

First Sensor   
is now part of

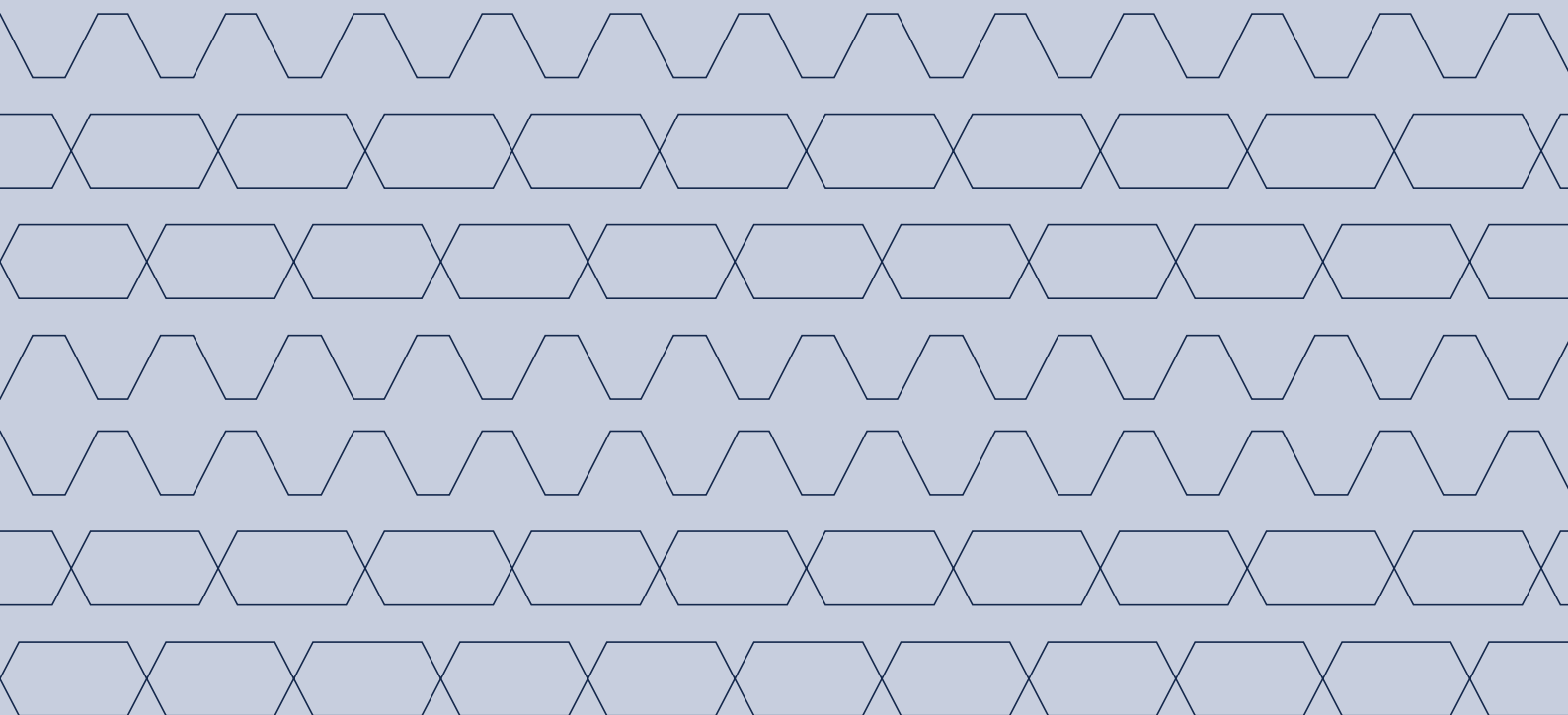


---

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid- Sauerstoffsensoren

---

Anwendungshinweis



# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 1. Physikalischer Hintergrund

### 1.1 Partialdruck

#### Definition:

Der Partialdruck ist der Druck, der in einem Gasgemisch, wie z.B. der Luft, einem bestimmten Gas zugeordnet werden kann. Der Partialdruck entspricht dabei dem Gesamtdruck, den das einzelne Gas beim alleinigen Ausfüllen des gesamten Volumens ausüben würde.

In der Biologie und Medizin sind vor allem der Sauerstoff- und der Kohlenstoffdioxid-Partialdruck von großer Bedeutung. Hier wird der Begriff auch auf die Konzentration dieser Gase in Lösung angewendet, beispielsweise im Blut oder in Wasser. Dabei wird als Partialdruck derjenige Druck des Gases angegeben, der mit der betreffenden Konzentration in Lösung (an einer gedachten oder wirklichen Grenzfläche von Gas und Flüssigkeit) in einem Diffusionsgleichgewicht steht. Der Partialdruck wird immer dann anstatt der Massenkonzentration verwendet, wenn das Diffusionsverhalten des gelösten Gases betrachtet wird.

#### Dalton-Gesetz:

Die Summe aller Partialdrücke  $p_i$  bei idealen Gasen ist gleich dem Gesamtdruck des Gasgemisches  $p_{\text{Gesamt}}$ :

$$p_{\text{Gesamt}} = \sum_{i=1}^k p_i \quad (1)$$

Daraus leitet sich ab, dass das Verhältnis der Teilchenanzahl (Stoffmenge)  $n_i$  einer Kom-

ponente  $i$  zur Gesamtteilchenzahl  $n_{\text{Gesamt}}$  des Gemisches gleich dem Verhältnis von Partialdruck  $p_i$  der Komponente  $i$  zum Gesamtdruck  $p_{\text{Gesamt}}$  des Gemisches ist.

$$\frac{n_i}{n_{\text{Gesamt}}} = \frac{p_i}{p_{\text{Gesamt}}} \quad (2)$$

$n_i$  : Teilchenanzahl des Gases  $i$   
 $n_{\text{Gesamt}}$  : Gesamtteilchenzahl  
 $p_i$  : Partialdruck des Gases  $i$   
 $p_{\text{Gesamt}}$  : Gesamtdruck

#### Beispiel 1:

Der Luftdruck beträgt auf Meereshöhe unter Normalbedingungen 1013,25 hPa. Die wesentlichen Bestandteile trockener Luft sind hierbei Stickstoff (78,09 % Vol.), Sauerstoff (20,95 % Vol.), Argon (0,927 % Vol.) und Kohlenstoffdioxid (0,033 % Vol.). Man kann hierbei den Volumenanteil mit dem Teilchenanteil gleichsetzen, da es sich um annähernd ideale Gase handelt. Die anderen Bestandteile der Luft sind aufgrund ihres geringen Anteils vernachlässigbar.

Löst man Gleichung (2) nach dem Partialdruck eines Gases auf, ergibt sich:

$$p_i = \frac{n_i}{n_{\text{Gesamt}}} \cdot p_{\text{Gesamt}} \quad (3)$$

Der Sauerstoffpartialdruck ergibt sich somit zu:

$$p_{\text{O}_2} = \frac{20,95\%}{100\%} \cdot 1013,25 \text{ hPa} = \underline{\underline{212,275 \text{ hPa}}}$$

Dieser Wert gilt allerdings nur für trockene Luft (0 % Luftfeuchtigkeit). Ist die Luft feucht, wird ein Teil des Gesamtdrucks durch den Druck des Wasserdampfs verursacht. Daher kann der Sauerstoffpartialdruck genauer berechnet werden, wenn man zusätzlich zum Luftdruck die relative Luftfeuchtigkeit und die Lufttemperatur kennt.

Zuerst wird der Wasserdampfdruck berechnet:

$$p_D = \varphi \cdot p_s \quad (4)$$

$p_D$  : Wasserdampfdruck [mbar]  
 $\varphi$  : Relative Luftfeuchtigkeit [%]  
 $p_s$  : Sättigungsdampfdruck Wasser [mbar]

Der Sättigungsdampfdruck des Wassers ( $p_s$ ) für eine bestimmte Temperatur kann aus Tabelle 1 abgelesen werden. Der Sättigungsdampfdruck wird auch als Taupunkt bezeichnet.

Der Sauerstoffpartialdruck in feuchter Luft berechnet sich dann wie folgt:

$$p_{\text{O}_2} = (p - p_D) \cdot \left( \frac{20,95}{100} \right) \quad (5)$$

$p_{\text{O}_2}$  : Sauerstoffpartialdruck [mbar]  
 $p$  : Barometrischer Druck [mbar]  
 $p_D$  : Wasserdampfdruck [mbar]

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## Beispiel 2:

Anhand der folgenden meteorologischen Daten soll gezeigt werden, wie die Luftfeuchtigkeit den Sauerstoffpartialdruck und damit den entsprechenden Volumenanteil beeinflusst.

Temperatur : 22 °C  
Relative Luftfeuchtigkeit : 32 %  
Barometrischer Druck : 986 mbar

Tabelle 1 zeigt bei 22 °C einen Sättigungsdampfdruck für Wasser von 26,43 mbar. Gleichung (4) ergibt dann:

$$p_D = \left( \frac{32}{100} \right) \cdot 26,43 = 8,458 \text{ mbar}$$

Der Sauerstoffpartialdruck berechnet sich zu:

$$p_{O_2} = (986 - 8,458) \cdot \left( \frac{20,95}{100} \right) = 204,795 \text{ mbar}$$

Nun kann man den Volumenanteil des Sauerstoffs an der Gesamtatmosphäre herausfinden:

$$O_2 \text{ \%Vol.} = \frac{204,8}{986} \cdot 100 = \underline{\underline{20,77 \text{ \%}}}$$

T (°C)	p <sub>s</sub> (mbar)	T (°C)	p <sub>s</sub> (mbar)
0	6,10	31	44,92
1	6,57	32	47,54
2	7,06	33	50,30
3	7,58	34	53,19
4	8,13	35	56,23
5	8,72	36	59,42
6	9,35	37	62,76
7	10,01	38	66,27
8	10,72	39	69,93
9	11,47	40	73,77
10	12,27	42,5	84,19
11	13,12	45	95,85
12	14,02	47,5	108,86
13	14,97	50	123,38
14	15,98	52,5	139,50
15	17,04	55	157,42
16	18,17	57,5	177,25
17	19,37	60	199,17
18	20,63	62,5	223,36
19	21,96	65	250,01
20	23,37	67,5	279,31
21	24,86	70	311,48
22	26,43	75	385,21
23	28,11	80	473,30
24	29,82	85	577,69
25	31,66	90	700,73
26	33,60	95	844,98
27	35,64	100	1013,17
28	37,78	110	1433,61
29	40,04	120	1988,84
30	42,42	130	2709,58

Tabelle 1: Sättigungsdampfdruck des Wassers (p<sub>s</sub>)

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 1.2 Nernst-Spannung

Liegt an den Grenzflächen eines Elektrolyts eine Ionenart in unterschiedlicher Konzentration vor, entsteht eine Potentialdifferenz, welche Nernst-Spannung genannt wird. Diese ist proportional zum Logarithmus des Konzentrationsverhältnisses.

$$\Delta U = -\frac{k_B T}{e_0} \cdot \ln\left(\frac{c_1}{c_2}\right) \quad (6)$$

$k_B$  : Boltzmannkonstante ( $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$  J/K)

$T$  : Temperatur in K

$e_0$  : Elementarladung ( $e_0=1,602 \cdot 10^{-19}$  C)

$c_i$  : Ionenkonzentration in mol/kg

## 1.3 Zirkoniumdioxid ( $ZrO_2$ )

Bei einer Temperatur von 650 °C treten in Zirkoniumdioxid zwei Mechanismen auf:

1.  $ZrO_2$  sondert Sauerstoffionen ab und wird zu einem Festkörperelektrolyt für Sauerstoff. Durch Anlegen einer Stromquelle kann umgebender Sauerstoff durch das  $ZrO_2$  transportiert werden.
2.  $ZrO_2$  verhält sich wie ein Elektrolyt. Liegt an den Grenzflächen des  $ZrO_2$ -Elements eine Sauerstoffdruckdifferenz vor, kann eine Nernst-Spannung gemessen werden (siehe 1.2 Nernst-Spannung).

## 2. Sensoraufbau und Prinzip

### 2.1 Sensoraufbau

First Sensors Sauerstoffsensoren der XYA-Serie bestehen aus zwei Zirkoniumdioxid ( $ZrO_2$ )-Platten, die auf der Vorder- und Rückseite mit durchlässigen Platinfilmen beschichtet sind, die als Elektroden dienen (Bild 2.1). Die beiden Platten schließen einen Platinring ein und bilden so eine hermetisch abgeschlossene Kammer. An den Außenflächen der  $ZrO_2$ -Platten befindet sich je ein weiterer Platinring, der einen elektrischen Kontakt herstellt. Dadurch kann an der vorderen Platte ein entsprechender Pumpstrom eingespeist und an der hinteren Platte eine Messspannung abgegriffen werden.

Zwei Scheiben aus Aluminiumoxid ( $Al_2O_3$ ) dienen als äußerer Partikelfilter und beseitigen außerdem unverbrannte Gase. Auf diese Weise werden Verschmutzungen der Zelle verhindert, die sonst zu instabilen Messergebnissen führen können.

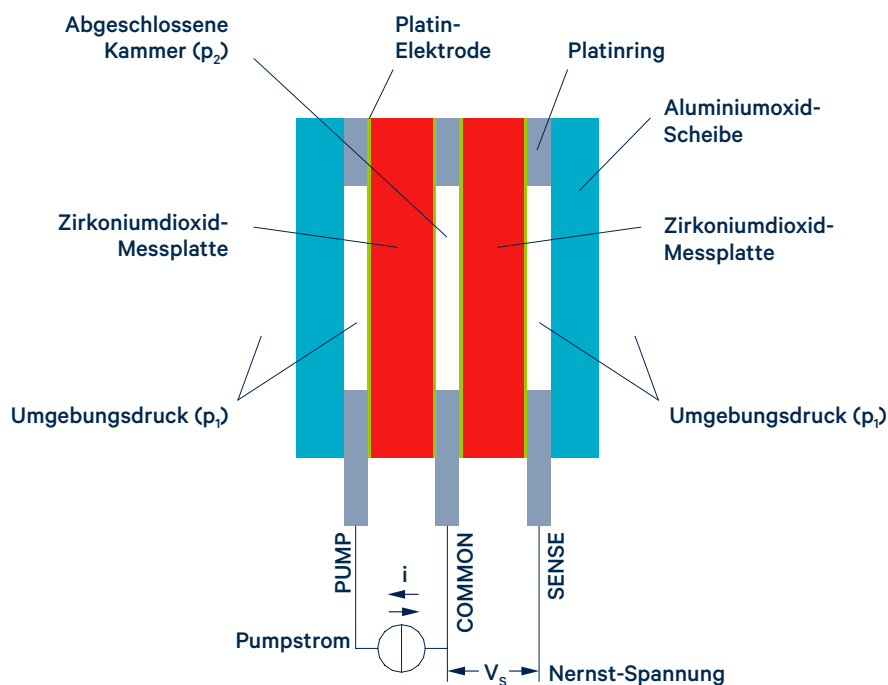


Bild 2.1: Sensoraufbau

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

Das gesamte XYA-Sensorelement wird von einer Heizwendel umgeben, die für die zum Betrieb nötige Temperatur des  $ZrO_2$  sorgt (in Bild 2.1 nicht gezeigt). First Sensors XYA-Serie verwendet zusätzlich eine äußere Kappe aus porösem Edelstahl, um den Sensor vor Verschmutzung und Beschädigung zu schützen. Informationen zur Querempfindlichkeit der XYA-Sensoren mit anderen Gasen finden sich in Kapitel 4.

## 2.2 Pumpelement

Mit der angeschlossenen umkehrbaren Stromquelle wird das Sauerstoffvolumen in der mittleren Kammer ( $p_2$ ) reguliert. Die Sauerstoffionen wandern je nach Polarität der angelegten Spannung von einer Elektrode zur anderen und verändern somit die Konzentration und damit den Druck  $p_2$  in der Kammer. Diese wird solange evakuiert bzw. gefüllt, bis die Messspannung  $V_s$  (Nernst-Spannung) einen bestimmten Referenzwert erreicht.

## 2.3 Messelement

Wie in Abschnitt 1.2. erläutert, entsteht die so genannte Nernst-Spannung, wenn an den Grenzflächen eines Elektrolyts eine Ionenart (hier Sauerstoffionen) in unterschiedlicher Konzentration vorliegt. Dabei ist die Spannung umso größer, je größer der Unterschied im Konzentrationsverhältnis ist.

Die Spannung wird an den Platin-Elektroden der hinteren  $ZrO_2$ -Platte abgegriffen und mit zwei Referenzspannungen  $V_1$  und  $V_5$  verglichen (Bild 2.2). Erreicht die Spannung einen dieser Werte, wird die Richtung des Pumpstroms umgekehrt und somit die andere Grenzspannung angefahren.  $V_1$  ist dabei die Spannung für den höchsten,  $V_5$  die Spannung für den niedrigsten Sauerstoffdruck, der in der Kammer durch den Pumpvorgang erreicht wird.

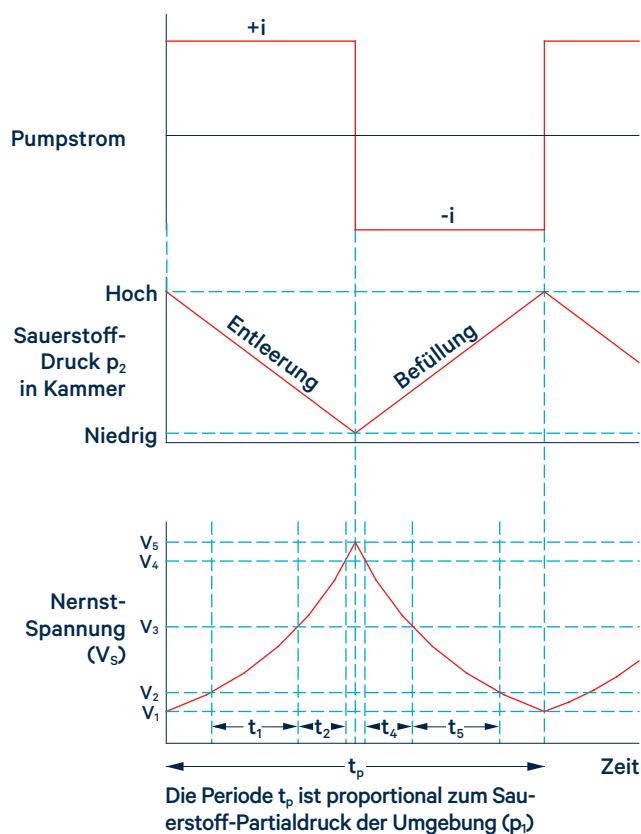
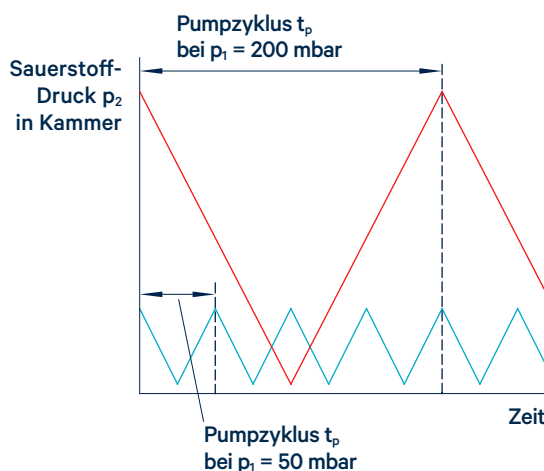


Bild 2.2: Messspannung in Abhängigkeit vom Sauerstoffdruck  $p_2$  in der Kammer

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 3. Messung

Abhängig vom Sauerstoffpartialdruck des zu messenden Gasgemisches verändert sich die Dauer eines Pumpzyklus. Je höher der Sauerstoffdruck der Messumgebung ist, desto länger braucht die Ionenpumpe, um die Messkammer einmal zu evakuieren und wieder zu befüllen (siehe Bild 3). Der Pumpzyklus ist also ein Maß für den Partialdruck des den Sensor umgebenden Sauerstoffs. Die Zykluszeit entspricht dabei der Periodendauer der Nernst-Spannung  $t_p$  (siehe Bild 2.2).



### 3.1 Praktische Umsetzung

Theoretisch können für die Referenzspannungen  $V_1$  und  $V_5$  beliebige Werte gewählt werden. In der Praxis müssen aber folgende Punkte beachtet werden:

#### Elektrische Doppelschicht

Ein Teil des Pumpstroms trägt nicht zur Befüllung/Entleerung der Kammer bei. Stattdessen werden diese Ladungen durch elektrische Doppelschichten an der Phasengrenze zwischen Elektrode (Platin) und Elektrolyt ( $ZrO_2$ ) absorbiert. Dieser Effekt tritt vor allem an den Umkehrpunkten der Pumpquelle und bei größerer Druckdifferenz zwischen Umgebung und Kammer in Erscheinung. Daher werden die zu messenden Nernst-Spannungen entfernt von den Umkehrspannungen  $V_1$  und  $V_5$  gewählt (siehe  $V_2$ ,  $V_3$  und  $V_4$  in Bild 2.2). Außerdem sollte der Druck in der Kammer nur 1-10 % vom Umgebungsdruck abweichen.

Bild 3: Abhängigkeit des Pumpzyklus vom zu messenden Sauerstoffpartialdruck der Umgebung

#### Reaktionszeit

Da sich die Dauer des Pumpzyklus mit steigendem Sauerstoffpartialdruck der Umgebung ( $p_2$ ) verlängert, sollten bei hohem Druck die Referenzspannungen  $V_1$  und  $V_5$  nahe beieinander liegen um eine schnelle Reaktionszeit des Sensors zu ermöglichen.

#### Temperaturkompensation

Die Nernst-Spannung ist temperaturabhängig (siehe Formel (6)). Allerdings kann unter bestimmten Betriebsbedingungen das Temperaturverhalten von Nernst-Gleichung und allgemeiner Gasgleichung so kombiniert werden, dass die Temperaturabhängigkeit größtenteils

kompensiert wird. Die Temperaturabhängigkeit ist wiederum an den Umkehrpunkten der Pumpe am größten. Durch Messung der Nernst-Spannung an den Punkten  $V_2$ ,  $V_3$  und  $V_4$  kann daher der Temperaturkoeffizient TC auf nahezu Null gebracht werden.

Bei Betrieb in diesem TC=0-Modus werden die Zeiten gemessen bis die Nernst-Spannung die Werte  $V_2$ ,  $V_3$  und  $V_4$  erreicht (siehe  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_4$  und  $t_5$  in Bild 2.2). Die neue Zyklusdauer  $t_d$  wird dann wie folgt berechnet:

$$t_d = (t_1 - t_2) + (t_5 - t_4) \quad (7)$$

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

Die Zyklusdauer  $t_d$  verhält sich linear zum Sauerstoff-Umgebungsdruck und startet im Gegensatz zu  $t_p$  im Nullpunkt des Zykluszeit/Druck-Diagramms. Dadurch kann die Kalibrierung (Verstärkung) des Sensors anhand eines einzelnen Punktes an beliebiger Stelle auf der Kennlinie vorgenommen werden. Würde man die Periodendauer  $t_p$  messen, wäre eine Zweipunktkalibrierung zur Einstellung der Verstärkung und zur Korrektur der Nullpunktverschiebung nötig.

## Empfindlichkeit

Die Empfindlichkeit ist definiert als die Periodendauer ( $t_d$  oder  $t_p$  in Millisekunden) geteilt durch den bekannten Sauerstoffpartialdruck ( $p_{O_2}$  in mbar) der Atmosphäre während der Kalibrierung.

Bei Berechnung von  $t_d$  (Einpunktkalibrierung) ist die Empfindlichkeit definiert als:

$$\text{Empfindlichkeit} = \frac{t_d}{p_{O_2}} \quad (8)$$

Bei Berechnung von  $t_p$  (Zweipunktkalibrierung) ist die Empfindlichkeit definiert als:

$$\text{Empfindlichkeit} = \frac{t_p - \text{Offset}}{p_{O_2}} \quad (9)$$

Die Empfindlichkeit ist typ.  $t_d=1,05$  ms/mbar. Wegen verschiedener Faktoren, die die Empfindlichkeit beeinflussen wie z.B. die Größe der Kammer und die Dicke der  $ZrO_2$ -Platten, kommt es zu einer Produktionstoleranz von  $\pm 15$  %. Eine Kalibrierung der Sensoren ist daher unerlässlich.

## 3.2 Empfohlene elektrische Werte

Wird der Sensor zur Messung von Sauerstoffpartialdruck von ca. 1...1000 mbar (0,1...100 % bei typischem Luftdruck) benutzt, werden die folgenden elektrischen Werte empfohlen:

### $t_d$ ( $T_C=0$ -Modus)

Konstantstromquelle:  $i=40 \mu A$   
Umkehrspannungen Pumpe:  $V_1=40$  mV,  $V_5=90$  mV  
Messspannungen:  $V_2=45$  mV,  $V_3=64$  mV,  $V_4=85$  mV

### $t_p$ (einfacher Pumpzyklus)

Konstantstromquelle:  $i=40 \mu A$   
Umkehrspannungen Pumpe:  $V_1=25$  mV,  $V_5=115$  mV

Soll der Sensor höhere  $O_2$ -Drücke messen, können auf Anfrage andere elektrische Werte empfohlen werden.

Wegen der oben genannten Vorteile des  $T_C=0$ -Modus ist dies die empfohlene Betriebsart. Der Pumpzyklus  $t_p$  sollte nur für einfache Anwendungen genutzt werden, bei denen eine hohe Genauigkeit nicht unbedingt erforderlich ist.

## 3.3 Kalibrierung

First Sensors XYA-Sauerstoffsensoren messen nicht direkt die Sauerstoffkonzentration (% Vol.) sondern den Partialdruck des Sauerstoffs. Nach dem Dalton-Gesetz (siehe Kapitel 1.1) lässt sich der Volumenanteil des Sauerstoffs jedoch leicht berechnen, wenn der Gesamtdruck der Umgebung bekannt ist.

Soll ein relativer Sauerstoffgehalt ermittelt werden, müssen die Sensoren der XYA-Serie mit einem bekannten Sauerstoffgehalt in der tatsächlichen Messumgebung kalibriert werden. Handelt es sich bei der Messumgebung z.B. um

normale Umgebungsluft (Atmosphäre) mit typischer Luftfeuchtigkeit, kann dessen bekannter Sauerstoffgehalt von 20,7 % Vol. (nicht 20,95 %, gilt nur für trockene Luft) zur Kalibrierung genutzt werden. Um Schwankungen des Luftdrucks auszugleichen, sollte die Kalibrierung regelmäßig wiederholt werden. Es wird die tägliche Neukalibrierung empfohlen. Durch eine Neukalibrierung wird auch jede Abweichung des Messsignals (Drift), die während der ersten Betriebsstunden des Sensors auftreten kann, zurückgesetzt.

First Sensors Auswerteelektroniken (ZBXYA-, ZBXYAF-Serie) bieten Sauerstoffmessbereiche von 0...25 % Vol. oder 0...100 % Vol. Die Kalibrierung kann automatisch in Umgebungsluft oder manuell bei bekannter Sauerstoffkonzentration erfolgen.

### Typischer Ablauf der Kalibrierung:

1. XYA-Sensor befindet sich in Gas mit bekanntem Sauerstoffgehalt, z.B. in Umgebungsluft mit 20,7 % Vol.
2. Sensor heizt sich auf Betriebstemperatur auf (ca. 100 s).
3. Pumpzyklus beginnt.
4. Sensor wird 5-10 min. bei Betriebstemperatur betrieben um sich vollständig zu stabilisieren.
5. Der Pumpzyklus ( $t_d$  oder  $t_p$ ) wird berechnet. Dabei wird über mindestens 10 Zyklen (je mehr desto besser) gemittelt um Rauschen auszufiltern.
6. Das Ergebnis wird dem bekannten Sauerstoffgehalt (z.B. 20,7 % Vol. für Luft) zugeordnet. Wurde  $t_d$  berechnet ist die Kalibrierung jetzt abgeschlossen.
7. Wurde  $t_p$  berechnet wird empfohlen eine zweite Kalibrierung bei einem niedrigeren Sauerstoffgehalt durchzuführen um die Genauigkeit zu verbessern und die Nullpunktabweichung zu beseitigen.

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 3.4 Signalabweichung und Burn-in

Während der ersten 200 Betriebsstunden kann das Ausgangssignal des Sensors um bis zu  $\pm 3\%$  driften. Die Gründe dafür sind:

1. Verunreinigungen im Zirkoniumdioxid wandern zur Verbindung mit der Platinelektrode wodurch sich die katalytischen Eigenschaften verändern
2. Alterung des Heizelements
3. Reflexionen an der Edelstahlkappe lassen nach weil die Innenseite oxidiert

Eine Neukalibrierung des Sensors beseitigt diese anfänglichen Abweichungen des Ausgangssignals. Ist eine regelmäßige Kalibrierung jedoch nicht möglich und soll trotzdem sichergestellt werden, dass das Sensorsignal stabil ist bevor der Sensor in der Anwendung eingesetzt wird, besteht die Möglichkeit des aktiven Burn-in's.

Aktives Burn-in erfordert den Betrieb des Sensors in einer Umgebung mit bekanntem Sauerstoffpartialdruck ( $ppO_2$ ). Ist dies z.B. Umgebungsluft, müssen alle meteorologischen Daten aufgezeichnet werden um den tatsächlichen  $ppO_2$ -Wert zu berechnen (siehe Abschnitt 1.1, Beispiel 2). Mit bekanntem Sauerstoffpartialdruck kann das Sensorausgangssignal ( $t_d$  oder  $t_p$ ) nach Gleichung 8 bzw. 9 normiert werden. Ist die Empfindlichkeit bzw. Kennlinie des Sensors auf diese Weise bekannt, kann eine

Veränderung des Sensorsignals der anfänglichen Sensor drift zugeordnet werden. Welches Maß an Signalstabilität benötigt wird hängt dabei von den Anforderungen der Anwendung ab. Allgemein kann bei einer Veränderung der Empfindlichkeit von weniger als  $\pm 0,2\%$  in den letzten 48 h von einem stabilen Sensorsignal gesprochen werden.

Für das aktive Burn-in empfiehlt First Sensor Messintervalle von 12 h bei konstanter Umgebungstemperatur.

## 3.5 Kompensation von Luftdruckschwankungen

Ist eine regelmäßige Kalibrierung des Sensors in Umgebungsluft nicht möglich, kann ein Drucksensor in Kombination mit dem XYA-Sauerstoffsensor zur automatischen Kompensation von Schwankungen des Luftdrucks benutzt werden. Die Berechnung ist sehr einfach, da sich das XYA-Ausgangssignal im gleichen Verhältnis wie der Luftdruck ändert (1 % Luftdruckänderung = 1 % Signaländerung).

Idealerweise sollte die Kalibrierung des Sauerstoffsensors in Kombination mit einem Drucksensor erst nach einer Betriebsdauer von 200 h erfolgen wenn sich das Ausgangssignal stabilisiert hat wie in Abschnitt 3.4. beschrieben.

### Typischer Ablauf der Kalibrierung mit Drucksensor:

1. XYA-Sensor befindet sich in Gas mit bekanntem Sauerstoffgehalt, z.B. in Umgebungsluft mit 20,7 % Vol.
2. Sensor heizt sich auf Betriebstemperatur auf (ca. 100 s).
3. Pumpzyklus beginnt.
4. Sensor wird 5-10 min. bei Betriebstemperatur betrieben um sich zu vollständig zu stabilisieren.
5. Der Pumpzyklus ( $t_d$  oder  $t_p$ ) wird berechnet. Dabei wird über mindestens 10 Zyklen (je mehr desto besser) gemittelt um Rauschen auszufiltern.
6. Das Ergebnis wird dem bekannten Sauerstoffgehalt (z.B. 20,7 % Vol. für Luft) zugeordnet.
7. Der aktuelle Luftdruck wird gespeichert.

Bei sich veränderndem Luftdruck kann jetzt aus den Messwerten des Sauerstoff- und des Drucksensors die druckkompensierte Sauerstoffkonzentration ermittelt werden:

$$O_{2\text{ komp}} = O_{2\text{ akt}} \cdot \left( \frac{p_{\text{kal}}}{p_{\text{akt}}} \right) \quad (10)$$

### Beispiel:

Der  $O_2$ -Sensor ist auf 20,7 % Sauerstoff bei 1000 mbar Umgebungsdruck kalibriert. Am nächsten Tag hat sich der Luftdruck um 1 % auf 990 mbar geändert. Ohne Kompensation gibt der XYA-Sensor einen Messwert von 20,493 % aus. Mit Gleichung 10 lässt sich der druckkompensierte Wert errechnen:

$$O_{2\text{ komp}} = 20,493\% \cdot \left( \frac{1000\text{mbar}}{990\text{mbar}} \right) = 20,7\%$$



# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 4. Querempfindlichkeit

Die XYA-Sensoren messen den Sauerstoffpartialdruck wie oben beschrieben. Bei bestimmten anderen Gasen und Stoffen kann es zu einer Querempfindlichkeit kommen, die einen Einfluss auf das Messergebnis und die Lebensdauer der Sensoren hat. Die Sensoren wurden vor allem zur Überwachung von Brennern entwickelt. Die Lebensdauer wurde daher in Abgasen von Gasbrennern und Brennern für leichtes Öl sowie in Laborumgebungen getestet.

### 4.1 Brennbare Gase

Kleine Mengen brennbarer Gase werden an den heißen Oberflächen der Platin-Elektroden bzw. der äußeren Aluminiumoxid-Scheiben verbrannt. Bei der Verbrennung wird Sauerstoff verbraucht. Die XYA-Sensoren messen nur den verbleibenden Sauerstoff, was zu einem Messfehler führt. Der Sensor ist daher für sehr genaue Messungen in Anwendungen mit größeren Mengen brennbarer Gase nicht geeignet.

Folgende Gase wurden untersucht (stöchiometrische Verbrennung):

- Wasserstoff ( $H_2$ ) bis zu 2 %
- Kohlenmonoxid (CO) bis zu 2 %
- Methan ( $CH_4$ ) bis zu 2.5 %
- Ammoniak ( $NH_3$ ) bis zu 1500 ppm

### 4.2 Schwermetalle

Dampf von Metallen wie Zink (Zn), Cadmium (Cd), Blei (Pb) und Wismut (Bi) hat einen Einfluss auf die katalytischen Eigenschaften der Platin-Elektroden. Der Kontakt des Sensors mit diesem Dämpfen sollte daher vermieden werden.

### 4.3 Halogene und Schwefelverbindungen

Kleine Mengen (< 100 ppm) von Halogenen und Schwefelverbindungen haben keinen Einfluss auf die Funktion des Sensors. Bei größeren Mengen kommt es jedoch mit der Zeit zu Messfehlern und Korrosion (vor allem bei Kondensation auf dem Sensor). Es wurden folgende Gase untersucht:

- Halogene, Fluorgas ( $F_2$ ), Chlorgas ( $Cl_2$ )
- Chlorwasserstoff (HCL), Fluorwasserstoff (HF)
- Schwefeldioxid ( $SO_2$ )
- Schwefelwasserstoff ( $H_2S$ )
- FCKW's, H-FCKW's
- Kohlenstoffdisulfid ( $CS_2$ )

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 5. Weitere Hinweise

### 5.1 Ausfallsicherung

Ein Hauptvorteil des dynamischen Messprinzips der XYA-Sauerstoffsensoren ist die Möglichkeit, einen Störfall schnell und sicher zu erkennen. Der kontinuierliche Pumpzyklus und die damit verbundene Änderung der Nernst-Spannung ist so etwas wie der Herzschlag des Sensors und kann z.B. mittels eines externen Mikroprozessors leicht überwacht werden.

### 5.2 Sensor-Asymmetrie

Zeigt die vom Sensor erzeugte Nernst-Spannung eine Symmetrie wie in Bild 2.2 dargestellt, ist dies ein klares Anzeichen für volle Funktionsfähigkeit. Ein asymmetrischer Verlauf der Messspannung kann die folgenden Ursachen haben:

1. Die Spannung für die Heizwendel ist zu niedrig.
2. Der Sensor ist verunreinigt und pumpt nicht mehr fehlerfrei.
3. Die abgeschlossene Kammer hat ein Leck, d.h. es ist schwieriger, sie zu evakuieren als zu befüllen.
4. Das Sensorelement hat sich kapazitiv aufgeladen.

Während der Berechnung des Pumpzyklus  $t_d$  bzw.  $t_p$  kann auch die Asymmetrie wie folgt berechnet werden:

$$\text{Asymmetrie} = \frac{(t_1 + t_2)}{(t_5 + t_4)} \quad (11)$$

Das Ergebnis sollte im besten Fall 1 sein. Produktionsbedingt hat die Asymmetrie eine Toleranz von  $\pm 2,5\%$  (0,975 bis 1,025).

### 5.3 Einsatz in hoher Luftfeuchtigkeit

Wird der XYA-Sauerstoffsensor in warmen und feuchten Umgebungen eingesetzt, ist es wichtig, dass der Sensor eine höhere Temperatur als das zu messende Gas besitzt, besonders dann, wenn darin korrosive Stoffe enthalten sind. Im Betrieb ist dies kein Problem, da die Heizwendel um das Sensorelement eine Temperatur von typ. 700 °C erreicht. Beim Beenden der Anwendung muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Sensor-Heizung als Letztes abgeschaltet wird, da es sonst zu Kondensation an der Heizwendel und am Sensorelement kommt. Beim Wiedereinschalten des Sensors würde die Kondensflüssigkeit dann verdunsten und schädliche korrosive Salze hinterlassen. In sehr feuchten Umgebungen ist es am besten den Sensoren bei normaler Betriebsspannung oder im Standby (2 V) weiterzubetreiben.

### 5.4 Schutz vor Wassertropfen

In Anwendungen, in denen es vorkommen kann, dass Wassertropfen auf das sehr heiße Sensorgehäuse fallen, sollte der Sensor z.B. durch eine Schutzkappe oder eine zusätzliche Einhausung geschützt werden, da es sonst zu starken Temperaturschocks in der Heizwendel und im Sensorelement kommt. Ist dies nicht möglich, sollte der XYA-Sensor zumindest mit der Spitze nach unten montiert werden, so dass die Wassertropfen abgelenkt werden und sich das Sensorelement nicht mit Wasser füllen kann.

### 5.5 Silikon (Gummi, Plastik)

Die XYA-Sensoren werden wie alle zirkoniumdioxid-basierten Sensoren durch Silikon im zu messenden Gas beschädigt. Die wesentlichen Verursacher sind ausgasende Gummi- und Plastikteile aus Silikon-kautschuk, die in vielen Anwendungen zum Einsatz kommen. Wenn der Silikondampf den Sensor erreicht, verbrennen die organischen Elemente an den heißen Sensorelementen und hinterlassen eine feine Schicht aus Siliziumdioxid, die den Sensor verstopft. Wenn in der Anwendung Teile aus Silikonkautschuk zum Einsatz kommen, sollte auf qualitativ hochwertige und ausgehärtete Materialien geachtet werden.

### 5.6 Reduzierende Atmosphären

Der Sensor benötigt zum Betrieb wenigstens geringe Mengen Sauerstoff. Ist überhaupt kein Sauerstoff in der Umgebung vorhanden, versucht der Sensor die Sauerstoffionen der Zirkoniumdioxidplatte zu verschieben. Dies beschädigt das  $ZrO_2$ -Element und beeinträchtigt die Leistungsfähigkeit des Sensors. Daher sollte der Sensor auf keinen Fall für längere Zeit in Umgebungen mit weniger als 1 mbar Sauerstoffpartialdruck betrieben werden, vor allem nicht in reduzierenden Atmosphären.

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 6. Auswertelektronik

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Bestandteile zum Aufbau einer eigenen Auswertelektronik. Weiterhin können First Sensors Auswerteschaltungen zur Signalaufbereitung und Steuerung des Sensors genutzt werden.

### 6.1 Heizelement

Der Sensor benötigt eine Spannung von 4,35 VDC zur Versorgung des Heizelements, um die nötige Betriebstemperatur des Zirkoniumdioxids zu erreichen. Es sollte sichergestellt werden, dass die erforderliche Spannung so nah wie möglich am Sensor gemessen wird, da es durch den hohen Strombedarf des niederohmigen Heizelements zu erheblichen Spannungsabfällen an Leitungen und Anschlüssen kommt. Die einstellbare Spannungsversorgung sollte rauscharm sein und mindestens 2 A Strom liefern können.

### 6.2 Spannungsregelung der Auswerteeinheit

Die Spannungsregelung erzeugt und überwacht die Versorgungsspannung für die Auswertelektronik.

### 6.3 Einschaltverzögerung

Das Zirkoniumdioxidelement ist erst bei Temperaturen über 650 °C betriebsbereit. Unterhalb dieser Temperatur ist der Widerstand sehr hoch. Bei einem Start des Pumpvorgangs zu diesem Zeitpunkt würde die Stromquelle die Spannung immer weiter erhöhen, um den entsprechenden Konstantstromwert zu erreichen, und damit den Sensor beschädigen. Der Effekt ist ähnlich dem

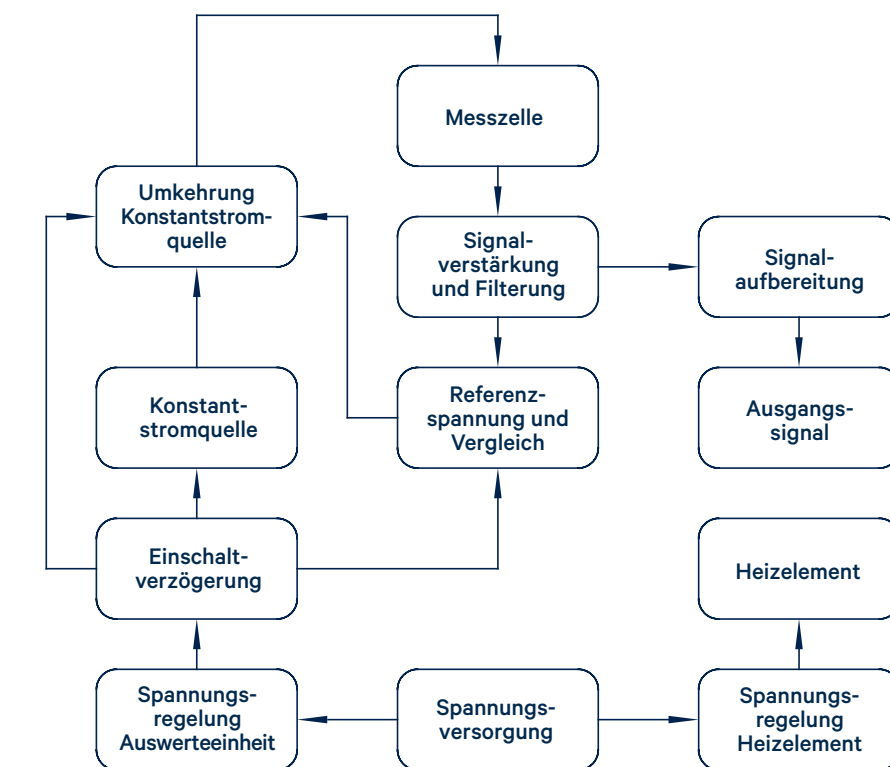


Bild 6: Blockdiagramm einer Auswertelektronik

unter Punkt 5.6 beschriebenen Betrieb des Sensors in Umgebungen ohne Sauerstoff.

Daher wird empfohlen, das Heizelement wenigstens 60 s aufzuwärmen, bevor die Sensorsteuerung in Betrieb genommen wird. Diese Einschaltverzögerung wird meist über Software realisiert, es ist aber auch eine Hardwarelösung möglich.

### 6.4 Konstantstromquelle

Zur Versorgung des Pumpelements wird eine Konstantstromquelle mit typ. 40 µA zwischen den Anschlüssen PUMP und COMMON benötigt. Empfohlen wird ein entsprechend beschalteter Operationsverstärker. Ein Widerstand und die Referenzspannung bestimmen den Stromwert wobei die Sensorzelle als veränderbarer Widerstand im Regelkreis wirkt.

# Funktionsprinzip und Aufbau von XYA-Zirkoniumdioxid-Sauerstoffsensoren

## 6.5 Umkehrung der Konstantstromquelle

Die Richtung der Konstantstromquelle muss sich umkehren können, sobald die obere oder untere Referenzspannung erreicht ist. Hierfür können analoge Schalter genutzt werden.

## 6.6 Signalverstärkung und Filterung

Da die Nernst-Spannung nur im mV-Bereich liegt, ist es sinnvoll diese vor der weiteren Auswertung zu verstärken. Der Eingangswiderstand des Verstärkers sollte dabei so groß wie möglich sein, um eine Belastung des Sensors zu vermeiden und seine Offset-Spannung sollte kleiner als 0,5 V sein. Das Rauschen des verstärkten Signals kann mit einem Tiefpass mit einer Grenzfrequenz von ca. 250 Hz ausgefiltert werden. Es ist wichtig, nicht die mV-Nernst-Spannung auszufiltern, da auch dies den Sensor belasten kann. Um Gleichtaktstörungen zu verbessern können die Eingangsklemmen des Verstärkers über eine Kapazität (10 nF) verbunden werden.

## 6.7 Referenzspannung und Spannungsvergleich

Das verstärkte Messsignal wird mit den Umkehrspannungen verglichen, die deshalb mit dem gleichen Faktor verstärkt werden müssen wie das Nernst-Signal. Wird eine der beiden Umkehrspannungen erreicht, muss die Konstantstromquelle ihre Richtung wechseln. Das Pumpelement sollte so betrieben werden, dass die Kammer immer zuerst evakuiert wird. Dafür muss der PUMP-Anschluss des Sensors zuerst positiv im Verhältnis zum COMMON-Anschluss sein.

## 6.8 Signalaufbereitung

Ein entsprechender Mikrocontroller wird benötigt um die verstärkte Nernst-Spannung (SENSE) zu überwachen und fortlaufend  $t_d$  bzw.  $t_p$  zu berechnen. Durch eine Mittelwertbildung kann das natürliche Sensorrauschen reduziert werden, wobei bei der Berechnung die für die Anwendung erforderliche Reaktionszeit des Sensors berücksichtigt werden muss. Ein adaptiver Filter ist die beste Lösung um die Mittelwertbildung flexibel anpassen zu können.

## 6.9 Ausgangssignal

Die vom Mikrocontroller berechnete Zyklusdauer muss anschließend in das gewünschte Ausgangssignal (z.B. in ein Spannungs-, Strom- oder serielles Signal) umgewandelt werden. Hierzu kann ein D/A-Wandler und Ausgangstreiber nötig sein. Außerdem sollten Filterung und Auflösung des Signals beachtet werden.

### Hinweis:

Weitere Informationen zum Aufbau einer eigenen Auswerteelektronik finden sich im englischen Anwendungshinweis "[Designing Interface Electronics for Zirconium Dioxide Oxygen Sensors of the XYA Series](#)". Bitte wenden Sie sich an First Sensor.