. Alle wichtigen Zustandsgrößen werden frontseitig angezeigt und bedient.

Die Bedienerführung ist auf das Wesentliche reduziert. Alle weiteren Einstellungen und Anzeigen sind auf unterlagerten Menüebenen untergebracht, die zudem über eine Zugangsberechtigung geschützt werden können. Übersichtlichkeit und Farbgebung der Anzeige mit optischer Signalwirkung reduzieren Fehlbedienungen und sorgen für schnelle und sichere Reaktionen auch im Fehlerfall.

Damit ist eine wirtschaftliche Lösung auf hohem Niveau verfügbar, die über eine serielle Schnittstelle mit einem Leitsystem verbunden werden kann.

Literatur

[1] Sauerstoffmesszellen und Aufkohlungsatmosphären, HTM 39, Heft 5/2005



Bild 7: Programmgeber im Zugriff
Fig. 7: Program generator during access sequence



Bild 8: Störfall
Fig. 8: Malfunction