

Referenzmessungen in der Aufkohlungsatmosphäre – Teil 2

Reference measurements in a carburizing atmosphere: part 2

Von Džo Mikulović, Dragan Živanović, Florian Ehmeier

Die wichtigsten Parameter für die Regelung des Aufkohlungsprozesses sind die Temperatur und das Kohlenstoffpotenzial (C-Potenzial) der Atmosphäre. Die Temperatur wird üblicherweise mit Hilfe von Thermoelementen gemessen. Für die Regelung des C-Potenzials hat sich die Messung des Sauerstoffpartialdruckes der Ofenatmosphäre mittels In-Situ-Sauerstoffsonden (O_2 -Sonden) und Lambda-Sonden (L-Sonden) durchgesetzt. Sowohl die Thermoelemente als auch die Sonden für Restsauerstoffmessungen verlieren mit der Zeit an Genauigkeit. Für eine genaue Regelung sind somit Referenzmessungen zur Korrektur der Temperatur und des C-Potenzials unerlässlich. Im ersten Teil dieses Artikels [1] wurden die Ursachen für die Fehlmessungen mit Thermoelementen und O_2 -Sonden bzw. L-Sonden beschrieben. Die möglichen Referenzmessungen mit Hilfe eines Prüfthermoelementes und der Gasanalyse zur Korrektur dieser Fehler wurden ebenfalls vorgestellt. Darüber hinaus wurde darauf eingegangen, was bei diesen Referenzmessungen beachtet werden muss und welche Aufschlüsse diese, insbesondere die Gasanalyse mit einem Gasanalysator, über die Ofenatmosphäre geben. In Teil 2 des Artikels werden nun folgende weitere Referenzmessungen für das C-Potenzial vorgestellt: Referenzmessung mit einer zweiten O_2 -Sonde oder L-Sonde, Taupunktmessung und Referenzmessung mittels Weicheisenfolie. Darüber hinaus werden auch noch die Vor- und Nachteile dieser Referenzmessungen erläutert.

The most important parameters for the control of carburizing processes are the temperature and the C-potential of the atmosphere. Temperature is normally measured by means of thermocouples. For the control of C-potential the measurement of oxygen partial pressure of the furnace atmosphere by in-situ O_2 -probes and Lambda probes (L-probes) became accepted. The thermocouples as well as the probes for measurement of residual oxygen gradually lose in accuracy. Therefore, reference measurements for adjustment of temperature and C-potential are essential for an exact control. In the first part of this article [1] the reasons for incorrect measurements with thermocouples and O_2 -probes, respectively L-probes have been explained. The appropriate reference measurements with calibrated thermo couple and gas analysis for correction of these faults were also described. Furthermore, it was explained what has to be observed with these reference measurements and which information is given, thereby, about the furnace atmosphere, especially with the gas analysis by means of a gas analyzer. Within part 2, following now, following additional reference measurements for C-potential will be presented: reference measurement with a second O_2 -probe or L-probe, dew point measurement and foil test. The advantages and disadvantages of these reference measurements will be also discussed.

Die wichtigsten Parameter für die Regelung des Aufkohlungsprozesses sind die Temperatur und das Kohlenstoffpotenzial (C-Potenzial) der Atmosphäre. Um genaue und reproduzierbare Ergebnisse zu erreichen, müssen daher diese Parameter so genau

wie nur möglich gemessen werden. Aufgrund der Alterung und anderer möglicher Fehlerquellen liefern die Thermoelemente und O_2 -Sonden sowie L-Sonden, die hierfür verwendet werden, im Laufe der Zeit ungenaue bzw. falsche Messwerte [1]. Daher sind Referenzmessun-

gen unerlässlich, um die Messergebnisse entsprechend korrigieren zu können. Anderenfalls ist es nicht gesichert, dass man durch die Regelung die erwünschten Ergebnisse erzielen wird.

Wie im ersten Teil des Artikels [1] beschrieben wurde, erfolgt die Referenzmessung für die Temperatur mittels eines Prüfthermoelementes. Für die Ermittlung des C-Potenzials in der Aufkohlungsatmosphäre gibt es verschiedene indirekte und direkte Möglichkeiten (**Bild 1**). In Aufkohlungsatmosphären, in denen als Trägergas Endogas oder Stickstoff/Methanol eingesetzt wird, sind die CO - und H_2 -Werte annähernd konstant. Deshalb wird in der Praxis zur Ermittlung des C-Potenzials oft nur O_2 , CO_2 oder der Taupunkt gemessen und die Werte für CO und H_2 als konstant angenommen.

Für die Regelung hat sich die Messung des Sauerstoffpartialdruckes mittels einer O_2 -Sonde bzw. einer L-Sonde durchgesetzt. Die Referenzmessung mittels Gasanalyse (CO - und CO_2 -Messung mit einem Gasanalysator) wurde im Teil 1 des Artikels [1] beschrieben. Im Folgenden werden die indirekten Referenzmessungen für den C-Pegel mittels einer zweiten O_2 -Sonde oder L-Sonde und mittels Taupunktmessung beschrieben. Es werden auch die Vor- und Nachteile einiger Messmethoden zur direkten Bestimmung des C-Pegels diskutiert.

Referenzmessung des C-Potenzials mit einer zweiten O_2 -Sonde oder L-Sonde

Der Aufbau und die Funktionsweise der O_2 -Sonden sowie der L-Sonde wurden ausführlich in [2] beschrieben. Die Referenzmessung mit diesen Sonden, genauso wie die Referenzmessung mit Hilfe der CO - und CO_2 -Gasanalyse, hat den Vorteil, dass die Messung kontinuierlich durchgeführt werden kann. Mit Hilfe eines C-Potenzial-Reglers, welcher die

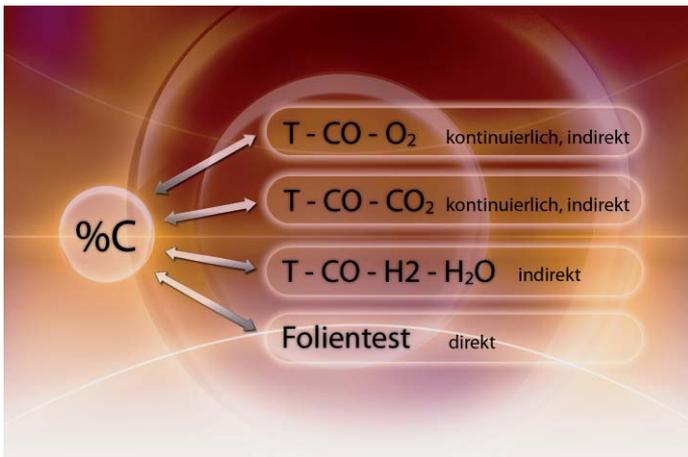


Bild 1: Bestimmung des C-Pegels in der Aufkohlungsatmosphäre

Fig. 1: Determination of carbon potential in carburizing atmosphere

Möglichkeit besitzt, mit zwei Sonden zu arbeiten und diese zu vergleichen, kann man die Ausfallwahrscheinlichkeit des C-Potenzial-Regelsystems enorm verringern. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Redundanz. Dieser Begriff bezeichnet allgemein in der Technik das zusätzliche Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Komponenten eines technischen Systems, wenn diese bei einem störungsfreien Betrieb im Normalfall nicht benötigt werden.

Der C-Potenzial-Regler Carbomat-M besitzt die Möglichkeit, mit zwei Sonden im Vergleich zu arbeiten (**Bild 2**). Dabei wird über eine Sonde, welche als führende Sonde bezeichnet wird, der C-Pegel berechnet und die zweite Sonde arbeitet als Vergleichssonde. Im Fehlerfall schaltet der Carbomat-M von der führenden Sonde auf die Vergleichssonde um und rechnet mit den Werten dieser Sonde

weiter. Dadurch wird vermieden, dass die C-Potenzial-Regelung und die Datenaufzeichnung unterbrochen wird, vor allem, wenn die Sonde im laufenden Prozess ausfällt. Da nach „Murphys Gesetz“ der Fehlerfall der Sonde genau dann auftritt, wenn er den meisten Schaden verursacht, kann man mit Hilfe dieses redundanten Systems den Schaden vorbeugen.

An einem kleinen Rechenbeispiel wird gezeigt, wie sich die Ausfallwahrscheinlichkeit der C-Potenzial-Regelung reduziert, wenn ein redundantes System aus zwei parallel arbeitenden Sonden verwendet wird. Um systematische Fehler auszuschließen, ist es wichtig, Sonden unterschiedlichen Typs zu verwenden, z. B. eine O₂-Sonde und eine L-Sonde. Da die Sonden sich in der Konstruktion wesentlich unterscheiden, wirken sich auch die prozess- und anlagenbedingten Stör-

$$P(\text{Sonde1} \cap \text{Sonde2}) = P(\text{Sonde1}) \cdot P(\text{Sonde2}) = 0,3 \cdot 0,2 = 0,06 \quad (1)$$

Die Ausfallwahrscheinlichkeit für das System aus beiden Sonden reduziert sich für die entsprechende Zeitperiode auf 6%. Dies bedeutet eine enorme Reduzierung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Systems.

Referenzmessung des C-Potenzials mit Hilfe der Taupunktmessung

Für die Berechnung des C-Potenzials aus dem H₂O-Gehalt der Ofenatmosphäre wird der Taupunkt gemessen. Als Taupunkt oder Taupunkttemperatur bezeichnet man die Temperatur, bei der die Kondensatbildung des Wassers gerade einsetzt. Im **Bild 3** ist die Sättigungsdampfdrucklinie aus dem Phasendiagramm für Wasser für den Temperaturbereich von -30°C bis +20°C dargestellt. Diese Linie, welche experimentell ermittelt wurde, stellt den Zusammenhang zwischen Taupunkt und dem Partialdruck bzw. dem Anteil von Wasser in einer Atmosphäre dar. Kennt man die Taupunkttemperatur einer Ofenatmosphäre, dann kann man aus dem Diagramm den Partialdruck ablesen und damit den C-Pegel bestimmen. In einer Atmosphäre mit einem Taupunkt von z. B. +10°C beträgt der Partialdruck des Wassers 12,27 mbar. Mit Hilfe der Magnus-Formel [3], welche erstmals 1844 von Heinrich Gustav Magnus empirisch aufgestellt und seitdem lediglich durch genauere Werte ergänzt wurde, kann man den Partialdruck von Wasser in einer Ofenatmosphäre aus dem Taupunkt berechnen. Für Taupunkttemperaturen $\geq 0^\circ\text{C}$ lautet die Formel



Bild 2: C-Potenzial-Regler Carbomat-M: a) Vergleich von zwei parallel arbeitenden Sonden; b) Menü zum Einstellen der Parameter für die Sondenumschaltung

Fig. 2: C-Potential controller Carbomat-M: a) Comparison of two parallel working probes; b) Setting menu for probe switching parameters

$$p(\text{H}_2\text{O}) = 6,112\text{mbar} \cdot \exp\left(\frac{17,62 \cdot T}{243,12^\circ\text{C} + T}\right), \quad (2)$$

und für Taupunkttemperaturen $< 0^\circ\text{C}$ und $> -65^\circ\text{C}$

$$p(\text{H}_2\text{O}) = 6,112\text{mbar} \cdot \exp\left(\frac{22,46 \cdot T}{272,62^\circ\text{C} + T}\right). \quad (3)$$

T ist die Taupunkttemperatur in $^\circ\text{C}$.

Die auf dem Markt erhältlichen Taupunktsensoren, mit welchen man den Partialdruck H_2O kontinuierlich ermitteln kann, sind für die Aufkohlungsatmosphäre nicht robust genug und haben sich nicht durchgesetzt. Man verwendet zur Taupunktmessung sogenannte Spiegeltaupunktmeßgeräte. Der schematische Aufbau dieser Geräte ist im **Bild 4** gezeigt. Das Ofengas wird durch eine Messkammer über die Oberfläche eines Spiegels geleitet. Der Spiegel wird mit Hilfe eines thermoelektrischen Peltier-Elements so lange gekühlt, bis sich auf der Spiegeloberfläche ein Taubeschlag bildet. Mit Hilfe eines Temperaturmessfühlers erfasst man die Temperatur der Spiegeloberfläche. Zum Zeitpunkt des Beginns der Kondensatbildung wird die Temperatur des Spiegels direkt abgelesen. Das ist die Taupunkttemperatur.

Das Spiegeltaupunktmeßgerät Dewchecker 1.1 (**Bild 5**) zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass man die Temperatur des Spiegels auf einen konstanten Wert dauerhaft regeln kann. Zu diesem Zweck wird die gewünschte Spiegeltemperatur als fester Sollwert vorgegeben. Die Elektronik steuert dann das Peltier-Element derart, dass die vorgegebene Sollwerttemperatur des Spiegels gehalten wird. Dies ermöglicht eine präzise Näherung an den Taupunkt und dadurch auch eine sehr genaue Messung des Taupunkts unabhängig vom Gerätebediener.

Für eine genaue Taupunktmessung mit Spiegeltaupunktmeßgeräten sind unter anderen folgende Punkte zu beachten:

- Die Gasentnahmemarmatur spielt dabei eine ebenso wichtige Rolle wie bei der Gasanalyse mit einem Gasanalysator und muss deshalb so aufgebaut sein, wie im ersten Teil des Artikels [1] bereits beschrieben wurde.
- Ist der Taupunkt des zu messenden Gases höher als die Umgebungstemperatur, oder höher als irgendein Teil des Messgasentnahmesystems, so führt dies zu vorzeitiger Kondensatbildung. Dies ist besonders dann der Fall, wenn die Messgaszuleitungen mit kalten Tei-

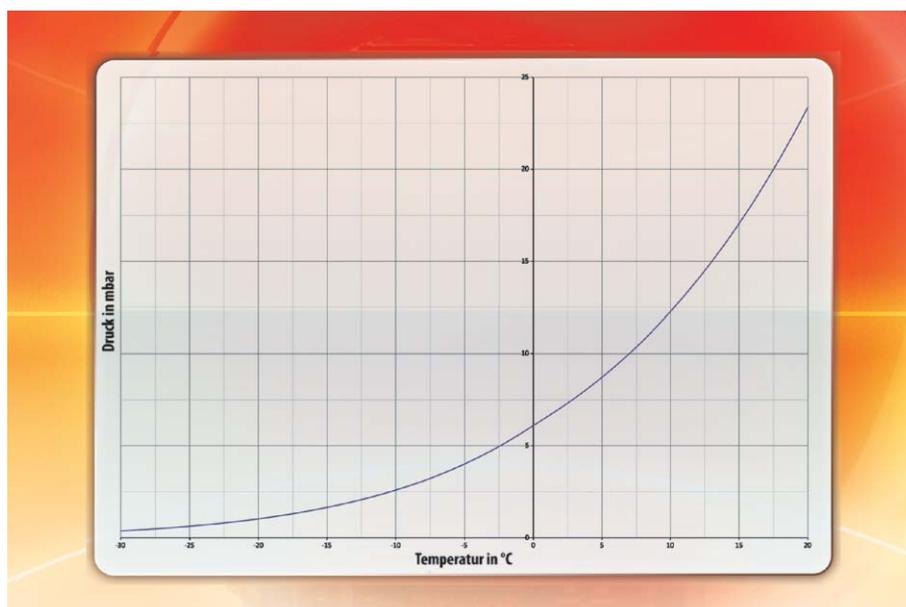


Bild 3: Sättigungsdampfdrucklinie für H_2O

Fig. 3: Saturated vapor pressure curve for H_2O

len (z.B. Wasserleitungen) in Berührung kommen, an offenen Fenstern vorbeiführen, oder an kalten Wänden verlegt sind. Zur vorzeitigen Kondensatbildung im Messkammersystem des Taupunktmeßgerätes kann es auch kommen, wenn das Gerät aus einem kalten Raum in einen wärmeren gebracht wird und der Taupunkt des zu messenden Gases oberhalb der Temperatur dieser gasberührten Teile liegt. Abhilfe:

Wenn sich Kondensat im Messgasentnahmesystem gebildet hat, sollte der Entnahmeschlauch an der Gasentnahmestelle gelöst werden. Es ist dann

solange mit der im Gerät eingebauten Pumpe Raumluft durch das Gerät zu saugen, bis Leitungen, Filter und Messkammer wieder trocken sind. Die Kontrolle, ob das System trocken ist, wird erleichtert, wenn man den Taupunkt der Raumluft vor Beginn der Messungen mit dem Gerät bestimmt. Durch gelegentliche Messungen lässt sich kontrollieren, ob dieser Raumlufttaupunkt nach der Messung noch etwa konstant und das Messsystem trocken geblieben ist.

- Die Geräte sollten regelmäßig gewartet und kalibriert werden. Zur Kalibrierung des gesamten Messsystems werden

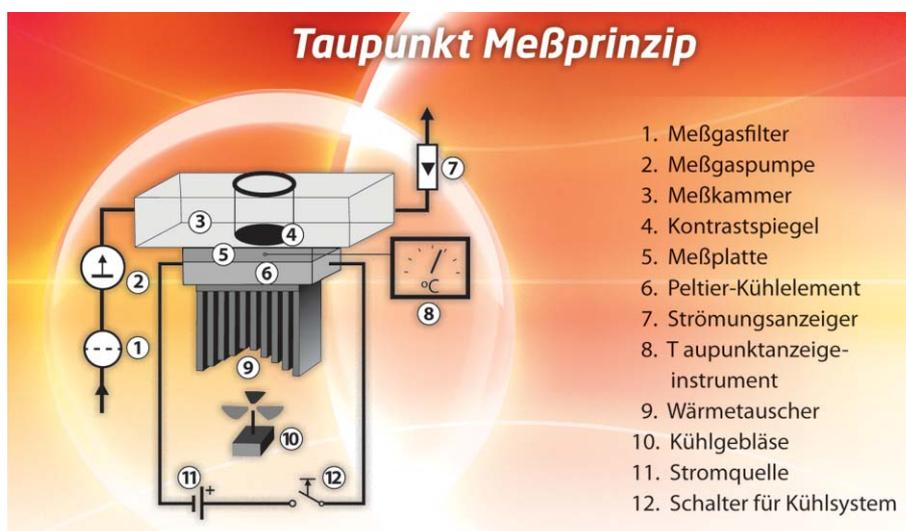


Bild 4: Schematischer Aufbau eines Spiegeltaupunktmeßgerätes

Fig. 4: Schematic construction of a mirror dew point measuring system



Bild 5: Dewchecker 1.1 (Prototyp)

Fig. 5: Dewchecker 1.1 (Prototype)

mit Hilfe eines geregelten Klimaschrankes unterschiedliche Taupunkte erzeugt. Die Messung erfolgt dann mit dem zu kalibrierenden Gerät und mit einem Präzisions-Tauspiegelhygrometer. Aus dem Vergleich der Messwerte wird dann eine entsprechende Korrektur vorgenommen, sodass die Messwerte innerhalb der Toleranz liegen.

Direkte Bestimmung des C-Potenzials

Zu den direkten Messmethoden der C-Potenzial-Bestimmung gehören Messungen mittels Reineisendraht und Reineisenfolie. Bei der Messung mit Reineisendraht wird dieser der zu bestimmenden Aufkohlungsatmosphäre

ausgesetzt. Anschließend werden mit einem Widerstandsmessgerät der Widerstand und dadurch die Widerstandsänderung gemessen. Aus der Änderung des elektrischen Widerstands wird das C-Potenzial der Atmosphäre bestimmt.

Bei der Messung mit einer ca. 0,05 mm dicken Reineisenfolie wird diese für 10-15 Minuten der zu bestimmenden Ofenatmosphäre ausgesetzt. Die Dauer ist aufgrund des notwendigen Gleichgewichts von der Temperatur und dem C-Potenzial der Ofenatmosphäre abhängig. Anschließend wird der Kohlenstoffgehalt der Folie ermittelt. Hierzu gibt es verschiedene Methoden [4-6]:

Glimmentladungsspektroskopie

(GDOS): Das ist das genaueste Verfahren. Mit der GDOS ist man in der Lage, den Tiefenverlauf des Kohlenstoffs in der Folie zu messen. Bei dieser Messmethode wird sozusagen der Kohlenstoffgehalt im Kern der Folie als Maß für das C-Potenzial verwendet. Alle Fehlereinflüsse, wie z. B. Verschmutzung oder Randoxidation der Folie, welche bei anderen Messmethoden zu Fehlern führen würden, spielen bei GDOS keine Rolle. Trotz der hohen Genauigkeit ist diese Methode jedoch viel zu aufwendig und viel zu teuer, um damit lediglich den Kohlenstoffgehalt in Folien zu bestimmen.

Verbrennungsverfahren: Das Verbrennungsverfahren zur Ermittlung des Kohlenstoffgehaltes in Folien ist heute weit verbreitet. Die Folie wird in einem klei-

nen Tiegel zusammen mit ca. 1 g Wolframgranulat erhitzt. In einem Hochfrequenzofen verbrennt das Material unter reinem Sauerstoff. Durch geeignete Filter werden alle Oxide mit Ausnahme von Kohlendioxid herausgefiltert. Anschließend wird der CO₂-Gehalt mit einem IR-Absorptionsmessgerät gemessen. Der dabei ermittelte CO₂-Gehalt ist ein Maß für den Kohlenstoffgehalt der Folie bzw. für das C-Potenzial der Ofenatmosphäre. Im Vergleich zu Wirbelstrommessung und Gewichtsmessung der Folie ist dieses Verfahren sehr teuer und zeitaufwendig. Zudem ist der Kalibrieraufwand bei diesem Verfahren erheblich und erfordert eine hohe Qualifikation des Betreibers.

Wirbelstromverfahren: Bei dieser Methode werden die Unterschiede in den elektromagnetischen Eigenschaften der Folie, welche durch den unterschiedlichen Kohlenstoffgehalt verursacht werden, mit Hilfe einer Wirbelstrommessung analysiert. Der Vorteil gegenüber der Gewichtsmessung der Folie ist, dass man mit der Folie nicht sorgfältig umgehen muss, weil sich Schmutz und Verunreinigungen auf das Messergebnis nicht auswirken.

Die Wirbelstrommessung hat aber auch erhebliche Nachteile im Vergleich zur Gewichtsmessung. Die elektromagnetischen Eigenschaften, welche hier untersucht werden, hängen nicht nur vom Kohlenstoffgehalt der Folie ab, sondern auch von weiteren Parametern, wie z. B. der Gitterstruktur und Korngröße. Diese Parameter hängen wiederum davon ab, wie schnell und wie stark die Folie abkühlt. Diese Fehlereinflüsse lassen sich in der Praxis kaum eliminieren. Ein weiterer erheblicher Nachteil ist, dass zur Kalibrierung des Messgerätes ein zweites Messverfahren, meistens Folienverbrennung oder Gewichtsmessung, vorhanden sein muss. Besitzt man jedoch bereits eines dieser Verfahren, dann ist es unwirtschaftlich, ein weiteres Gerät anzuschaffen, das keine nennenswerten Vorteile, wie z. B. eine genauere Messung, mit sich bringen würde.

Gravimetrisches Verfahren: Das Wiegen mit einer Präzisionswaage ist sicherlich die einfachste und preiswerteste Methode zur Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes in Reineisenfolien. Das Gewicht der Folie wird bevor und nachdem sie der Ofenatmosphäre ausgesetzt wird gemessen. Aus diesen zwei Gewichtsmessungen und dem Kohlenstoffgehalt der Folie, bevor sie der Ofenatmosphäre



Bild 6: Folienprüfgerät FPG 1.0 mit Terminals T200 und T300

Fig. 6: Foiltester FPG 1.0 with terminals T200 and T300

ausgesetzt wurde, wird der prozentuale Gewichtsanteil des Kohlenstoffs wie folgt berechnet:

$$\%C = 100 - \frac{m_0}{m} \cdot (100 + \%C_0) \quad (4)$$

Wobei m_0 das Gewicht der Folie ist, bevor sie der Ofenatmosphäre ausgesetzt wird, m das Gewicht der Folie, nachdem sie der Ofenatmosphäre ausgesetzt wird und $\%C_0$ der Grundkohlenstoffgehalt, bevor die Folie der Ofenatmosphäre ausgesetzt wird. Der nach der Formel (4) errechnete Gewichtsanteil des Kohlenstoffes entspricht nach DIN 17014 dem C-Potenzial der Ofenatmosphäre. Bei der Verwendung der gravimetrischen Methode ist sorgfältig darauf zu achten, dass Fehler durch Verunreinigungen in der Form von Ruß, Fett oder Fingerabdrücken vermieden werden. Es muss zudem jegliche Form von Oxidation beim Entnehmen der Folie vermieden werden, da Oxidschichten zu einer Verfälschung des Ergebnisses führen.

Direkte Messung des C-Potenzials mit dem Folienprüfgerät FPG 1.0

Das Folienprüfgerät FPG 1.0 (Bild 6) ist eine Präzisionswaage zur gravimetrischen Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes in dünnen Eisenfolien. Die Gewichtsmessung erfolgt mit einem spannbandgelagerten Drehspulmesswerk. Das C-Potenzial kann mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \%C$ gemessen werden. Um eine hohe Messgenauigkeit über einen längeren Zeitraum zu gewährleisten, muss das Folienprüfgerät jedes Mal, wenn es eingeschaltet wird, mit einem 95 mg schweren Prüfgewicht kalibriert werden. Die für die Messung verwendeten Folien haben ein Gewicht von etwa 97 mg. Damit wird immer um den Kalibrierpunkt gemessen, was zu einer hohen Messgenauigkeit führt. Darüber hinaus werden bei jedem Messzyklus sieben Messungen gemacht. Die größte und die kleinste Messung werden ignoriert und aus den restlichen fünf Messungen wird der Mittelwert gebildet.

Wie bereits erwähnt, ist für eine genaue Gewichtsmessung wichtig, dass die Folie frei von Verunreinigungen wie Fett oder Fingerabdrücken ist. Aus diesem Grund enthält jedes Folienprüfgerät diverses Zubehör (Bild 7), das zur Vorbereitung der Folien benötigt wird. Die Folien werden zunächst um den beiliegenden Holzstab



Bild 7: Zubehör für Folienprüfgerät FPG 1.0

Fig. 7: Accessories for foiltester FPG 1.0

gewickelt und danach zur Reinigung in die mit Aceton gefüllte Plastikflasche eingelegt. Für die Messung werden sie mit der antimagnetischen Pinzette aus der Plastikflasche entnommen und mit einem Heißluftföhn getrocknet. Die Folie darf danach nicht mehr mit den Händen angefasst werden.

Eine Besonderheit des Gerätes ist die einfache Bedienung mit Hilfe der Bedienterminals T200 oder T300. Im Display der Bedienterminals wird jeder Arbeitsschritt im Klartext angezeigt und damit eine fehlerfreie Bedienung des Gerätes sichergestellt. Mit dem Bedienterminal T300 und der dazugehörigen PC Soft-

ware „T300 View“ (Bild 8) können zudem Benutzernamen und Namen für die Folienproben angelegt und verwaltet werden. Mit einem USB-Stick können alle Messdaten auf den PC übertragen und mit Hilfe der Software analysiert und archiviert werden.

Folienprobe und Zweipunktkorrektur

Die direkte Bestimmung des C-Potenzials mit einem Folienprüfgerät wird häufig zur Korrektur des C-Potenzials, welches mit einer O_2 -Sonde oder L-Sonde berechnet wird, verwendet. Die meisten C-Potenzial-Regler erlauben einen Offset

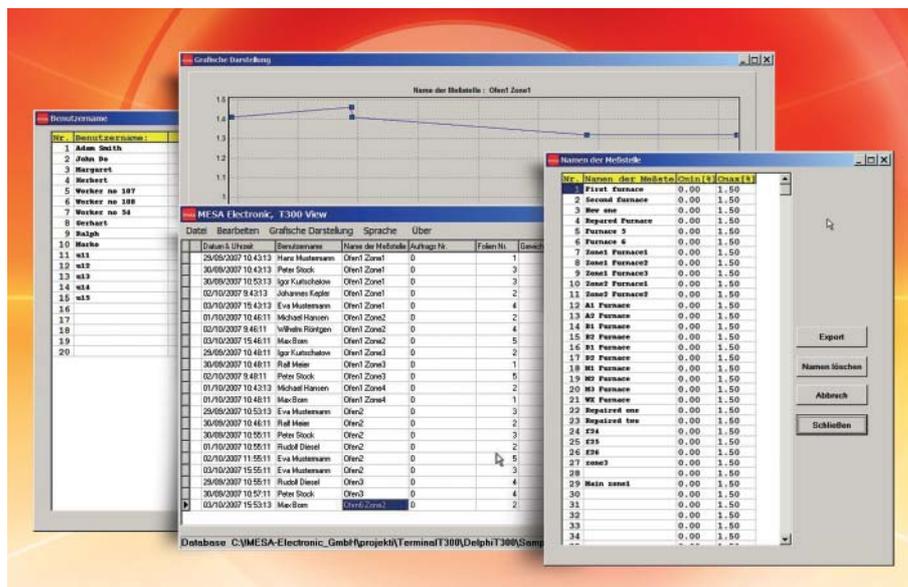


Bild 8: Software „T300 View“

Fig. 8: Software "T300 View"

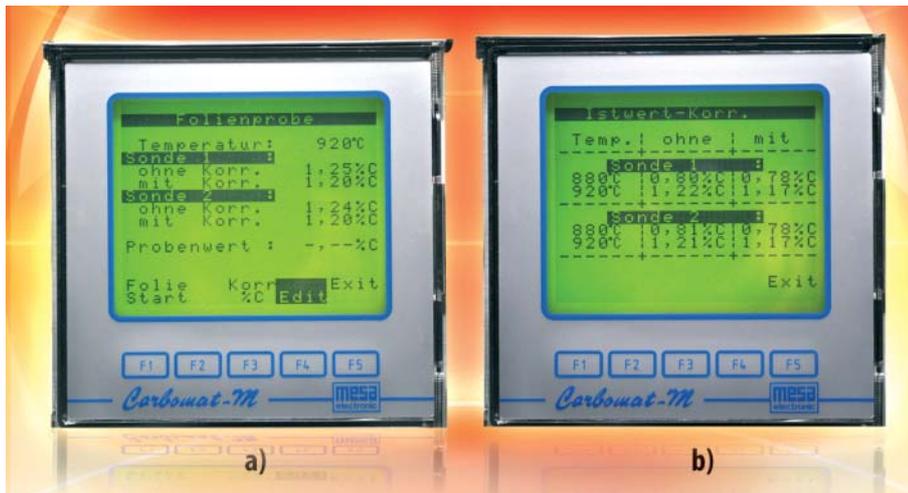


Bild 9: C-Potential-Regler Carbomat-M: a) Menü für C-Potential-Korrektur mit Folienprobe; b) Menü mit Werten der Zweipunktkorrektur

Fig. 9: C-Potential controller Carbomat-M: a) Menu for C-potential correction with foil test; b) Menu with values for two point correction

oder mit anderem, Worten eine Korrektur des C-Pegels in einem Arbeitspunkt. Diese Korrektur ist ausreichend für Prozesse mit einem konstanten C-Potenzial und einer konstanten Temperatur. Für Aufkohlungsprozesse, in welchen die Temperatur und das C-Potenzial geändert werden, ist eine solche Korrektur nicht ausreichend.

Die Ungenauigkeit bei der Messung mit O₂-Sonden wird meistens durch feine Haarrisse in der Keramik der Sonde verursacht. Die Ausdehnung der Haarrisse hängt von der Temperatur ab. Dadurch sind die Messfehler mit der Sonde bei verschiedenen Temperaturen unterschiedlich. Korrigiert man das C-Potenzial bei einer hohen Temperatur, z. B. bei 920 °C und einem C-Potenzial von 1,2 %C, dann sind die Messergebnisse mit der Sonde und damit auch die Regelung in der Nähe dieser Werte sehr genau. Senkt man jedoch die Temperatur und das C-Potenzial, wird die Regelung aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Sonde und aufgrund der vorgenommenen Korrektur ungenau.

Mit den C-Potenzial-Reglern Carbomat-M (**Bild 9**) und Carbo-M können mit der Folienprobe Korrekturen in zwei Punkten vorgenommen werden. Wenn die Temperaturen, bei denen die Korrekturen mit der Folienproben vorgenommen werden, sich um mehr als 30 °C unterscheiden, so werten die Regler dies als Korrekturen in zwei unterschiedlichen Punkten. Andernfalls werden die Werte der ersten Korrektur mit den Werten der zweiten Korrektur überschrieben. Es

wird empfohlen, die Folien bei einer Aufkohlungstemperatur von ca. 920 °C und 1,2 %C sowie bei einer Härtetemperatur von ca. 880 °C 0,80 %C durchzuführen. Die Zwischenwerte werden dann automatisch interpoliert. Dadurch hat man im ganzen Arbeitsbereich eine sehr genaue C-Potenzial-Messung und -Regelung.

Fazit

Aus Gründen der Qualitätssicherung sind Referenzmessungen unverzichtbar. Im Prozess der Gasaufkohlung sind Temperatur und C-Potenzial die wichtigsten Parameter, welche regelmäßig überwacht bzw. überprüft werden müssen. Die Referenzmessung der Temperatur wird in der Praxis durch eine In-Situ-Überprüfung der Thermoelemente, also in der Anlage vor Ort, durchgeführt. Für das C-Potenzial gibt es mehrere Methoden, die sich als Referenzmessung eignen.

Die im ersten Teil des Artikels vorgestellte Methode, die Gasanalyse mit NDIR-Sensoren, ist zudem ein zusätzliches Hilfsmittel für die Lösung der unterschiedlichsten Probleme. Die Referenzmessung mit einer zweiten O₂-Sonde bzw. L-Sonde hat vor allem den Vorteil, dass mit entsprechenden Reglern der Prozess auch beim Ausfall einer Sonde mit der zweiten Sonde automatisch und ohne Unterbrechung weiter geregelt werden kann. Die Spiegeltaupunktmessgeräte eignen sich nicht nur zur Referenzmessung für das C-Potenzial. Man kann mit diesen Geräten auch den Taupunkt von Endogasgeneratoren bestimm-

men und dies als Referenzmessung für die Taupunktregelung eines Generators verwenden.

Von den Methoden zur direkten Bestimmung des C-Potenzials ist vor allem das gravimetrische Verfahren hervorzuheben. Die Gewichtsmessung mit einer Folienwaage ist einfach durchzuführen und sehr wirtschaftlich. Aus diesen Gründen wird sie in der Praxis den anderen direkten Verfahren vorgezogen.

Literatur

- [1] Mikulović, D., Živanović, D., Ehmeier, F.: C-Pegelregelung mit der O₂-Sonde und der L-Sonde. GASWÄRME International (58) Nr. 4/2009, S. 241-246
- [2] Mikulović, D., Živanović, D., Ehmeier, F.: Referenzmessungen in der Aufkohlungsatmosphäre – Teil 1. GASWÄRME International (59) Nr. 4/2010, S. 237-244
- [3] Sonntag, D.: Important new Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on ITS-90, and Psychrometer Formulae. Z. Meteorol. 40 (1990), 5, S. 340-344
- [4] Klümper-Westkamp, H., Mayr, P., Reimche, W., Feiste, K. L., Bernhard, M. und Bach, F.-W.: Bestimmung des Kohlenstoffgehaltes in Aufkohlungsfolien. HTM 57 (2002) 5, S. 364-372
- [5] Feiste, K.L., Winter, K.-M.: C-Detect – Ein alternatives Verfahren zur Kohlenstoffbestimmung in Reineisenfolien zum Abgleich von Aufkohlungsatmosphären. GASWÄRME International (56) Nr. 5/2007, S. 359-362
- [6] Roggatz, M., Engler, N.: Praxisnahe C-Pegelüberprüfung der Ofenatmosphäre mittels Eisenfolien. GASWÄRME International (56) Nr. 5/2007, S. 366-369

Dr. Džo Mikulović
MESA Electronic GmbH,
Geretsried

Tel.: 08031 / 900576760
dmikulovic@
mesa-international.de



Dr. Dragan Živanović
Fakultät für Elektrotechnik,
Universität Niš, Serbien
MESA Electronic GmbH, Niš,
Serbien

Tel.: 08031 / 900576760
dzivanovic@
mesa-international.com



**Dipl.-Ing (FH)
Florian Ehmeier**
MESA Electronic GmbH,
Geretsried

Tel.: 08171 / 76930
fehmeier@
mesa-international.de

