

C-Pegelregelung mit der O₂-Sonde und der L-Sonde

engl

Von Džo Mikulović, Dragan Živanović, Florian Ehmeier

Die Gasaufkohlung spielt nach wie vor eine wichtige Rolle in der Wärmebehandlung. Die wichtigen Parameter für die Prozessregelung sind die Temperatur und der Kohlenstoffpegel (C-Pegel) der Atmosphäre. Bis heute gibt es keine direkte Methode zur Bestimmung des C-Pegels, welche auch geeignet ist für die automatische Prozessregelung. Von den indirekten Methoden hat sich für die Regelung die Messung des Sauerstoffpartialdrucks der Ofenatmosphäre mittels Sauerstoffsonden durchgesetzt. Es gibt hierzu verschiedene Sauerstoffsonden, die sich in ihrer Bauart wesentlich unterscheiden. Im folgenden Artikel werden diese Unterschiede und die daraus resultierenden Vor- und Nachteile näher diskutiert.

Gas carburizing still plays an important role in heat treatment. Temperature and carbon potential (C-Potential) of the atmosphere are the essential parameters for the process control. Till this day there is no direct measurement method for C-Potential which could be used for online process control. The measurement of the oxygen partial pressure in the furnace atmosphere is the most used indirect method for the control of the C-Potential. There are different types of oxygen probes. In this article the essential differences in construction will be discussed as well as their advantages and disadvantages.

Der Prozess der Gasaufkohlung ist heutzutage wohlverstanden [1]. Der wichtigste Prozessparameter neben der Temperatur ist der Kohlenstoffpegel (C-Pegel) der Ofenatmosphäre. Der C-Pegel eines Gasgemisches ist gleich dem Kohlenstoffgehalt (in Massenprozent) des unlegierten Austenits, welcher mit der entsprechenden Atmosphäre im Gleichgewicht steht. Hat eine Atmosphäre beispielsweise einen C-Pegel von 0,7, dann steht sie mit einem Austenit von 0,7 % C im Gleichgewicht. Ein Austenit mit mehr als 0,7 % C würde in dieser Atmosphäre bis zu einem Gehalt vom 0,7 % C-entkohlt, während ein Austenit von geringerem C-Gehalt bis zu dieser Konzentration aufgekühlt würde. Es sei noch erwähnt, dass der C-Pegel einer gegebenen Atmosphäre temperaturabhängig ist. Um definierte Aufkohlungstiefen bei der Wärmebehandlung von Werkstücken erreichen zu können, muss der C-Pegel der Ofenat-

mosphäre gemessen und geregelt werden.

Indirekte Ermittlung des C-Pegels

Die Ermittlung des C-Pegels kann grundsätzlich direkt oder indirekt erfolgen. Die direkten Messverfahren sind für die kontinuierliche Messung und eine darauf aufbauende Regelung untauglich. Sie werden jedoch verwendet, um die eingesetzten indirekten Messverfahren zu kontrollieren und ggf. zu korrigieren. Als Grundlage für die Indirekt-Bestimmung des C-Pegels dienen folgende Reaktionen:



Diese Reaktionen spielen sich sowohl in der Ofenatmosphäre als auch auf der

Werkstückoberfläche ab. Aus den Reaktionen ist zu ersehen, dass CO den Kohlenstoff abgibt und O₂, CO₂ und H₂O den Kohlenstoff aufnehmen. Wenn der C-Pegel der Atmosphäre größer ist als der Randkohlenstoffgehalt der Werkstücke, dann gibt der CO den Kohlenstoff an die Werkstücke ab und O₂, CO₂ und H₂O entziehen den Kohlenstoff aus der Ofenatmosphäre. Wenn der C-Pegel der Atmosphäre kleiner ist als der Randkohlenstoffgehalt der Werkstücke, dann gibt der CO den Kohlenstoff an die Ofenatmosphäre ab und O₂, CO₂ und H₂O entziehen den Kohlenstoff aus den Werkstücken. In beiden Fällen führen diese Reaktionen zum einen Abgleich des Randkohlenstoffgehaltes der Werkstücke und des C-Pegels der Atmosphäre.

Für die Berechnung des C-Pegels spielt die Aktivität ebenfalls eine wichtige Rolle. Diese Größe ist abhängig von der Temperatur und dem Gehalt des in Austenit aufgelösten Kohlenstoffs. Bei gegebener Temperatur entspricht jedem Wert des C-Pegels ein Wert der Aktivität a_c (% C, T). Die Reaktionen (1)–(3) lassen sich mit der Aktivität über folgende Gleichungen verknüpfen:

$$\frac{1}{K^{\text{O}_2}} \cdot \frac{p(\text{CO})}{\sqrt{p(\text{O}_2)}} = a_c(\% \text{ C, T}) \quad (4)$$

$$\frac{1}{K^{\text{O}_2}} \cdot \frac{p^2(\text{CO})}{p(\text{CO}_2)} = a_c(\% \text{ C, T}) \quad (5)$$

$$\frac{1}{K^{\text{H}_2\text{O}}} \cdot \frac{p(\text{CO}) \cdot p(\text{H}_2)}{p(\text{H}_2\text{O})} = a_c(\% \text{ C, T}) \quad (6)$$

Die Gleichgewichtskonstanten K^{O_2} , K^{CO_2} und $K^{\text{H}_2\text{O}}$ der Reaktionen (1)–(3) sind Funktionen der Temperatur, welche in der Literatur wohlbekannt sind. Zur Berechnung des C-Pegels genügt es dem-

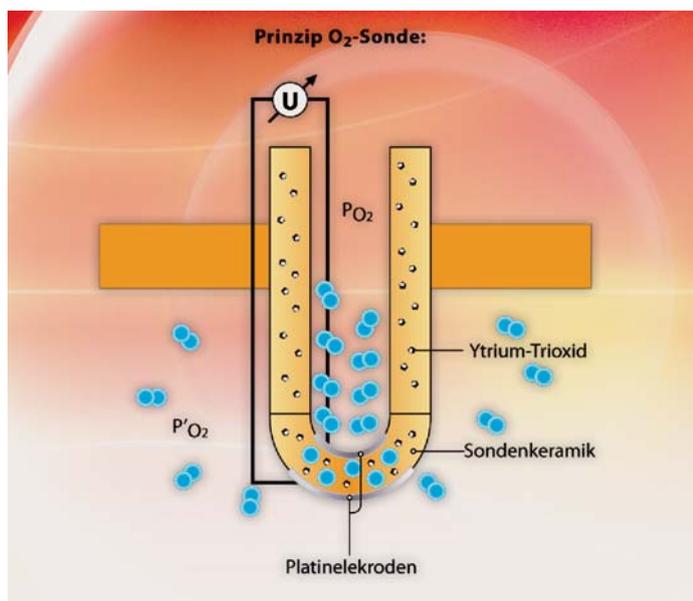


Bild 1: Prinzipieller Aufbau einer O₂-Sonde

Fig. 1: Principal construction of an O₂-Probe

ist, ist die O₂-Sonde nur für Messungen im Ofen bei Temperaturen oberhalb von 700 °C geeignet.

Der Sauerstoff wird an der Platin-Elektrode im Inneren zu Sauerstoffionen reduziert. Diese Ionen wandern mit Hilfe der Fehlstellen in der Keramik zur äußeren Elektrode, um die dort vorhandene geringere Konzentration von Sauerstoff auszugleichen. Eine Ansammlung von elektrischen Ladungen führt zu einer Spannung (Nernst-Gleichung)

$$U = 0,0496T \cdot \log\left(\frac{p(O_2)}{0,209}\right) \text{ mV}, \quad (7)$$

die man an dem Element messen kann. Die Zellenspannung nimmt mit fallendem Sauerstoffgehalt im Messgas zu. Für den Aufkohlungsprozess bedeutet das konkret: höhere Spannung entspricht einem höheren C-Pegel und umgekehrt.

Am Markt finden wir heute zumeist drei etwas unterschiedliche Konstruktionen von O₂-Sonden (**Bild 2**):

- Die erste Konstruktion ist mit einem kurzen, einseitig geschlossenen Einsatz aus Zirkonium-Dioxid ausgeführt, der dann relativ dicht an einem Keramikrohr aus Aluminiumoxid verschweißt bzw. verklebt wird. Ansonsten, wie beschrieben, Referenzluft innen, Ofengas außen mit der O₂-Ionen-Wanderung durch die Keramik
- Die zweite Konstruktion besitzt eine Kugel aus Zirkonium-Dioxid.
- Die dritte Konstruktion besitzt ein durchgehendes, geschlossenes und dichtes Rohr aus Zirkonium-Dioxid.

nach, die Temperatur und die Werte der in einem dieser Ausdrücke vorkommenden Partialdrücke zu messen. In Atmosphären wie zum Beispiel Endogas oder Gemischen aus Stickstoff und Methanolsplaltgas liegen die Partialdrücke $p(\text{CO})$ und $p(\text{H}_2)$ viel höher als die Partialdrücke $p(\text{O}_2)$, $p(\text{CO}_2)$ und $p(\text{H}_2\text{O})$. Ändert sich der C-Pegel, variieren $p(\text{CO})$ und $p(\text{H}_2)$ prozentual nur wenig, $p(\text{O}_2)$, $p(\text{CO}_2)$ und $p(\text{H}_2\text{O})$ dagegen sehr stark. Für die Berechnung und Regelung des C-Pegels kann man deshalb in vielen Fällen die Partialdrücke $p(\text{CO})$ und $p(\text{H}_2)$ als konstant betrachten und nur die Partialdrücke bzw. Volumenanteile von O₂, CO₂ oder H₂O messen.

Für die Regelung ist eine kontinuierliche Messung erforderlich. Die auf dem Markt erhältlichen Taupunktsensoren, mit welchen man den Partialdruck von H₂O kontinuierlich ermitteln kann, sind für die Aufkohlungsatmosphäre nicht robust genug und haben sich nicht durchgesetzt. Die Messung von CO₂ erfolgt kontinuierlich mittels Infrarotsensoren und wird oft als Vergleichsmessung benutzt. Die CO₂-Messung ist im Vergleich mit der O₂-Messung langsamer. Zudem erfordert der CO₂-Sensor einen höheren Wartungsaufwand, da der Nullpunkt bei diesen Sensoren driftet. Daher sollte, im Falle einer Regelung des C-Pegels mittels CO₂-Messung, der Nullpunkt täglich mit Stickstoff korrigiert werden. Aus eben erwähnten Gründen hat sich für die Regelung des C-Pegels die Messung des Sauerstoffpartialdrucks der Ofenatmosphäre mittels Sauerstoffsonden (O₂-Sonden) durchgesetzt.

Aufbau und Funktionsweise einer O₂-Sonde

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Aufbau einer O₂-Sonde. Die Messzelle einer O₂-Sonde besteht aus einer einseitig geschlossenen Sondekeramik. Das Material ist Zirkonium-Dioxid, dotiert z. B. mit Yttrium-Trioxid. Diese absichtlich eingebauten Gitterfehler ermöglichen die notwendige Sauerstoffionen-Leitfähigkeit und stabilisieren die Keramik zusätzlich gegen thermische und mechanische Beanspruchung. Innen und außen ist die Keramik mit Platin kontaktiert, was die Elektroden der Messzelle bildet. Im Inneren der Sonde befindet sich das Referenzgas, zumeist Luft mit den bekannten 20,9 % O₂. Außen ist die Elektrode dem Ofengas ausgesetzt. Da die Sauerstoffionen-Leitfähigkeit temperaturabhängig

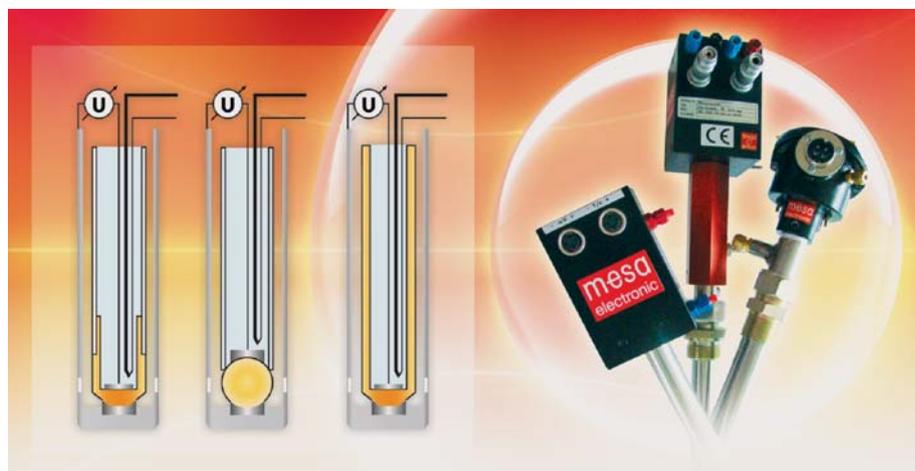


Bild 2: Unterschiedliche Typen von O₂-Sonden

Fig. 2: Different types of O₂-Probes

Die Sonden mit einem Einsatz oder einer Kugel sind im Preis meist günstiger als die Sonden mit dem durchgehenden Zirkonrohr, haben aber eine geringere Dichtigkeit. Dies ist auf die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten der zwei verschiedenen Keramiken zurückzuführen. Die O_2 -Sonde wird immer wieder erwärmt und abgekühlt. Dabei kommt es zu unterschiedlichen Ausdehnungen der Keramiken. An den Kontaktstellen der zwei Keramiken kommt es dadurch zu feinen Haarrissen, durch welche die Ofenatmosphäre ins Innere der Sondenkeramik eindringt und die Referenzluft verändert. Die Sondenspannung fällt ab, und der errechnete C-Pegel ist kleiner als der im Ofen. Dieser Fehler lässt sich nur durch einen höheren Durchfluss des Referenzgases vermindern.

Um mit Hilfe des O_2 -Wertes über die chemischen Gleichgewichte den C-Pegel ausrechnen zu können, ist in zweierlei Hinsicht die Temperatur sehr wichtig:

- Einmal geht die Temperatur in die Messung direkt über obige Nernst-Gleichung mit ein.
- Zum anderen, um den Gasgleichgewichtszustand, und damit den C-Pegel, aus dem Sauerstoffwert ermitteln zu können.

Es wird deshalb die Temperatur der Sonde in der Atmosphäre mit einem innen im Sondenrohr geführten Thermoelement gemessen. Es ist empfehlenswert, Sonden mit Thermoelement von Typ S zu verwenden oder ohne Thermoelement. In diesem Fall benutzt man für die Berechnung des C-Pegels ein separates Thermoelement, welches möglichst nah an der Sonde eingebaut werden sollte. Die preisgünstigeren Sonden, meist mit Kugel oder Einsatz aus Zirkonium-Dioxid, gibt es auch mit Thermoelement vom Typ K. Aufgrund der Konstruktion und des Aufbaus der Keramik ist es möglich, nur sehr dünne Thermoelemente zu verwenden. Bei Undichtigkeiten der Sonden gelangt die Ofenatmosphäre an das Thermoelement. Dies führt zu höheren Ungenauigkeiten und einer verkürzten Lebensdauer. Aus diesem Grund sind Sonden mit Thermoelement vom Typ K nur bedingt empfehlenswert.

Messunsicherheiten beim praktischen Einsatz der O_2 -Sonde

Beim praktischen Umgang mit der O_2 -Sonde sind folgende Punkte zu beachten:

Bild 3: L-Sonde
Fig. 3: L-Probe



- Die O_2 -Sonde ist mechanischen und thermischen Beanspruchungen ausgesetzt und entsprechend gefährdet, da die Keramik nicht bruchsicher ist. Vor allem die Unwucht von Ventilatoren und Umwälzaggregate kann die Lebensdauer der Sonde herabsetzen. Daher ist ein Einbau der Sonde in der Nähe dieser Geräte zu vermeiden. Aufgrund der thermischen Empfindlichkeit dauert auch der Austausch einer O_2 -Sonde unter Betriebsbedingungen entsprechend lange.
- Undichtigkeiten einer Sonde nehmen im Laufe ihrer Lebensdauer zu. Größere werdende poröse Stellen und Haarrisse in der Keramik führen zu einem wachsenden Bedarf an Referenzluft. Außer der bereits beschriebenen Verfälschung der Sondenspannung kommt es auch zu einer Temperaturverfälschung des Thermoelements der O_2 -Sonde.
- Eingeschleppte Waschmittelrückstände und Isolierpasten auf Material und Gestellen, die im Ofen ausdampfen, können sich auf der äußeren Platin-Elektrode niederschlagen. Dies führt zu Verfälschungen der Messung und die Lebensdauer der Sonde wird verringert. Ein längeres Gegenspülen der Sonde zu Beginn des Prozesses ist notwendig, um die Waschmittel- und Pastenrückstände vom Sonderelement fernzuhalten. Eines der bekanntesten Probleme ist das Verrußen der äußeren Elektrode, vor allem, wenn man nahe an der Rußgrenze regelt, was zu Fehlmessungen führt. Hier hilft nur eine zyklische Spülung der Sonde mit Luft. Achtung! Das Ventil der Luftspülung muss nahe der Sonde montiert sein. Lange Rohrleitungen führen zu langen Verzugszeiten nach der Spülung. Das Ventil muss gut schließen und darf nicht hängen bleiben.
- Bei Temperaturen oberhalb von 1100°C nimmt die Elektronenleitung in der Zirkonoxid-Keramik stark zu und ist nicht mehr zu vernachlässigen [2][3]. Entkohlungsprozesse, z. B. von Grauguss, sind wegen der hohen Temperaturen mit der Sauerstoffsonde deshalb nicht zu kontrollieren.

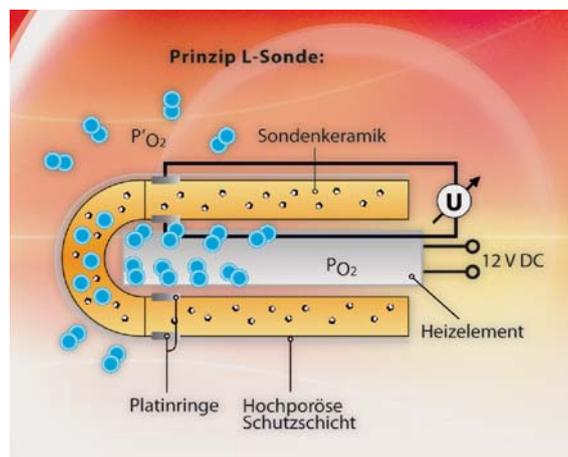


Bild 4: Aufbau der L-Sonde
Fig. 4: Construction of the L-Probe

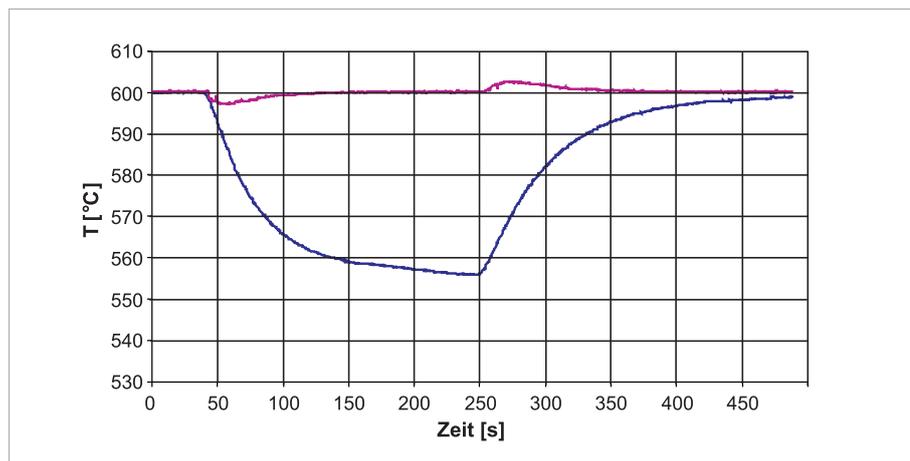


Bild 5: Temperaturverlauf einer geregelten und einer ungeregelten L-Sonde bei veränderten Betriebsbedingungen. Lila: geregelte L-Sonde; Blau: ungeregelte L-Sonde

Fig. 5: Temperature profile of a temperature controlled L-Probe and a uncontrolled L-Probe by change of process conditions. Purple: temperature controlled L-Probe; Blue: uncontrolled L-Probe

– Bei Verwendung eines Stahlschutzrohres aus Chrom-Nickel-Stählen kann man unter dem Mikroskop erkennen, wie nach einiger Zeit im Ofen Chromanteile aus dem Material in der Nähe der Zirkonoxidspitze herausgelöst werden. In der porösen Oberfläche setzen sich Rußpartikel und Sauerstoff fest. Ruß an der Sonde führt zu Fehlmessungen, Sauerstoff zu immer längeren Reaktionszeiten und nach dem Spülen zu langen Erholzeiten.

Aufbau und Funktionsweise der L-Sonde

Aufgrund der oben genannten Schwierigkeiten wurde in der Vergangenheit versucht, kleinere O_2 -Messzellen außerhalb des Ofens anzubringen. Der Einsatz von sauerstoffleitenden Festkörperelektrolyten, zum Beispiel Zirkonium-Dioxid-Keramik, zur Verbrennungsregelung in

der Kraftfahrzeugindustrie hat zu stark verkleinerten Sauerstoffsonden geführt – der Lambda-Sonde (L-Sonde) (**Bild 3**). Durch hohe Fertigungsstückzahlen steht ein robuster und preiswerter Sauerstoffsensor zur Verfügung.

Die prinzipielle Arbeitsweise der L-Sonde und der O_2 -Sonde ist gleich. Die Sonden unterscheiden sich jedoch wesentlich in Konstruktion und Messaufbau. Wie bei der O_2 -Sonde ist die Form ein einseitig geschlossenes Rohr (**Bild 4**). Es handelt sich ebenfalls um dieselbe Keramik. Auf der Innen- und Außenfläche ist je eine mikroporöse Platinschicht als Elektrodenring aufgebracht. Außen ist die Platinschicht mit einer hochporösen Keramikschicht geschützt. Ein keramisches Nickel-Heizelement im Inneren der L-Sonde sorgt für die Erwärmung, die für die Ionen-Leitfähigkeit notwendig ist. Wegen der PTC-Charakteristik ist ein schnelles Aufheizen der Sonde möglich.



Bild 6: Netzteil NTV44P

Fig. 6: Power Supply NTV44P

Besonderheiten der L-Sonde

Für den richtigen Umgang mit der L-Sonde sind einige Punkte zu beachten. Misst man mit den L-Sonden in Luft, dann zeigen Sie eine Spannung meist zwischen $-8...-15$ mV anstatt 0 mV. Dies ist auf einen internen Thermoelementeffekt zurückzuführen. Aufgrund von kleinen Unterschieden zwischen den Heizelementen der Sonden wird jede Sonde unterschiedlich geheizt. Die Sonden werden hierzu mit einer Spannung von 12 V versorgt, und die Temperatur der Keramik kann Werte zwischen $500...600$ °C annehmen. Für die genaue Messung des Sauerstoffes und die daraus resultierende Berechnung des C-Pegels müssen diese Eigenschaften berücksichtigt werden und in Form von Korrekturfaktoren in die Berechnung einfließen.

Für die genaue Berechnung ist auch eine Regelung der Sondentemperatur sehr wichtig. Damit werden Störinflüsse wie Änderung des Durchflusses, der Umgebungstemperatur und der Gaszusammensetzung eliminiert. **Bild 5** zeigt den Temperaturverlauf einer geregelten und einer ungeregelten L-Sonde bei gleicher Änderung der Betriebsbedingungen. Die Änderung der Gaszusammensetzung und des Durchflusses bewirkte bei der ungeregelten L-Sonde eine Temperaturänderung von über 40 °C. Die Temperatur der geregelten L-Sonde änderte sich dagegen nur geringfügig und wurde nach kurzer Zeit wieder auf dem ursprünglichen Wert eingeregelt.

Das Netzteil NTV44P (**Bild 6**) der Firma MESA Electronic GmbH wurde für die Regelung der Temperatur der L-Sondenkeramik auf einen konstanten Wert konzipiert. Durch den Einsatz dieses Netzteiles sind nun auch Durchflüsse > 50 l/h möglich. Dies reduziert die Totzeit (die Zeit, welche das Gas benötigt, um aus dem Ofen zu der Sonde zu gelangen) erheblich. Bei einer Sonde mit einem Gasentnahmerohr von 720 mm Nennlänge beträgt die Totzeit bei einem Durchfluss von 20 l/h etwa 17 Sekunden. Diese reduziert sich bei einem Durchfluss von 60 l/h auf weniger als 6 Sekunden. Beide Totzeiten sind im Prozess der Aufkohlung unbedenklich. Durch die Temperaturregelung wird zudem die Betriebstemperatur der L-Sonde viel schneller erreicht, als wenn man sie nur mit einer konstanten Spannung heizen würde.

Es ist auch zu beachten, dass die Spannungen der O_2 -Sonde und L-Sonde bei gleichem Sauerstoffpartialdruck im Ofen

unterschiedlich sind. Will man mit der L-Sonde den C-Pegel regeln, benötigt man entweder Regler, welche aus diesem Signal und den Korrekturfaktoren den C-Pegel errechnen und regeln können (**Bild 7**), oder Messumformer, welche aus dem L-Sonden-Signal den C-Pegel errechnen oder dieses Signal in einen O₂-Sondensignal wandeln (**Bild 8**). Das Netzteil NTV44P verfügt auch über die Option die L-Sondenspannung in die O₂-Sondenspannung umzuwandeln.

Die Gasentnahmearmatur für die C-Pegel-Regelung mit der L-Sonde

Mit der wichtigste Punkt für die praktische Messung der Atmosphäre eines Ofens mit der L-Sonde ist der richtige Aufbau der Gasentnahmearmatur (**Bild 9**). Die Konstruktion ist so gewählt, dass die Armatur meist direkt ohne mechanischen Aufwand in die Aufnahme einer O₂-Sonde eingeschraubt werden kann. Das Ofengas wird in einem keramischen Rohr bis zur Außenwand des Ofens geführt. Auf dem Stahl-Schutzrohr der Armatur ist markiert, an welcher Stelle das innere Keramikrohr endet. Das restliche Stück des Stahlschutzrohres dient als Kühlstrecke. Durch diese Konstruktion wird Folgendes erreicht:

- Das Gas kommt in heißem, reaktionsfähigem Zustand nicht mit Stahlteilen des Entnahmerohrs in Berührung, ein Temperaturabfall und damit ein Verrußen wird vermieden.
- Durch die hinreichende thermische Isolation des Gases bis zum Erreichen einer „Kühlstrecke“, wird eine Umreaktion in einen anderen Gleichgewichtszustand verhindert.
- Außerdem wird die Gasfließgeschwindigkeit durch die Verringerung des Querschnitts im Keramikrohr erhöht.
- Beim Erreichen der Ofenaußenwand entfällt die thermische Isolation.
- Die Strömungsgeschwindigkeit wird durch den größeren Querschnitt stark reduziert.
- Mit dem Verlassen der Ofenisolation erfolgt eine schnelle Abkühlung des Gases und damit ein „Einfrieren“ der Gaskomponenten. Ein Umreagieren in einen anderen Gleichgewichtszustand wird dadurch vermieden. Ein anderer Gleichgewichtszustand des Gases würde die Berechnung des C-Pegels verfä-



Bild 7: C-Pegel-Regler für die L-Sonde

Fig. 7: Carbon controller for L-Probe

schen und zum Verrußen des Entnahmerohrs führen.

Die Messung mit der L-Sonde erfolgt außerhalb des Ofens. Die Temperatur im Inneren der L-Sonde, welche sich bei den meisten Sonden im Bereich von ca. 550–600 °C einstellt, ist immer noch hoch genug, um die Ionenleitfähigkeit des Zirkonoxids zu erhalten. Im Gegensatz zur Sauerstoffsonde reicht hier die niedrigere Temperatur aus. Dies resultiert aus den Unterschieden in der Konstruktion. In der Messkammer ist die Temperatur so gering, dass die Umreaktion des zu messenden Gases ausgeschlossen ist.

Vorteile der L-Sonde

Beide Sonden, sowohl O₂-Sonde als auch die L-Sonde, eignen sich sehr gut für die Regelung des Aufkohlungsprozesses. Die L-Sonde bietet im Vergleich mit der O₂-Sonde zudem einige nennenswerte Vorteile:

- Die Sonde ist sehr robust aufgebaut, und wurde für Betriebsbedingungen wie wechselnde Temperaturen und mechanische Stöße entwickelt; man denke hier an die Abgasleitung im Kraftfahrzeug. Die L-Sonde ist viel unempfindlicher gegen mechanische Vi-



Bild 8: Messumformer für die L-Sonde

Fig. 8: Measurement transducer for L-Probe

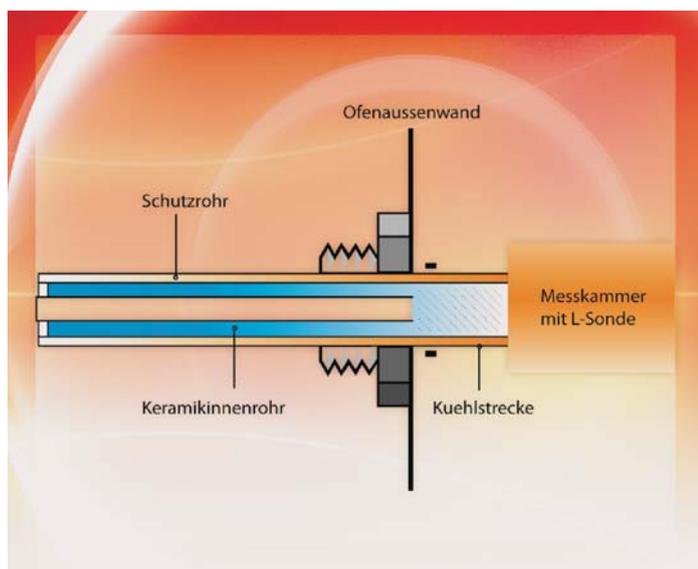


Bild 9:
Aufbau der Gasentnahmemarmatur

Fig. 9:
Construction of the gas sampling fitting

hat gezeigt, dass sie sich für die Regelung des C-Pegels genauso eignen wie die O₂-Sonden. Beide Systeme haben Ihre Vor- und Nachteile. Der klare Vorteil der L-Sonde liegt bei einem kleineren Preis und längerer Lebensdauer. Der Einsatz dieser Sonden führt zu Kosteneinsparungen ohne Qualitätsverluste.

Literatur

- [1] AWT-Fachausschuss 5 Arbeitskreis 4 (Hrsg.): Die Prozessregelung beim Gasaugkohlen und Einsatzhärten. Expert Verlag, Renningen, 1997
- [2] Schmalzried, H.: Über Zirkonoxid als Elektrolyt für elektrochemische Untersuchungen bei höheren Temperaturen. Z. Elektrochem. Ber. Bunsenges. Physik. Chemie. 66 (1962) 7, S. 572
- [3] Schmalzried, H.: Ionen- und Elektronenleitung in binären Oxiden und Ihre Untersuchung mittels EMK-Messungen. Z. Phys. Chem. N.F. 38 (1963), S. 87

brationen und kann deshalb näher an Ventilatoren und Umwälzaggregate eingebaut werden als die O₂-Sonde.

- Da sich die L-Sonde außerhalb des Ofens befindet, kann ein Austausch der Sonde auch im Betriebszustand in wenigen Minuten ausgeführt werden.
- Im Gegensatz zu der O₂-Sonde kann man die L-Sonde auch bei Temperaturen bis 1600 °C einsetzen, ohne eine Signalverfälschung zu bekommen. Man muss bei solchen Einsätzen nur dafür sorgen, dass die Kühlstrecke entsprechend ausgeführt wird.
- Durch die Konstruktion der Gasentnahmemarmatur kommt die L-Sonde nicht mit der hohen Temperatur im Ofen in Berührung. Darüber hinaus unterliegt die Keramik der L-Sonde keinen Temperaturschwankungen. Die O₂-Sonde dagegen unterliegt ständig den Temperaturänderungen der Ofenatmosphäre. Dies ist ein wesentlicher Grund für die hohe Lebensdauer der L-Sonde im Vergleich zur O₂-Sonde. Aus dem praktischen Einsatz der L-Sonden in den Aufkohlungsprozess während

der letzten 20 Jahre kann man sagen, dass die Lebensdauer der L-Sonde mindestens doppelt so groß ist wie die der O₂-Sonde im selben Prozess. In Prozessen, in denen die O₂-Sonde sehr stark thermisch beansprucht wird, erreicht die L-Sonde bis zum Vierfachen an Lebensdauer der O₂-Sonde.

- Ein wesentlicher Vorteil ist der Preis, sowohl bei Erstbeschaffung als auch bei der Nachbestellung. Die Anschaffungskosten der L-Sonde sind etwas höher als die einer neuen O₂-Sonde, wenn man eine O₂-Sonde durch die L-Sonde austauschen will und über keinen Regler verfügt, der aus der L-Sonden-Spannung den C-Pegel berechnen kann. In diesem Fall ist zusätzlich ein Messumformer erforderlich. In Anbetracht der längeren Lebensdauer und der geringeren Folgekosten für den Ersatz bzw. Reparatur hat man ein „Return on Investment“ schon nach dem ersten Ausfall der O₂-Sonde.

Fazit

Die Erfahrung im Umgang mit den L-Sonden in den vergangenen 20 Jahren

Dr. Đžo Mikulović
MESA Electronic GmbH,
Geretsried

Tel. 0 81 71-7 69 30
E-Mail:
dmikulovic@
mesa-international.de



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

Tel. 0 80 31-9 00 57 67 60
E-Mail: dzivanovic@
mesa-international.com



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

Tel. 0 81 71-7 69 30
E-Mail: fehmeier@
mesa-international.de

