

5
2005

GASWÄRME

International

Gasanwendung in Industrie und Gewerbe

<http://www.gaswaerme-online.de>

Schwerpunkt
Hochtemperaturprozesse

Sauerstoffsonde mit Schutzpotential

Oxygen probes with protection potential

Dipl.-Ing. Werner Göring, Kleve

Dipl.-Ing. Max Roggatz, MESA Industrie Elektronik GmbH, Marl

erschienen in

GASWÄRME International 5/2005

Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Ansprechpartner: Stephan Schalm, Telefon 0201/82002-12, E-Mail: s.schalm@vulkan-verlag.de

Sauerstoffsonden mit Schutzpotenzial

Oxygen probes with protective potential

Bei der Regelung stark reduzierender und randoxydarm wirkender Aufkohlungsatmosphären ergibt sich die Aufgabe, zur Vermeidung von Fehlanzeigen keine von der Referenzluft kommenden Sauerstoffionen zur Elektrode in der Atmosphäre strömen zu lassen. Dazu trägt ein an der Atmosphären Elektrode angelegtes, gegenüber Masse negatives elektrisches „Schutzpotenzial“ bei. Nach der Lehre von Volkenstein wird damit Reaktionsrichtung und Katalyse der Vorgänge an den Elektroden beeinflusst. Weitere angenehme Nebeneffekte des Schutzpotenzials sind flinke Messwertanzeige und elektrochemischer Korrosionsschutz metallischer Sondenbauteile, der die Anwendung von Edelmetallen überflüssig macht.

The task arises in control of heavily reducing and boundary-zone oxide depleting carburization atmospheres of preventing flow of oxygen ions originating from the reference air to the electrode in the atmosphere, in order to avoid erroneous indications. An electrical "protective potential" more negative than earth applied to the atmosphere electrode contributes to achieving this target. Volkenstein's theory states that this influences the direction of reaction and catalysis of processes occurring on the electrodes. Other pleasing side-effects of this protective potential include rapid display of measured data and electrochemical anti-corrosion protection of special metal components, thus making the use of noble metals superfluous.

Einleitung

Zur Abwehr einer trägen oder driftenden Anzeige von Sauerstoffsonden wurde erstmals die Anwendung eines so genannten „Schutzpotenzials“ vorgestellt [1] [2]. Dabei ist die in der Atmosphäre angeordnete Elektrode nicht – wie üblich – mit Masse, sondern mit einem negativeren elektrischen Potenzial in Berührung (Bild 1a und b). Es ist die gleiche Anordnung wie zum „katodischen Korrosionsschutz“ [3] der metallischen Sondenwerkstoffe.

Die träge Anzeige einer Sauerstoffsonde bewirkt nach C-Pegel-Veränderung in Richtung Aufkohlen eine Überkohlung und in Richtung Abkohlen einen zu niedrigen tatsächlichen C-Pegel der Atmosphäre. Nach Spülung der Sonde ist die Wartezeit bis zu repräsentativen mV-Werten sehr lange. Die Stärke der Beeinflussung und deren Dauer ist vom Grad der Trägheit abhängig. Die Drift zu immer höheren Anzeigewerten – insbesondere bei hohen Temperaturen und C-Pegeln – ist bereits beschrieben [1] [4]. Sie hängt von der Bauweise und vom Betriebszustand der Sauerstoffsonde ab. Deren Ursache und die bereits genannten Abwehrschritte [1] werden nachstehend näher erläutert.

Ursache der Überspannung

An der Mess- und Referenzelektrode werden die Gase der Umgebung adsorbiert. Es

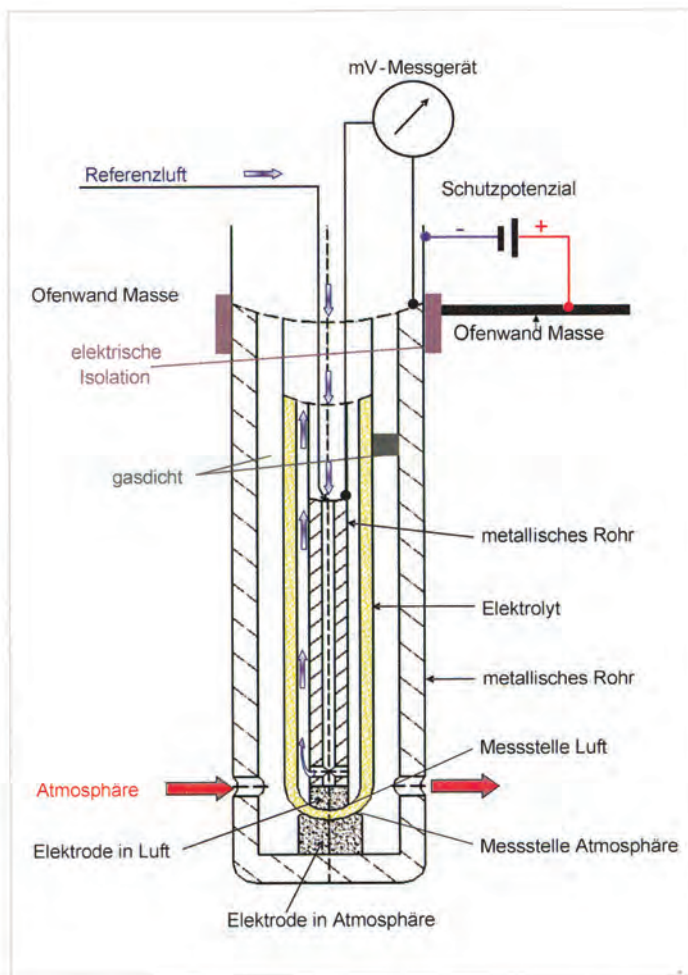


Bild 1a: Schemabild einer Sauerstoffsonde mit Schutzpotenzial und separaten Elektroden
Fig. 1a: Schematic of an oxygen probe with protective potential and separate electrodes

handelt sich dabei um elektrisch geladene O^{2-} -Ionen, das ungeladene – zu messende – Gas, Sauerstoff sowie die übrigen Begleitgase. Außerdem lagern sich an jeder Seite Elektronen an. Deren Differenz ist die Sonden-spannung als Messgröße.

In Bild 2 [5] sind die adsorbierten Gase und die angelagerten Elektronen an den beiden Elektroden dargestellt. Dazwischen liegt

Dipl.-Ing. Werner Göring
Kleve

Tel. 0 28 21/499 28

Dipl.-Ing. Max Roggatz
Goch

Tel. 0 28 23/2 90 05
E-Mail: max_roggatz@arcor.de

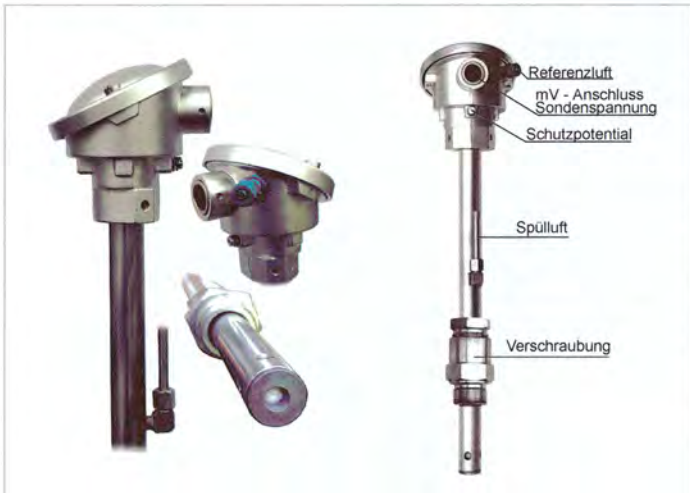


Bild 1b: Ansicht einer Sauerstoffsonde mit Schutzpotential und Elektroden aus hitzebeständigem Stahl (Werkbild: MESA Industrie-Elektronik GmbH, Marl)

Fig. 1b: View of an oxygen probe with protective potential and electrodes consisting of heat-resisting steel (works photo: MESA Industrie-Elektronik GmbH, Marl)

der Elektrolyt, der nur für Sauerstoffionen durchlässig ist. Gleichgewicht zwischen den beiden Elektroden besteht, wenn deren elektrochemische Potenziale der adsorbierten Sauerstoffionen $\eta_{O^{2-}}$ -gleiche Werte annehmen (Bezeichnung nach [6]).

Auf das vereinfachte Schema bezogen bedeutet das: wenn an jeder Elektrolytseite die Summe der Ladungsträger gleich ist. Die Beispiele in den Schematas enthalten jeweils 8 Ladungsträger, die an der Luftpolektrode in 3 O^{2-} -Ionen + 2 freie Elektronen aufgeteilt sind.

Bei einer gewissen Temperatur werden an der Referenzluftelektrode stets die gleiche Anzahl Ladungsträger erzeugt. An der Atmosphärenlektrode werden bei niedrigem C-Pegel mehr Ladungsträger gebildet, als bei hohem C-Pegel. Damit beide Elektro-

den miteinander im Ladungsgleichgewicht sind, ist praktisch ein stetiger Transport von O^{2-} -Ionen durch den Elektrolyten und eine entsprechende Gleichgewichtseinstellung an den Elektroden erforderlich.

Solange die Ionen beim Ladungsausgleich von der Atmosphärenlektrode zur Luftpolektrode strömen, ist die Anzeige der Sauerstoffsonde korrekt. Die an der Luftpolektrode ankommenden Sauerstoffionen nehmen – ohne zu reagieren – ein Gleichgewicht an. Im umgekehrten Fall reagieren an der Atmosphärenlektrode die ankommenden Sauerstoffionen mit H_2 , CO und ggf. auch CH_4 . Die Stärke dieser Reaktion hängt davon ab, wie viele Sauerstoffionen zur Atmosphärenlektrode nachgeliefert werden können. Um den Gleichgewichtszustand zu erreichen, muss an der Atmosphärenlektrode eine ionenbildende

elektrochemische Gegenreaktion zustande kommen, deren Größe von der Stärke der Reaktion der zuströmenden Sauerstoffionen abhängig ist. Daher adsorbieren zusätzlich die Reaktionsprodukte der Sauerstoffionen H_2O und CO_2 an der Oberfläche der Atmosphärenlektrode. Dort adsorbieren somit sowohl Gleichgewichts- als auch Reaktionsgase. In dem Maße, wie die Reaktionsprodukte H_2O und CO_2 stärker adsorbieren als O^{2-} -Ionen, verdrängen sie einen Teil der dort im Gleichgewicht mit der Atmosphäre befindlichen O^{2-} -Ionen. Um den Ladungsverlust der aus der Adsorptionsschicht verdrängten O^{2-} -Ionen auszugleichen, werden entsprechend mehr Elektronen angelagert. Die Folge davon ist eine Überspannung der Sauerstoffsonde.

Bild 3 zeigt die bei O^{2-} -Ionen-„Zuströmdruck“ auftretenden Reaktionen und die sich an den Messstellen einstellenden Gleichgewichte. Wie es im Einzelnen zu dem Mehr an Elektronen und dem Weniger an Sauerstoffionen kommt, kann offen bleiben. Die überraschend auftretende Überspannung ist nur durch tiefergehendes Eindringen in die notwendigen Begleitumstände des Messsystems erklärbar.

Vorgenannte Überspannung wird durch zeitabhängige Veränderungen an der Sonde ausgelöst, die die Richtung des Ladungsausgleiches beeinflussen. An der Atmosphärenlektrode werden durch katalytische Vergiftung der CO-Spaltung immer weniger O^{2-} -Ionen erzeugt; an der Luftpolektrode verbessern entstehende Oxyde die O^{2-} -Ionenbildung. Eine zunehmend höhere Ofentemperatur beeinflusst die Sauerstoffsonde in gleicher Weise. CO in der Atmosphäre wird bei steigender Temperatur immer stabiler und es bilden sich daraus weniger O^{2-} -Ionen. O_2 in der Referenzluft spaltet sich bei höherer Temperatur stärker und es bilden sich dann mehr O^{2-} -Ionen. Die zeitabhängigen Veränderungen an den Elektroden führen somit an der Sauerstoffsonde zum gleichen Fehlerverhalten, wie wenn sie bei einer höheren Ofentemperatur betrieben würde. Neben der Überspannung beim Aufkohlen lassen sich auf diese Weise noch andere Erscheinungen beim Carbonitrieren und Nitrocarbrieren erklären.

Abhilfe durch negatives Fermi-Potenzial

Die beschriebene Anwendung eines Schutzpotenzials [1] bringt Vorteile verschiedener Art. Sie trägt der Tatsache Rechnung, dass bei den elektrochemischen Reaktionen oder Katalysen auch Elektronen teilnehmen [7].

Aus der neuen Erklärung der Überspannung leitet sich folgende Forderung ab: Die Triebkraft der O^{2-} -Ionen an der Atmosphärenlektrode ($\eta_{O^{2-}}$ -Wert) muss höher

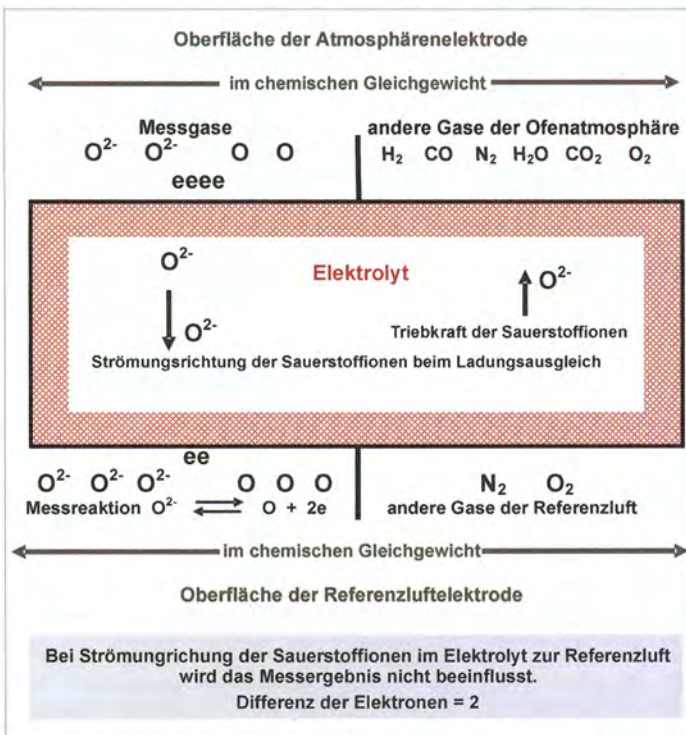


Bild 2: Schemabild über die Adsorption von Gasen an den Messstellen ohne Reaktion von Ionen mit Gasen

Fig. 2: Schematic view of adsorption of gases at the measuring points with no reaction of ions with gases

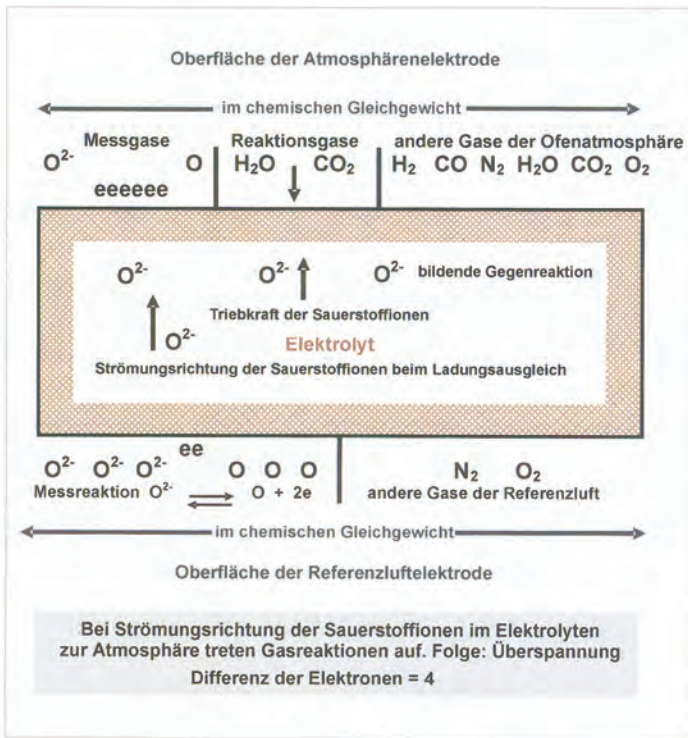


Bild 3: Schemabild über die Adsorption von Gasen an den Messstellen mit Gasreaktionen bei Gleichgewichtseinstellung

Fig. 3: Schematic view of adsorption of gases at the measuring points with reaction of gases upon achievement of equilibrium

Verminderung der Ionenbildung an der Lufterlektrode

An der Lufterlektrode entstehen O^{2-} -Ionen aus Sauerstoffatomen und Elektronen bei sehr hoher Bildungsenergie. Das Vorhandensein atomaren Sauerstoffs wird durch die Anwesenheit freier Elektronen des Schutzpotenzials unterdrückt [8]. Wie bereits berichtet [1], werden dadurch auch die hitzebeständigen metallischen Werkstoffe der Sonde vor Korrosion geschützt. Boreskov [9] vertritt die Ansicht, dass zweiwertige Sauerstoffionen O^{2-} vorwiegend an oxidierten Metallen entstehen. Das hängt damit zusammen, dass an oxidierten Flächen der hohe Energiebedarf zur Bildung der zweiwertigen O^{2-} -Ionen besser gedeckt werden kann, weil die Bindungsenergie in den Oxyden geringer ist, als in den Metallen (Coulomb-Interaction). **Bild 4** zeigt schematisch bei der Produktion von O^{2-} -Ionen das Zusammenwirken von Sauerstoffatomen und der Übertragung der Bildungsenergie durch Metalloxyde an einer Lufterlektrode ohne Schutzpotenzial. Zum Vergleich dazu zeigt **Bild 5** eine Sonde mit Schutzpotenzial und der geringeren O^{2-} -Ionenproduktion.

sein, als an der Lufterlektrode. Dann erfolgt der Ladungsausgleich problemlos in Richtung zur Lufterlektrode. Um dies zu erreichen, muss die Triebkraft an der Elektrode in der Atmosphäre erhöht und an der Elektrode in der Referenzluft erniedrigt werden. Außerdem muss noch die Trägheit der Anzeige verhindert werden. Letzteres geschieht durch die Erhöhung des $\eta_{O^{2-}}$ -Wertes an beiden Elektroden. Wie sich diese unterschiedlichen Aufgaben in einem einzigen Schritt einer Lösung näher bringen lassen, wird nachstehend erläutert:

Abhilfe durch das Fermi-Potenzial

Entsprechend dem Messprinzip gilt für das elektrochemische Potenzial – der Einfachheit einwertig angenommener Sauerstoffionen [1]:

$$\eta_{O^{2-}} = \mu_{O^{2-}} + \eta_e \quad (1)$$

es bedeuten

$\eta_{O^{2-}}$ = elektrochemisches Potenzial der Sauerstoffionen,

$\mu_{O^{2-}}$ = gesuchtes chemisches Sauerstoffpotenzial,

η_e = elektrochemisches Potenzial der Elektronen (Fermi-Potenzial).

Bei ausgeglichener Ladung (gleiche $\eta_{O^{2-}}$ -Werte) repräsentiert die Differenz der elektrochemischen Potenziale der Elektronen am Elektrolyt – als SONDENSPIGUNG – die Differenz der Sauerstoffpotenziale zwischen Atmosphäre und Referenzmittel.

Aus Gl. (1) geht hervor, dass der $\eta_{O^{2-}}$ -Wert durch das anliegende Fermi-Potenzial beeinflusst werden kann. Aus konstruktiven Gründen liegt an der Atmosphärelektrode meist Masse an. Wird die Sonde elektrisch isoliert in den Ofenraum eingebaut, kann über eine Gleichspannungsquelle erreicht werden, dass an beiden Elektroden ein negatives elektrisches Potenzial gegenüber Masse anliegt. Durch die erhöhte Triebkraft der an den Elektrolytoberflächen befindlichen Ionen werden diese in die Leerstellen des Elektrolyten hineingedrückt.

Es ist offensichtlich, dass durch Erhöhung eines η_e -Wertes der $\eta_{O^{2-}}$ - und der η_e -Wert beider Elektroden angehoben wird. Durch diesen Schritt werden weniger Ionen aus dem Elektrolyt reduziert und die Anzeige der Sonde bleibt flink [1].

Abhilfe durch veränderte Ionenproduktion:

Gl. (1) lässt sich auch wie folgt schreiben [1]:

$$\eta_{O^{2-}} = \mu_{O^{2-}} + \mu \quad (2)$$

es bedeuten:

$\mu_{O^{2-}}$ = chemisches Potenzial der Sauerstoffionen,

μ = elektrisches Potenzial.

In gleicher Weise wie durch Anlegen eines Fermi-Potenzials lässt sich der $\eta_{O^{2-}}$ -Wert auch über die Menge der produzierten Ionen beeinflussen. Dies muss an jeder Elektrode separat beurteilt werden.

Durch den Korrosionsschutz werden somit an der Lufterlektrode im Sinne der Aufgabenstellung weniger O^{2-} -Ionen produziert. Dieser Einfluss hat besonders an der Lufterlektrode Bedeutung, da hier der Hauptanteil des $\eta_{O^{2-}}$ -Wertes aus O^{2-} -Ionen besteht.

Stabilisierung der Ionenbildung an der Atmosphärelektrode durch Katalyse des CO-Zerfalls

Durch einen ganz anderen Mechanismus wird an der Atmosphärelektrode die Bil-

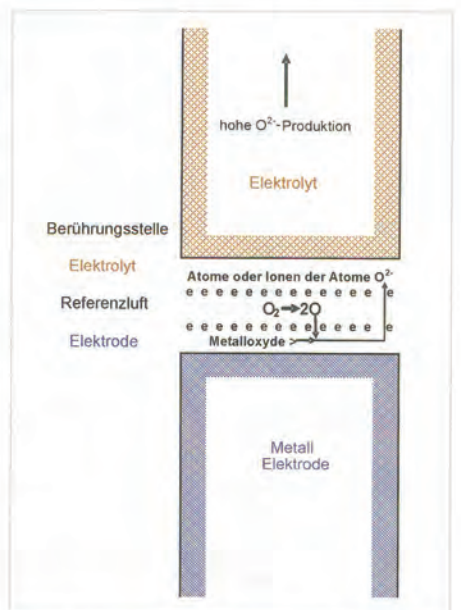


Bild 4: Schemabild der starken O^{2-} -Produktion an einer Lufterlektrode ohne Schutzpotenzial.

Fig. 4: Schematic view of pronounced O^{2-} production on an air electrode with no protective potential

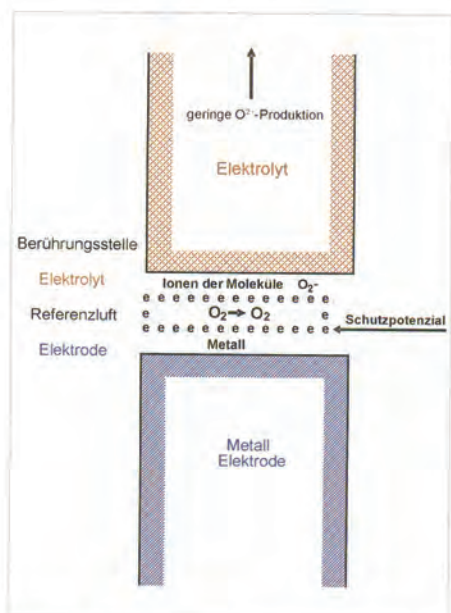


Bild 5: Schemabild der Lufterlektrode mit Schutzpotenzial und geringer O²-Produktion.

Fig. 5: Schematic view of the air electrode with protective potential and low O² production

derung der Sauerstoffionen beeinflusst. Die Spaltung von CO verläuft nach Borekov [9] und Engel [10] in der Endphase durch Elektronenzufuhr. Dazu werden Elektronen aus der d-Schale des berührenden Metalls emittiert. Das negativere Elektrodenpotential erhöht die Anzahl freier Oberflächenelektronen. Dadurch wird die sonst notwendige Zulieferung der Elektronen aus dem Metall unterstützt. Folglich stehen zur O²-Ionen-Produktion eine gleichbleibend hohe Anzahl von Sauerstoffatomen im Langzeitbetrieb zur Verfügung.

Weitere Einflüsse des Schutzpotenzials

In ähnlicher Weise, wie bei der Reaktion von Sauerstoffionen mit der Ofenatmosphäre zwischenzeitliche Reaktionsprodukte das repräsentative Adsorptionsverhalten stören, kann dies auch beim Zerfall von CH₄ der Fall sein. Daher sollten die Reaktionen der Atmosphäre mit CH₄ von der Mess-elektrode ferngehalten werden. Der CH₄-Zerfall wird durch positive Ionen eingeleitet [11]. Das negative Elektrodenpotential neutralisiert positive Ionen und stabilisiert somit CH₄ an der Elektrodenoberfläche.

Das Fermi-Potenzial überdeckt auch den Einfluss, den die werkstoffabhängige Elektronenkonfiguration [12] auf Katalyse [7] [13] und Adsorptionsverhalten an der Elektrode ausübt. Besondere Vorteile ergeben sich mit unter Schutzpotenzial stehendem hitzebeständigem Stahl als Elektrodenwerkstoff. Das Adsorptionsverhalten wird dabei weniger durch die Katalyse des Elektrodenwerkstoffs und mehr durch die zu

messende Atmosphäre bestimmt. Auch wurde noch keine Vergiftung der CO-Spaltkatalyse beobachtet. Durch den offensichtlich verbesserten CO-Zerfall ist bis jetzt keine erhöhte C-Abscheidung an der Messstelle aufgefallen. Verrußte Sauerstoffsonden zeigen erfahrungsgemäß zu niedrig an. Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich negative C-Ionen bilden, die an der Elektrode adsorbieren und – wie O²-Ionen – an der Bildung des η_{O²}-Wertes teilnehmen. Es lagern sich entsprechend weniger Elektronen an und die Messspannung wird niedriger.

Im Ofenraum sich bildende negative C-Ionen werden durch die unter negativem Potenzial stehende Messelektrode abgestoßen. Dadurch werden weniger dieser Ionen adsorbiert. Das Schutzpotenzial führt daher auch zu einer Verbesserung der C-Pegelmessung bei rußhaltigen Atmosphären. Demzufolge könnten längere Perioden beim Freibrennen der Messstelle mit Luft gewählt werden. Ein analoger Vorgang ist die N-Bildung im Ofenraum bei NH₃-Zufuhr und der dadurch eintretende Abfall der Messspannung.

Der verbesserte CO-Zerfall an der Sonde bewirkt eine Atmosphäre, die gegenüber der an den Werkstücken herrschenden Aufkohlungsatmosphäre etwas verändert ist: bei höherem Sauerstoffanteil an der Sonde herrscht eine stärkere Aufkohlungs-wirkung. Gegenüber Sonden ohne Schutzpotenzial zeigen daher Sonden mit Schutzpotenzial eine etwas niedrigere Spannung an. Für die Umrechnung der Sonden-spannung in „% C“ dient in der Regel die von der AWT empfohlene Formel [14]. Diese enthält auch einen Ansatz für den CO-Zerfall im Gleichgewichtszustand. Die Differenzen zwischen Atmosphäre an Sonden und Werkstücken beruhen auf mehr oder weniger Abweichung vom Gleichgewichtszustand des CO-Zerfalls und entziehen sich der Berechnung. Für die Sauerstoffsonde ist diese veränderte Atmosphäre notwendig, um sie vor vorzeitiger Alterung zu schützen. Evtl. muss ein etwas anderer empirischer Korrekturfaktor bei der C-Pegel-Ermittlung gewählt werden.

Praktische Vorteile des Schutzpotenzials

Die beschriebenen Wirkungen des Schutzpotenzials lassen folgende Schritte zu:

- Sauerstoffsonden können in im Ofenraum erzeugten randoxydarm wirkenden Aufkohlungsatmosphären aus Erdgas + Luft betrieben werden, ohne dass deren Anzeige durch die starke Reduzierwirkung der Atmosphäre träge wird oder Überspannung annimmt.
- Infolge des katodischen Korrosionsschutzes können hitzebeständige Stähle anstelle von Edelmetallen als Elektroden

der Sonden verwendet werden. Die Eigenschaften solcher Sonden sind denjenigen mit Edelmetallkontaktierung gleichwertig. Da solche Nichtedelmetall-Elektroden katalytisch neutral gegen Adsorption negativer Ionen und gegen CH₄-Zerfall [11] [12] wirken, ist mit einer guten Anzeigegenauigkeit zu rechnen.

- Sauerstoffsonden neigen bei hohen Ofentemperaturen zu Überspannung. Das angelegte Schutzpotenzial bietet einen größeren Temperaturbereich der fehlerfreien Anzeige.

Durch das angelegte negative Fermi-Potenzial werden somit in erwünschter Weise mehr O²-Ionen an der Atmosphärenelektrode erzeugt und mit dem gleichen Schritt an der Lufterlektrode weniger.

Das verändert die η_{O²}-Werte im Sinne der Aufgabenstellung. Metallische Sondenbauteile werden vor Korrosion geschützt; störende Nebenerscheinungen wurden bis jetzt nicht beobachtet. Die möglichen Vorteile und Kosteneinsparungen überdecken bei weitem den durch das Schutzpotenzial bedingten Aufwand.

Messungen zur Bestätigung der neuen Betrachtung

Nur bei gealterten Sonden mit Ladungsausgleich zur Atmosphärenelektrode verändert die Schutzspannung sofort das Messergebnis. Dies ist bei folgender Messung der Fall:

Hochtemperaturaufkohlung bei 980 °C mit Endogas aus Propan,

1,1 % C: mit Schutzspannung 1159 mV, ohne Schutzspannung 1166 mV.

An nicht gealterten Sonden kann auf das Geschehen zwischen den Elektroden nur indirekt über den Kurzschlussstrom geschlossen werden. An einer neuen Sonde mit Edelmetall-Elektroden, traten – unter sonst gleichen Bedingungen – folgende Kurzschlussströme auf:

- mit – 1,3 V-Schutzpotenzial: 0,68 mA, auf 0,1 mA fallend,
- ohne Schutzpotenzial: 1,45 mA, auf 0,5 mA fallend.

Diese Ersatzgröße für die Ionenproduktion lässt die wesentlich höhere Ionenproduktion ohne Schutzpotenzial an der Lufterlektrode erkennen. Sie führt – wie beschrieben – zu einer Überspannung. Bei elektrischem Kurzschluss zwischen den beiden Elektroden wird das elektrochemische Potenzial der Sauerstoffionen η_{O²} durch das chemische Potenzial der Sauerstoffionen μ_{O²} als Triebkraft ersetzt. Dabei wird am geschlossenen Stromkreis der beim Ladungsausgleich zuvor erfolgte Übertritt von Ionen zur gegenüberliegenden Elektrode abgebaut. Ist der Kurzschlussstrom fal-

lend, so ist dies ein Anzeichen dafür, dass der zuvor erfolgte Ladungsausgleich in der gewünschten Richtung zur Lufterlektrode verlief und umgekehrt.

Fazit

An konventionellen Sauerstoffsonden treten folgende Alterungserscheinungen auf:

- Träge Anzeige durch Reduktion von Sauerstoffionen aus den Leerstellen des Elektrolyten.
- Überspannung durch Reaktion der Aufkohlungsatmosphäre mit Sauerstoffionen, die von der Referenzseite herkommen.

Das gegenüber Masse negative Schutzpotenzial schützt elektrochemisch vor:

- Reduktion der Sauerstoffionen aus den Elektrolyt-Leerstellen. Die Anzeige der Sonde bleibt flink.
- Verändert die Triebkräfte der Sauerstoffionen ($\eta_{O^{2-}}$ -Werte) zum notwendigen Ladungsausgleich in der Weise, dass in einem größeren Messbereich die Ionen zur Lufterlektrode strömen. Dies mindert die Gefahr der Überspannung. An der Lufterlektrode ist dies eine Folge des elektro-

chemischen Korrosionsschutzes. An den oxydfreien Metallen bilden sich weniger zweiwertige Sauerstoffionen, als an Oxyden. An der Elektrode in der Atmosphäre bilden sich mehr stabile Sauerstoffionen durch katalytische Verbesserung der CO-Spaltung. Das Schutzpotenzial schützt auch nach den seitherigen Beobachtungen die Anzeige der Sauerstoffsonde besser vor Verfälschung des Messergebnisses bei Rußabscheidung an den Elektroden.

- Mit Schutzpotenzial betriebene Sauerstoffsonden benötigen keine Edelmetalle als Elektrodenwerkstoff.

Es wurde dargelegt, dass trotz unterschiedlicher Fehlerursachen mit dem einzigen Abhilfeschrift (negativeres Elektrodenpotenzial) eine Verbesserung der Anzeigegenauigkeit eintritt. Zweck der Arbeit war es, für die empirisch gefundene einfache Handlungsweise ein Denkmodell zu finden, das die überraschenden Auswirkungen des Schutzpotenzials erklärt und dabei zu richtigen Ergebnissen führt.

Literatur

[1] Göhring, W.: Warum zeigen Sauerstoffsonden träge an oder driften? HTM 57 (2002) 1 S. 34

[2] Göhring, W.: Deutsche Offenlegungsschrift, DE 102 61 358 A1 vom 17.2.03

[3] Schatt, W.: Einführung in die Werkstoffwissenschaft, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig 1972, Seite 328

[4] Edenhofer, B.; Lerche, W.: Entwicklungen in der Verfahrens- und Prozesstechnik der Gasaufkohlung, HTM 49 (1994) 2 S. 88-95

[5] Göhring, W.: Die Alterung der Sauerstoffsonde, Bericht beim AWT-Fachausschuss 5, Arbeitskreis 4, am 9.10.02, Wiesbaden

[6] Rickert, H.: Einführung in die Elektrochemie fester Stoffe, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York 1973, S. 133

[7] Volkenshtein F. F.: The Electronic Theory of Catalysis on Semiconductors, Pergamon Press. Oxford-London-New York-Paris 1963, S. 153

[8] wie [7], jedoch Seite 25

[9] Boreskov, G.K.: Catalytic Activation of Dioxygen, Institute of Catalysis, Novosibirsk 630090 USSR, S. 52-53, Auszug S. 53

[10] Engel, T., Ertl, G.: Adv. Catal. 28 379 (1979)

[11] Olah, George A.: Carbocations an Electrophilic Reaktionen, Verlag Chemie GmbH, Weinheim (1974), S. 96

[12] Schwabe, Kurt: Physikalische Chemie, Akademie-Verlag Berlin 1986, S.114

[13] Grabke, H.J.: Prinzip der Sauerstoffpartialdruck-Messung, HTM 44 (1989) 5, S. 276

[14] AWT-Fachausschuss 5, Arbeitskreis 4: Die Prozessregelung beim Gasaufkohlen und Einsatzhärten, Expert-Verlag Renningen-Malmsheim 1997, S. 21



MESA Industrie-Elektronik GmbH

Elbestr. 10 , D-45768 Marl / Postfach 1546, 45745 Marl

Telefon: 02365/9152-20 / Telefax: 02365/9152-25

info@mesa-gmbh.de / www.mesa-gmbh.de