

Sauerstoffmessung in Tauchgeräten

Der Sauerstoff- und der Stickstoffpartialdruck sind für den Taucher die entscheidenden Parameter für die maximale Tauchtiefe, die Berechnung der Dekompressionszeiten und der Pausenzeiten. Bei herkömmlichen Preßlufttauchgeräten ist die Gaszusammensetzung für den Taucher oder den Tauchcomputer bekannt. Bei Kreislaufgeräten besteht die Möglichkeit, verschiedene Gaszusammensetzungen zu verwenden (Heliox-, Trimix- oder Nitroxgemische), und der Sauerstoffanteil ist zudem von der Arbeitsleistung des Tauchers abhängig. Die Messung des Sauerstoffs zur Kontrolle der Partialdruckgrenzen wäre eine zusätzliche Sicherheit bei Tauchgängen mit Kreislaufgeräten.

Eine bekannte Methode für die Messung von Sauerstoff ist die Ausnutzung seines paramagnetischen Verhaltens. Sauerstoff wird in ein Magnetfeld hineingezogen und verdrängt dabei eine federnd aufgehängte Glaskugel. Die Stärke der Verdrängung wird gemessen und in den entsprechenden Partialdruck umgerechnet.

Eine weitere Möglichkeit ist die Ausnutzung des unterschiedlichen Wärmeleitverhaltens zweier Gase. Ein Draht wird mit einem konstanten Strom erwärmt und das zu messende Gas daran vorbeigeleitet. Je nach Gaszusammensetzung stellt sich eine andere Temperatur an diesem Draht ein. Die Methode kann aber nur bei binären Gasgemischen und großen Unterschieden in den Wärmeleitwerten eingesetzt werden.

Optische Sensoren nutzen die unterschiedlichen Absorptionsspektren verschiedener Gase aus. Dabei wird die Absorption bei einer für das Gas charakteristischen Wellenlänge gemessen und einer Konzentration zugeordnet.

Alle drei Sensorarten benötigen relativ viel elektrische Energie und sind zudem auch teurer im Vergleich zum elektrochemischen O₂-Sensor. Dieser Sensor ist eine vom O₂-Partialdruck abhängige Stromquelle und wird in der Medizintechnik seit über 20 Jahren zur Überwachung des Sauerstoffanteils in Atemgasen eingesetzt. Er benötigt keine Stromversorgung und ist sehr robust.

Sauerstoffmoleküle diffundieren durch eine dünne Membran und werden an einer Goldkathode reduziert. Die dafür benötigten Elektronen werden durch Oxidation von Blei zur Verfügung gestellt. Je größer der O₂-Partialdruck im Atemgas ist, desto mehr Elektronen diffundieren durch die Membran und werden am Goldblech reduziert. Der vom Sensor gelieferte Strom wird größer. Der Sensorstrom wird mit einem Widerstand in eine Spannung gewandelt und von einer Elektronik gemessen. Die Höhe der Spannung ist ein Maß für den O₂-Partialdruck des zu messenden Gases. Ein Nachteil dieses Sensorprinzips ist die Temperaturabhängigkeit. Steigt die Temperatur, steigt auch das Sensorsignal. Dieses unerwünschte Verhalten wird durch Widerstände kompensiert, die ein exakt inverses Temperaturverhalten besitzen. Die beiden Temperaturkennlinien heben sich gegenseitig auf und eine temperaturunabhängige Sauerstoffmessung ist möglich. Dabei ist es sehr wichtig, daß die für das Temperaturverhalten verantwortliche Diffusionsmembran

des Sensors und der temperaturabhängige Widerstand der gleichen Temperatur ausgesetzt sind. Bei einigen auf dem Markt befindlichen Sensoren ist dieser Widerstand im Innern des Sensors untergebracht. Die Kompensationsergebnisse dieser Sensoren sind sehr gut, solange die Temperatur des zu messenden Gases mit der Sensortemperatur übereinstimmt. In einem Kreislauf-Tauchgerät können diese Temperaturen jedoch voneinander abweichen. Das Sensorgehäuse wird, wie die meisten im Tauchgerät verwendeten Metalle oder Kunststoffe, die Wassertemperatur annehmen. Die Gastemperatur im Atembeutel wird sich jedoch aufgrund der Wärmeentwicklung des Kalkabsorbers von der Sensortemperatur unterscheiden. Die Folge ist ein Meßfehler des Sensors, der bis zu 10 % betragen kann.

Zu diesem statischen Kompensationsfehler addiert sich ein zusätzlicher dynamischer Kompensationsfehler. Auf plötzliche Temperaturänderungen reagieren der Sensor und der temperaturabhängige Widerstand unterschiedlich schnell und es kommt zu unakzeptablen Fehlmessung, die so lange anhalten, bis sich ein statischer Zustand eingestellt hat. Die Höhe dieses Fehlers wird von den unterschiedlichen Reaktionszeiten des Widerstandes und des Sensors auf diese Temperaturänderung bestimmt und von der Geschwindigkeit der Temperaturänderung. Der Fehler kann bis zu $\pm 20\%$ betragen. Diese plötzlichen Temperaturänderungen können z.B. auftreten, wenn der Taucher bei warmen Lufttemperaturen in kaltes Wasser eintaucht. Man kann diesem Fehler aber mit einer zusätzlichen Temperaturmessung und einer geeigneten Mathematik begegnen. Bei dieser Vorgehensweise ist es jedoch unumgänglich, daß der Sensor und die Software des Meßcomputers exakt an das jeweilige Tauchgerät angepaßt ist. Eine sehr gute Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Partnern ist dafür erforderlich.

Da der O₂-Sensor eine begrenzte Lebensdauer hat (Der Sensor verbraucht sich ähnlich wie eine Batterie), muß vor jedem Tauchgang ein Funktionstest durchgeführt und der Sensor neu kalibriert werden. Für den Kalibriervorgang wird der Sensor einem bekannten Gasgemisch ausgesetzt. Im einfachsten Fall könnte die Umgebungsluft dafür verwendet werden, besser ist jedoch die Verwendung von reinem Sauerstoff zur Verringerung des Linearitätsfehlers. Für eine genaue Bestimmung des O₂-Partialdrucks ist eine Luftdruckmessung zur weiteren Verringerung des Fehlers vorteilhaft. Da die Kennlinie des Sensors durch den Nullpunkt verläuft (Der Sensor hat nur einen sehr geringen Offsetfehler), ist der erforderliche zweite Punkt für eine Zwei-Punkt- Kalibrierung durch den Nullpunkt gegeben. Die für die Kalibrierung notwendige Bedienungsführung und Überwachung durch den Meßcomputer muß mit dem Sensorhersteller abgestimmt sein. Selbst bei den harten Umweltbedingungen in der Taucherei soll der O₂-Sensor seine Meßeigenschaften über die gesamte Lebensdauer beibehalten. Die vielen Druckwechsel und die damit verbundene mögliche Bläschenbildung im Sensor dürfen dem Sensor genausowenig schaden wie Kondensationswasser oder Korrosion an elektrischen Kontakten. Die Bläschenbildung im Sensor hat die gleiche Ursache wie die im

menschlichen Körper. Während des Tauchgangs diffundiert aufgrund des hohen Partialdruckunterschiedes das Inertgas (N₂, He) in den Sensor und wird in der sich darin befindenen Flüssigkeit gelöst. Das Inertgas reichert sich langsam an. An der Oberfläche diffundiert aufgrund des geringeren Partialdruckunterschiedes in der gleichen Zeit aber weniger hinaus. Werden viele Tauchgänge in kurzer Zeit unternommen, reichert sich das Inertgas im Sensor immer weiter an. Ist die Sättigung erreicht, beginnt die Blasenbildung. Dieser Vorgang kann unter Umständen erst nach einer Vielzahl von Tauchgängen auftreten und muß deshalb in Langzeittests untersucht werden. Das Sensorverhalten bei Helium- und Stickstoffbegasung ist hierbei unterschiedlich. Sind Blasen im Sensor vorhanden, können sie entscheidend das Meßverhalten des Sensors verändern.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle ist die Kondenswasserbildung auf der sensitiven Fläche des Sensors. Ist die Membran mit Wassertropfen belegt, ändern sich die Diffusionsverhältnisse für den Sauerstoff hin zum Kathodenblech. Eine Änderung des Meßsignals ist die Folge.

Soll die Sauerstoffmessung lediglich als zusätzliche Warneinrichtung für Partialdruckgrenzen in einem als sonstigen System eingesetzt werden, genügt ein Sensor für diesen Zweck. Wird die Sauerstoffmessung jedoch sicherheitsrelevant, z.B. für Dekompressionszeitenberechnung, ist auf jeden Fall ein redundantes System erforderlich. Die auf dem Markt befindlichen Doppelkathodensensoren genügen für ein redundantes Messen jedoch nicht. Bei diesen Sensoren wird an zwei voneinander getrennten Kathodenblechen der Sauerstoff reduziert und das Meßsignal getrennt herausgeführt. Erhebliche Teile des Sensors sind jedoch nur einfach ausgelegt. Der Meßcomputer vergleicht in einem redundanten System die Sauerstoffwerte zweier oder mehrerer Sensoren und ermittelt, ob die Messungen übereinstimmen. Im Fehlerfall muß der Taucher gewarnt und sicher an die Wasseroberfläche geleitet werden. Die Anzahl der redundanten Meßsysteme hängt von der Wichtigkeit ihrer Aussage ab. Wirklich sicherheitsrelevante Aussagen können sicherlich erst mit drei voneinander unabhängigen Meßsystemen gemacht werden. Eine Plausibilitätsprüfung mit anderen Größen (z.B. Tiefe) ist darüberhinaus bestimmt hilfreich.

Das Drägerwerk setzt O₂-Sensoren in vielen verschiedenen Bereichen der Medizin- und Sicherheitstechnik erfolgreich ein. Erfahrungen mit Gassensoren auf diesem neuen Gebiet müssen erst noch gesammelt werden. Dafür sind simulierte Tauchgänge in Druckkammern genauso notwendig wie Feldtests unter kontrollierten Bedingungen und das über die gesamte Lebensdauer des Sensors. Die dabei gesammelten Erkenntnisse ergeben eine Aussage über die Qualität des Sensors und fließen in die Weiterentwicklung mit ein. Diese Vorgehensweise ist sehr zeitintensiv und erfordert auch hier eine gute Zusammenarbeit zwischen allen beteiligten Partnern. Sie ist aber absolut notwendig für einen qualitativ hochwertigen Sensor.

Für die Überprüfung des im Gerät befindlichen Atemkalks ist eine CO₂- Messung grundsätzlich möglich, eine Erneuerung des Atemkalks vor jedem Tauchgang ist aus Sicherheitsgründen dennoch notwendig. Grundsätzlich gilt für solch einen Sensor das gleiche wie für den oben beschriebenen O₂-Sensor. Der Sensor muß exakt auf die Bedürfnisse und die Randbedingungen in der Tauchtechnik angepaßt werden. Für eine sicherheitsrelevante Aussage ist auch hier redundantes Messen absolut notwendig. Die Prozedur des Kalibrierens ist bei einem elektrochemischen CO₂- Sensor etwas aufwendiger als bei einem O₂-Sensor. Aufgrund einer höheren Drift ist eine Zwei-Punkt-Kalibrierung notwendig. An CO₂ freier Luft wird zuerst der Nullpunkt (Offset) bestimmt. In einem zweiten Schritt wird der Sensor dann mit einem Prüfgas begast (z.B. 5% CO₂ in Luft). Beide Werte müssen von dem Meßcomputer aufgenommen werden, der dann die Sensorwerte in vernünftige Meßwerte umsetzt.

Diese elektrochemischen Gassensoren haben in herkömmlichen Anwendungen eine Lebensdauer von ein bis zwei Jahren, bei Preisen um 450 DM für einen Sensor. Die Lebensdauer bei Anwendungen im Tauchbereich ist aufgrund der sehr viel höheren Belastungen auf jeden Fall geringer. Eine absolute Aussage können erst Langzeiterfahrungen liefern, realistisch erscheinen mir 6 - 12 Monate.

Der Einsatz von Gas-Sensoren in Tauchgeräten ist sicherlich sehr reizvoll. Die Überwachung von Partialdruckgrenzen oder sogar die tiefenabhängige Gasgemischregelung, bei der die Arbeitsleistung des Tauchers mit berücksichtigt wird, scheint mit dem Einsatz von Sensorik in Zukunft zumindest möglich.

Uns ist kein geeigneter O₂-Sensor aus der herkömmlichen Produktion sowohl im Drägerwerk als auch bei anderen marktführenden Unternehmen bekannt. Wir haben dieses Know-how, wissen aber, daß die Entwicklung eines solchen Sensors noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird.

Dipl. Ing. Ulrich Schmidt
Sensor development
Drägerwerk AG, Lübeck