

Funktionsweise von Sauerstoffsensoren und daraus resultierende Austauschstrategien beim Nutzen von Kreislaufgeräten

Paul Raymaekers

18/10/2010

Übersetzung: W. Jocham, U. Herold

- 1) Zusammensetzung eines Sauerstoffsensors?
 - elektrochemischer Teil (galvanische Zelle)
 - elektronischer Teil (Platine und Temperatursausgleich)
 - Zusammenfassung
- 2) Der „perfekte“ Sauerstoffsensor
- 3) Der “beinahe perfekte” Sauerstoffsensor (perfekter Sensor mit begrenzter Lebenszeit)
- 4) Reale Sauerstoffsensoren und ihre Ausfallarten
 - Typ 1 : Strombegrenzung
 - Typ 2 : schlechte Produktionsserie
 - Typ 3 : plötzlicher Ausfall, hoher Stromausstoß, unterschiedlicher Stromausstoß.
- 5) Kombination der Ausfallarten: die “Unbekannten”
- 6) Simulation verschiedener Austauschstrategien von Sensoren und deren Ergebnisse
- 7) Generelle Empfehlungen für den Gebrauch von Sauerstoffsensoren
- 8) Anmerkungen

Haftungsausschluss:

Manche Darstellungen in diesem Artikel sind nur für ein besseres Verständnis abgebildet und stellen keine korrekten Werte dar.

Der Autor übernimmt keinerlei Haftung für Schäden, die durch Verwendung der Information dieses Artikels entstehen könnten. Letztenendes ist es der Kreislaufgerätetaucher selbst, der entscheidet, wann er welche Sensoren in seinem Gerät tauscht.

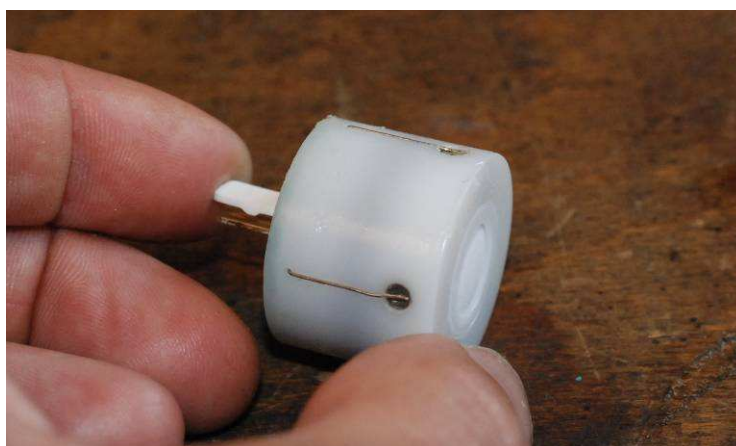
1) Zusammensetzung eines Sauerstoffsensors?

Zur Veranschaulichung der Funktionsweise eines Sauerstoffsensors werden wir einen neuen Sensor zerlegen und uns seine einzelnen Teile genauer betrachten.

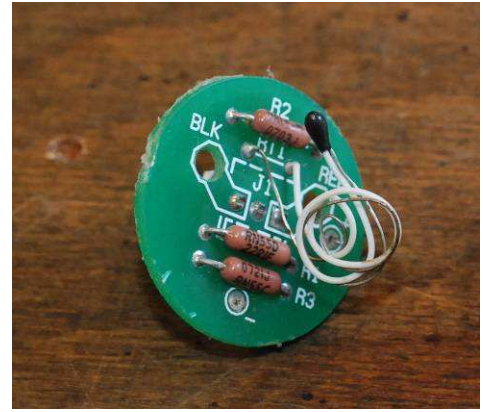
Warnung: Bitte nicht nachmachen! Ein Sauerstoffsensor ist mit gefährlichen Flüssigkeiten gefüllt, die bei Kontakt zu Schäden / Verbrennungen der Haut führen können. Es ist dringend davon abzuraten einen, Sauerstoffsensor zu zerlegen!



Links sieht man einen kompletten Sauerstoffsensor rechts sein Innenleben, nachdem die Plastikhülle entfernt wurde. Bei dem inneren Bauteil sieht man oben einen Stecker (männlicher Molex Stecker, andere Sensoren benützen manchmal auch andere Stecker), der auf einer Platine sitzt. Darunter befindet sich die galvanische Zelle von der zwei Kabel zur Platine laufen.



Auf der Unterseite der Zelle befindet sich eine weiße Membrane: Dort findet der Kontakt mit Sauerstoff statt.



Wenn man die Platine entfernt, bemerkt man sofort die elektronischen Komponenten an der Unterseite. In der galvanischen Zelle (elektrochemischer Teil) sieht man eine flexible Membrane, die eine Flüssigkeit mit mehreren Elektroden darin abdeckt.

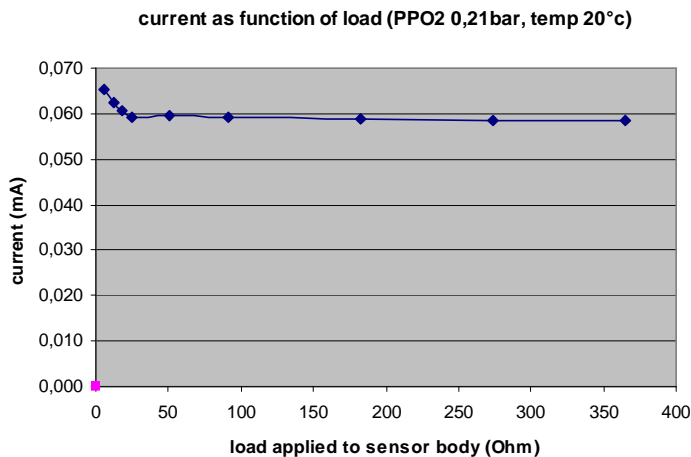
Betrachten wir diese beiden Teile einmal näher.

Teil 1: der elektrochemische Teil des Sensors (galvanische Zelle)

Um zu sehen, wie sich dieser Teil verhält, machen wir damit ein paar Tests.

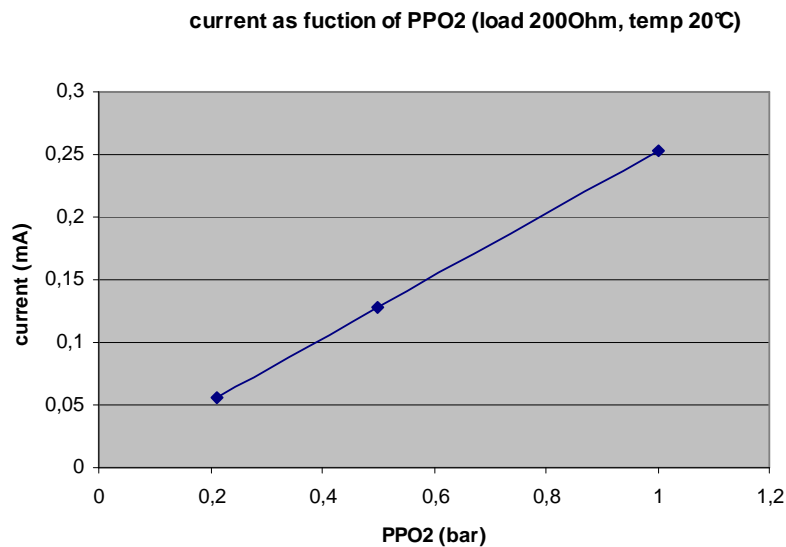
Wir setzen den Sensor 3 verschiedenen Parametern aus: PPO₂, Temperatur und Last. Jedes Mal verändern wir einen Parameter, während die anderen 2 konstant bleiben und messen die Stromstärke die von der Zelle abgegeben wird.

A: Stromstärke, die von der galvanischen Zelle abgegeben wird in Abhängigkeit der Last, während PPO₂ (0,21 Bar) und Temperatur (20°C) gleich bleiben.



Wir sehen, dass selbst wenn die Last (der Widerstand) breitgefächert (von 20 Ohm bis >500 Ohm) gewechselt wird, sich die Stromstärke, die von der Zelle abgegeben wird, kaum verändert. Dieser erste Test zeigt uns, dass der elektrochemische Teil eine Stromquelle (keine Spannungsquelle) ist. Das heißt, er versucht Strom abzugeben unabhängig vom gegebenen Widerstand. (später noch mehr dazu, doch hier zeigt sich bereits, weshalb wir von einer Strombegrenzung (englisch: current-limiting) sprechen, und nicht von einer Spannungsbegrenzung)

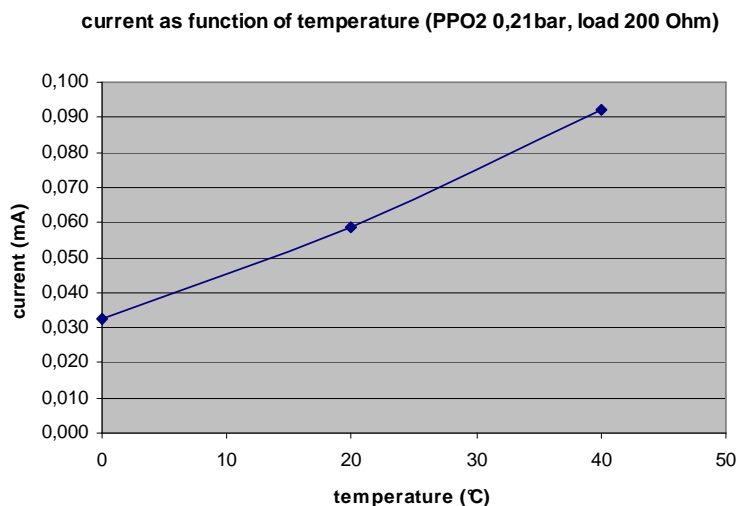
B: Stromstärke, die von der galvanischen Zelle abgegeben wird in Abhängigkeit des PPO2, während die Last (200 Ohm) und die Temperatur (20°C) gleich bleiben



Hier kann man erkennen, dass beim Ansteigen des Sauerstoffpartialdrucks (der mit der Membrane der Zelle in Kontakt ist), die Stromabgabe des Sensors auch ansteigt und das fast linear mit dem PPO2: wenn der PPO2 Null ist, ist auch der Strom Null!

Somit wissen wir, dass wenn eine gleichbleibende Last am Sensor anliegt und wir dort die Stromstärke messen, der Messwert direkt proportional zu dem PPO2 ist der auf den Sensor wirkt...

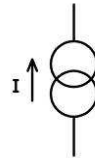
C: Stromstärke, die von der galvanischen Zelle abgegeben wird in Abhängigkeit von Temperatur, während die Last (200 Ohm) und der PPO2 (0,21 Bar) gleich bleiben



Hier bemerken wir einen Anstieg der Stromausgabe des Sensors bei ansteigender Temperatur, welcher nicht linear mit der Temperatur verläuft. Dieses Verhalten ist äußerst unerwünscht bei einem Bauteil, was uns nur den PPO2 messen soll, da die Temperatur das Ergebnis deutlich beeinflusst.

Zusammenfassung: Die Analyse des elektrochemischen Teil bzw. der galvanischen Zelle eines Sauerstoffsensors ergab, dass es sich hierbei um eine Stromquelle und keine Spannungsquelle handelt. Die Stromquelle ist unabhängig von der anliegenden Last, fast perfekt linear zum PPO₂ dem der Sensor ausgesetzt ist aber stark von der Temperatur beeinflusst. Um diesen Sensor beim Tauchen gebrauchen zu können, müssen wir entweder die Temperatur kontrollieren oder aber die unterschiedliche Stromausgabe bei Temperaturschwankungen kompensieren.

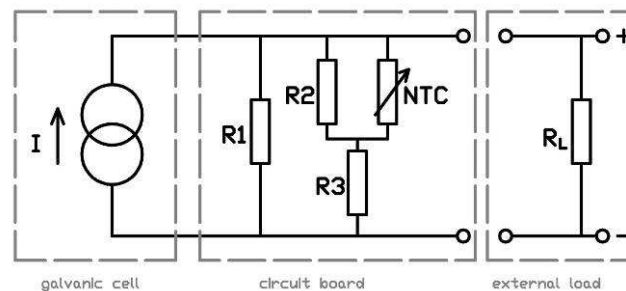
Anmerkung: das Symbol für eine Stromquelle ist:



Teil 2: Elektronischer Teil (Platine und Temperatursausgleich)

Bei näherer Betrachtung der Platine finden wir ein Netzwerk von Widerständen: Es besteht aus 3 normalen und einem temperaturabhängigen Widerstand, auch Thermistor oder NTC (Negativ Temperature Coefficient) genannt: Der Widerstand (XX Ohm) wird geringer wenn die Temperatur zunimmt!

Schematisch lässt sich der Aufbau eines Sauerstoffsensors wie unten abgebildet darstellen: (manche Sensoren sind unter Umständen anders zusammengestellt, zur weiteren Erklärung folgen wir aber diesem Aufbau)



Links in der Schematik, sehen wir die galvanische Zelle (die Stromquelle), die wir im ersten Teil schon angeschaut haben. In der Mitte befindet sich die Platine und rechts, der Vollständigkeit halber, der „externe Widerstand“.

Hier eine Zusammenfassung:

A: Ohne komplizierte Rechnungen anzustellen (brauchen wir hier nicht), kann man bei genauerer Betrachtung der Platine (die 3 Widerstände und den NTC) erkennen, dass bei steigender Temperatur der gesamte Widerstand des Netzwerks **abnehmen** wird (da der Widerstand des NTC bei zunehmender Temperatur abnimmt).

B: Wir wissen bereits, dass die Stromstärke die von der Zelle produziert wird unabhängig von der Last ist (der Ausstoß der galvanischen Zelle wird sich bei unterschiedlicher Last nicht ändern).

C: Wir haben auch gesehen, dass die von der galvanischen Zelle produzierte Stromstärke (I) **zunimmt**, wenn die Temperatur zunimmt.

D: Ohms Gesetz ($U=R \times I$) gibt vor, dass die Spannung durch ein Netzwerk an Widerständen das Produkt aus Widerstand mal Stromstärke ergibt.

Das Resultat ist: Bei der korrekten Wahl des Widerstandnetzwerkes, in diesem Fall ein Temperaturkompensierendes, wird die am Ende gemessene Spannung selbst bei Temperaturschwankungen gleich bleiben. Dazu muss der Anstieg der Stromstärke (I) bei höheren Temperaturen durch den Widerstand (R) exakt kompensiert werden, damit das Produkt aus I und R sich nicht verändert (bei gleichbleibendem PPO₂).

Anmerkung: Denke daran, dass der gesamte Widerstand ein Resultat aus den Widerständen auf der Platine, dem NTC sowie dem „externen Widerstand“ R_L ist.

Genau so wird der Temperatureinfluss bei Sauerstoffsensoren kompensiert. Das funktioniert aber nur, weil der Sensor selber eine Stromquelle ist und die Stromstärke durch ein sich anpassendes Netz aus Widerständen geschickt wird, so dass am Ende die gemessene Spannung unabhängig von der Temperatur ist.

Typische Widerstandswerte von diesen Netzwerken liegen bei 100 – 200 Ohm.

In der schematischen Darstellung hast du den „externe Widerstand“ gesehen, der normalerweise außerhalb des Sensors angebracht wird: Warum wird er aber nicht einfach auf der Platine integriert? Weshalb brauchen wir einen externe Widerstand?

Ganz einfach: Da wir nicht direkt am Molexstecker des Sensors den PPO₂ messen, sondern erst ein Stück davon entfernt, nämlich am Computer oder unserer PPO₂-Anzeige. Das heißt, dass wir ein Kabel zwischen dem Sensor und der Messelektronik haben. Um äußere Einflüsse auf unser Messergebnis (z.B. Strahlung) so gering wie möglich zu halten, (auch Rauschen genannt) wird einfach ein geringerer Stromfluss durch das Kabel zu unserer Elektronik geschickt. Dazu wird am Ende des Kabels ein Widerstand eingebaut (normaler Wert des externen Widerstands R_L ist 10 kOhm, oder 10.000 Ohm).

Das Widerstandnetzwerk ist also so gewählt, dass es die bestmögliche Temperatur-Kompensation ermöglicht wenn der Wert des externen Widerstands, der durch den Sensor-Hersteller vorgegeben ist, auf den Sensor angewandt wird.

Wenn man sich jetzt die Werte des internen Widerstandnetzwerkes (gesamte Belastung von 100 – 200 Ohm) und den des externen Widerstands (10.000 Ohm) anschaut, sieht man sofort, dass 98 – 99% des Stroms, der von der galvanischen Zelle geliefert wird, durch das interne Widerstandsnetzwerk geht und nur ein sehr kleiner Teil durch das externe.

Somit können wir schon mal einen Mythos klären:

Den Sensor vom externen Widerstand (10 kOhm) abzustecken, verlängert die Lebenszeit nicht, da der Grossteil des Stroms im internen Netzwerk verbraucht wird und die galvanische Zelle nicht aufhört Strom zu produzieren (der unabhängig von der Last ist!).

Zusammenfassung:

Ein Sauerstoffsensor ist eine Kombination aus einem elektrochemischen Teil (Stromquelle / galvanischen Zelle) und einer Platine (temperaturkompensierendes Widerstandnetzwerk), die sind so aufeinander abgestimmt, dass man als Resultat eine Ausgangsspannung erhält, die fast perfekt linear zum PPO₂ liegt, sofern der richtige „externe Widerstand“ anliegt.

2) Der „perfekte Sensor“:

Zu Beginn der folgenden Diskussion gehen wir davon aus, dass wir einen „perfekten Sensor“ zur Verfügung haben. Dieser Sensor würde immer dieselbe Spannung liefern, wäre perfekt linear und proportional zum PPO₂ des umgebenden Gases und unabhängig von Temperaturunterschieden, Luftfeuchtigkeit oder anderen Einflüssen. Das hieße, dass man den Sensor nur einmal - beim Einbau - kalibrieren müsste. Man müsste ihn nie austauschen, da seine Lebensdauer unendlich wäre. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Sensor in einem bestimmten Monat nach der Produktion ausfiele wäre gleich Null!

Wie viele von diesen Sensoren würde man in einem Kreislaufgerät brauchen? Theoretisch nur einen, aber...

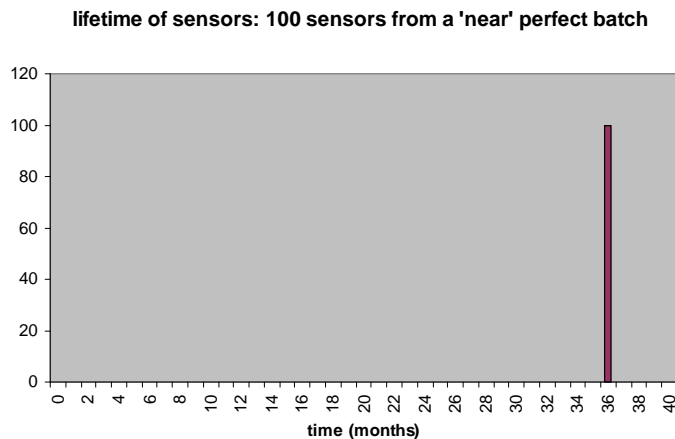
Wir können an dieser Stelle leider nicht davon ausgehen, dass wir perfekte Steckverbindungen oder perfekte Elektronik zur Verfügung haben, die uns den Wert von unserem „perfekten Sensor“ anzeigen. Um also feststellen zu können, dass etwas außerhalb unseres Sensors nicht funktioniert brauchen wir mindestens zwei Sensoren, am besten an 2 voneinander unabhängigen Anzeigen (um anhand zweier verschiedener Werte zu sehen, dass etwas nicht passt). Für ein höheres Maß an Sicherheit, und um ein automatisches Auswahlsystem zu unterstützen (englisch: Voting logic) bräuchten wir mindestens 3 Sensoren (das ist aber ein anderes Kapitel☺).

Unglücklicherweise gibt es den „perfekten Sensor“ nicht...

3) Der „beinahe perfekte Sensor“

Der „beinahe perfekte Sensor“ ist eigentlich nichts anders als ein „perfekter Sensor“ mit einem Unterschied: der Sensor hat eine genau bekannte Lebenszeit, sagen wir 36 Monate. Das Ende der Lebenszeit ist so definiert, dass sich der Sensor dann nicht mehr „perfekt“ verhält. Das bedeutet, dass er auf irgendeine Art ausfällt (zuviel, zuwenig, variierende, limitierte, etc. Spannung liefert). Wie der Sensor am Ende ausfällt, ist uns egal. Wir müssen nur wissen, dass der Sensor nach 36 Monaten nicht mehr funktioniert.

Die Wahrscheinlichkeit das der „beinahe perfekte Sensor“ ausfällt kann man anhand folgenden Grafik zeigen:



Die Grafik ist das Resultat eines Tests mit 100 imaginären Sensoren und zeigt uns, nach wie vielen Monaten die Sensoren sich nicht mehr „perfekt“ verhalten: wie man sieht fallen alle Sensoren 36 Monate nach ihrer Produktion aus!

Angenommen wir WISSEN, dass wir “beinahe perfekte Sensoren” in unserem Kreislaufgerät haben. Wann müssten wir den Sensor (2, 3 oder mehr) austauschen?

Für diesen Fall wüssten wir, dass sich alle Sensoren bis zum Alter von 35 Monaten perfekt verhalten und im Alter von 36 Monaten auf irgendeine Weise ausfallen: kurz bevor die Sensoren also das Alter von 36 Monaten erreichen, ersetzen wir alle durch neue und können für 35 Monate fortfahren...

Einfach oder? Leider existiert aber auch dieser “beinahe perfekte Sensor” nicht...

Deswegen befassen wir uns jetzt mit den “realen Sensoren”.

4) Reale Sensoren und ihre Ausfallsarten

Wir werden unseren Blick jetzt auf verschiedene Ausfallsarten von „realen Sensoren“ richten.

- Wodurch werden sie verursacht
- Resultat und Risiken eines Ausfalls
- Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls in Bezug auf Alter und Einsatzbereich

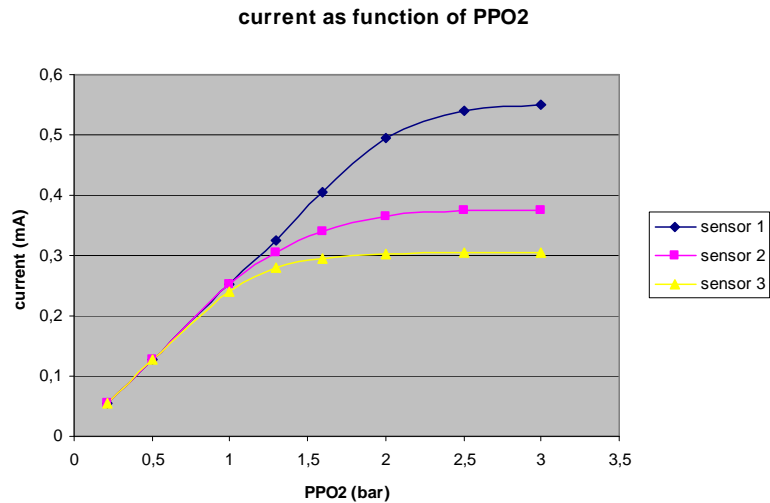
Wir definieren den Ausfall eines Sensors als Abweichung vom “perfekten Verhalten” in dem für Kreislaufgeräte wichtigen Bereich: Linearität bei einem PPO2 von 0,21 bis 1,6 Bar, Werte die über einen Zeitraum von mehreren Tagen nur ein paar % abweichen, und richtiger Spannungsbereich zur Kalibrierung der Elektronik, mit der sie verbunden sind.

A: Ausfalltyp 1: Strombegrenzung

Im ersten Kapitel haben wir gesehen, dass die galvanische Zelle des Sensors Strom liefert, der genau proportional und perfekt linear zum PPO2 ist. In dem Test sind wir aber nur bis zu einem PPO2 von 1 Bar gegangen. Was aber, wenn wir einen wesentlich höheren PPO2

haben? Wir werden sehen, dass dieses lineare Verhalten begrenzt ist. Der Strom wird nicht unendlich zunehmen.

Die folgende Grafik zeigt den Strom in Abhängigkeit des PPO2 bei 3 verschiedenen Sensoren:



Wenn wir auf Sensor 1 schauen, können wir erkennen, dass der Strom bis zu einem PPO2 von +/- 2 Bar linear zunimmt und die Kurve darüber hinaus abflacht: die galvanische Zelle kann nur bis zu einem begrenzten Bereich Strom liefern: wir sprechen dabei von der Strombegrenzung eines Sauerstoffsensors (es gibt also tatsächlich eine Obergrenze der Stromausgabe).

Fakt ist, dass jeder Sensor, selbst wenn er neu ist, nur begrenzt Strom abgeben kann. Da wir die Sensoren aber nur in einem bestimmten PPO2 Bereich benutzen (normalerweise unter 1,6 Bar), ist es egal, ob der Sensor bei einem PPO2 von 2 Bar „ausfällt“ oder falsche Werte anzeigt, solange er in dem PPO2 Bereich, der für uns wichtig ist, funktioniert (lineares Verhalten zeigt).

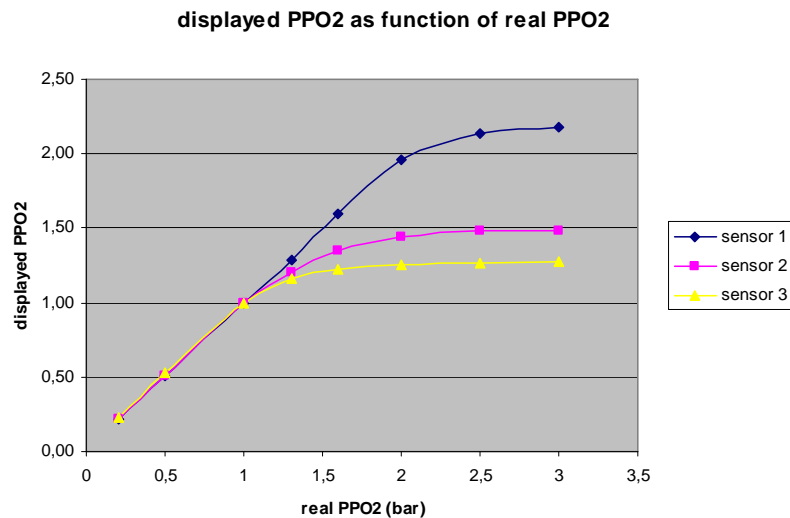
Beim Gebrauch in Kreislaufgeräten sagt man, dass ein Sensor von Strombegrenzung betroffen ist, wenn das Abflachen der Kurve bei einem Wert unter 1,6 Bar PPO2 beginnt.

Auf dieser Grundlage sehen wir bei Sensor 1 einen „perfekt“ arbeitenden Sensor, der uns eine Spannung liefert, die genau linear mit dem PPO2 ist (dadurch wissen wir, dass nach einer korrekt durchgeführten Kalibrierung und einer Anzeige von 1,3 Bar PPO2 unser PPO2 auch bei 1,3 Bar liegt und nicht darunter oder darüber).

Kurz zusammengefasst bedeutet dies: Solange das Abflachen der Kurve außerhalb des Bereichs liegt, in der ein Sensor benützt wird, ist dies kein Problem.

Was also ist das Problem der Strombegrenzung?

Um es einfach erklären zu können, schauen wir auf die folgende Grafik wo die Ausgangsspannung (ein direktes Ergebnis des Stroms) unserer 3 Sensoren in eine PPO2 Anzeige umgewandelt wird: Das, was uns die Elektronik nach der Kalibrierung anzeigt.



Jetzt betrachten wir Sensor Nummer 2: man kann erkennen, dass der Ausstoß des Sensors bis zu einem PPO2 von 1 Bar linear ist. Angenommen wir würden eine Kalibrierung mit reinem Sauerstoff (in Meereshöhe) durchführen und (fälschlicherweise) glauben, dass wir einen guten Sensor (Linearität bis 1,6 Bar PPO2) haben.

Welcher Wert wird bei einem PPO2 von 1,3 Bar angezeigt? Wird er 1,3 Mal höher liegen als das 1 Bar der Kalibrierung? Nein! Der Ausstoß wird geringer sein. Wenn man genau hinschaut, wird man erkennen, dass uns der Sensor +/- 1,22 Bar PPO2 anzeigt und bei einem echten PPO2 von 1,6 Bar, nur 1,35 Bar. Die Anzeige wird also geringer sein als der tatsächliche Wert. Dies ist nicht gut!

Wenden wir uns jetzt dem Sensor Nummer 3 zu.

Nach der Kalibrierung zeigt uns die Anzeige 1 Bar PPO2. Wenn ein höherer PPO2 vorhanden ist, wird ein Wert angezeigt der weit hinter dem tatsächlichen liegt. Bei einem tatsächlichen Wert von 1,3 bar werden nur 1,17 Bar angezeigt, bei 1,6 bar nur 1,23 Bar und selbst bei einem tatsächlichen Wert von 3 Bar werden nur 1,28 Bar PPO2 angezeigt...

Stell dir jetzt vor, dass du mit einem Kreislaufgerät tauchst, und du (oder dein elektronisches Kontrollsystem) auf der maximalen Tiefe auf den hohen Setpoint von 1,3 Bar PPO2 wechselst. Das Gerät wird anfangen reinen Sauerstoff zuzugeben, bis ein PPO2 von 1,3 Bar gemessen wird... Dieser wird aber nicht erreicht! Ganz egal wie viel Sauerstoff zugegeben wird, oder wie hoch der tatsächliche PPO2 ist, die Anzeige wird nie 1,3 erreichen!

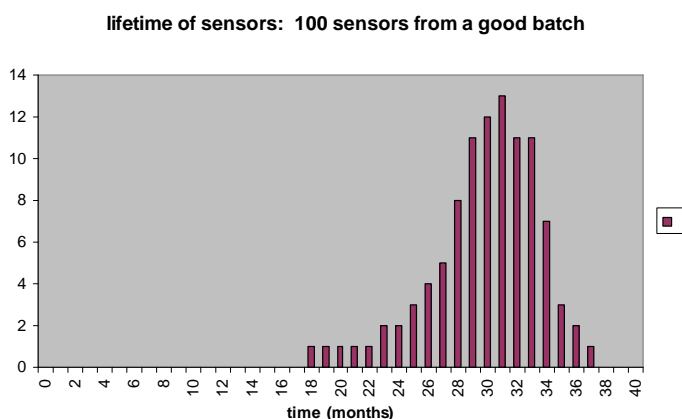
Hier liegt also die wirkliche Gefahr bei einem Sensor mit Strombegrenzung: Im Bereich über 1 Bar wird ein Wert angezeigt, der niedriger ist, als der tatsächliche PPO2 und der Taucher bemerkt es möglicherweise gar nicht (bei elektronisch gesteuerten Kreislaufgeräten liegt die Wahrscheinlichkeit höher).

Glücklicherweise werden mehr als nur ein Sensor in Kreislaufgeräten benutzt und jeder Taucher kann sie auf Strombegrenzung überprüfen, indem er das Gerät in einer bekannten Tiefe (6 – 7 Meter), mit reinem Sauerstoff spült. Die Wert auf der Anzeige sollte dann annähernd 1,6 Bar PPO2 betragen.

Warum aber gibt es Strombegrenzung bei Sauerstoffsensoren? Wenn ein Sensor ein hohes Alter erreicht hat, ist der Grossteil seines „Treibstoffs“ verbrannt und deshalb kann er keinen hohen Ausstoß an Strom erzeugen, sondern nur noch eine bestimmte maximale Menge. Diese maximale Menge an Strom nimmt ab, je älter der Sensor ist...

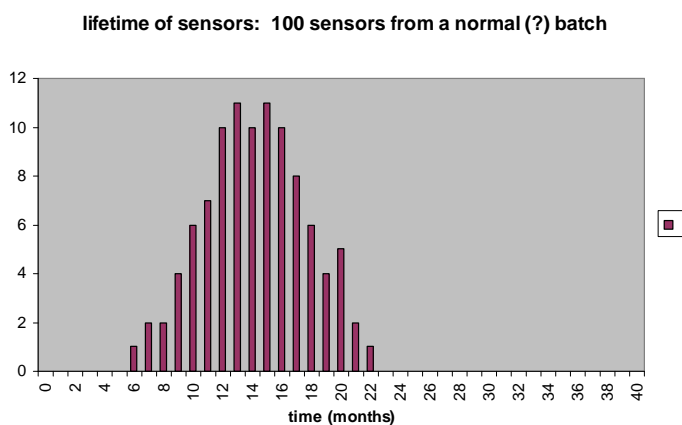
Es scheint also, dass Strombegrenzung vermehrt bei älteren Sensoren (nahe ihrer theoretischen Lebensdauer) auftritt, und somit die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls durch Strom-Begrenzung größer wird, je älter der Sensor ist.

Erfahrungswerte haben gezeigt, dass das durchschnittliche Alter, ab dem ein Sensor nur noch begrenzt Strom liefert, sehr stark von der Produktionsserie abhängt. Wir hatten schon Serien, bei denen > 95% der Sensoren erst nach einer Lebensdauer von 24 Monaten Anzeichen von Strombegrenzung zeigten. Diese nennen wir „gute“ Serien.



Wir hatten aber auch schon Produktionsserien bei denen die Sensoren nur eine durchschnittliche Lebensdauer von etwas 12 Monaten hatten...

Dies veranschaulicht in etwa die folgende Grafik:



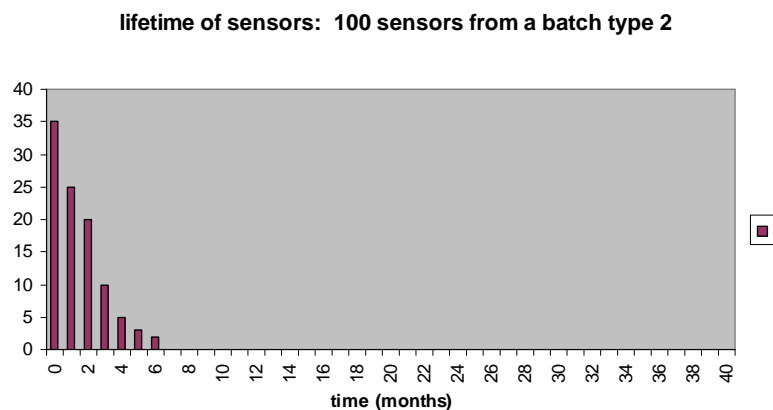
Mit diesem Wissen können wir uns schon mal der Frage “Wann sollen Sauerstoffsensoren in einem Kreislaufgerät gewechselt werden” zuwenden. Da wir nicht wissen, wann genau der Sensor ausfallen wird (es kommt stark auf die Produktionsserie an und wie der Sensor behandelt wird) können wir auch keine einfache Antwort geben.

Da Strombegrenzung dann auftritt, wenn viel von dem „Treibstoff“ der galvanischen Zelle verbrannt wurde, können wir auch davon ausgehen, dass die Lebensdauer eines Sensors von der Temperatur, in der er gelagert wird, abhängig ist: Im 1. Kapitel haben wir gelernt, dass die Strommenge, die von der galvanischen Zelle abgegeben wird, mit zunehmender Temperatur ansteigt. Das heißt, dass die Menge an Treibstoff, die verbrannt wird, mit der Temperatur zunimmt! (Grafik in Kapitel 1: bei 40°C doppelt so hoher Treibstoffverbrauch als bei 10°C)

Sei bitte nicht überrascht, dass sich Sensoren in kalten Ländern länger halten als in warmen...

B: Ausfalltyp 2: Schlechte Produktionsserie

Ein weiterer Erfahrungswert hat uns gezeigt, dass sich nicht alle Sensoren „nett“ verhalten, bis sie ein gewisses Alter erreicht haben. Die folgende Grafik zeigt die Lebensdauer von mehreren Produktionsserien die wir in den Jahren 2006/2007 erhalten haben.



Diese Darstellung zeigt eindeutig eine „schlechte Produktionsserie“, bei der die Sensoren ohne wirklichen Grund (außer einem internen???) ausfallen, sobald sie in einem Kreislaufgerät eingebaut sind.

Vielleicht war diese Produktionsserie auch nicht zum Tauchen geeignet sondern nur für 1 Bar Umgebungsdruck, sodass das häufige Erhöhen des Drucks einen dramatischen Einfluss auf die Lebensdauer der Sensoren hatte?

C: Ausfalltyp 3: Andere Ausfallarten

Ein paar weitere Ausfallarten werden in diesem Teil aufgelistet: Für diese Ausfälle scheint es keinen direkten Zusammenhang zwischen dem Alter und der Ausfallwahrscheinlichkeit des Sensors zu geben. Das heißt, die Balken der weiter oben gezeigten Grafiken würden über den gesamten Zeitraum immer gleich lang sein.

Plötzlicher Ausfall

Eine Art von Ausfall ist, dass der Ausstoß des Sensors plötzlich auf Null oder beinahe Null abfällt: dieser Ausfall wird nicht durch „Treibstoffmangel“ verursacht (so wie Strom-Begrenzung) und kann nicht vorhergesehen werden.

Gründe für so einen Ausfall können sein: Mechanische, lose Kabel, fehlerhafte Platine, Korrosion, ein Loch in der Membran, den Sensor auf einen harten Untergrund fallen lassen...

Hoher Ausstoß

Manchmal passiert es, dass die galvanische Zelle plötzlich viel mehr Strom produziert als normal (was zu einer höheren Spannung führt), manchmal sogar 5 – 10 Mal so hoch. Laut Angaben eines Sensorherstellers kann dies durch kleine Löcher in der Membran entstehen dort wo der Gasaustausch stattfindet, und dadurch wird mehr „Treibstoff“ als normal verbrannt.

Variierender Ausstoß

Wenn der Ausstoß des Sensors so schnell variiert, dass nach der Kalibrierung den angezeigten Werten nicht vertraut werden kann...

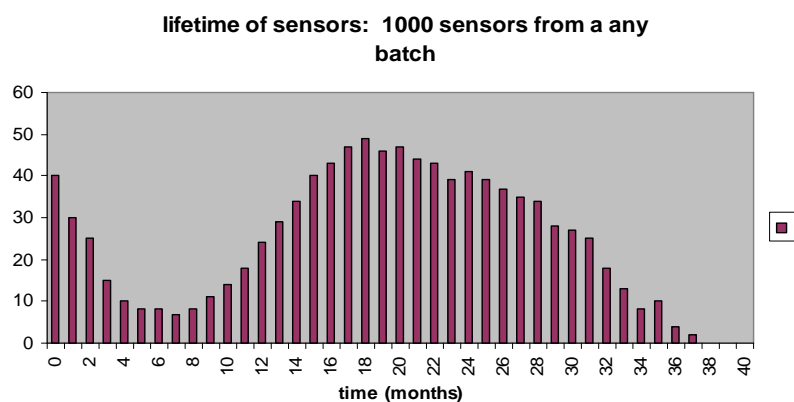
Die Erfahrung hat gezeigt, dass die letzten beiden Ausfalltypen (Typ 2 und 3) nicht so oft vorkommen. Der Ausfalltyp 1 hingegen ist die häufigste Art bei „guten Produktionsserien“, bei denen die durchschnittliche Lebensdauer oft über 24 Monaten liegt.

5) Kombination der Ausfallarten: die “Unbekannten”

Nachdem wir uns alle Ausfallarten in Kapitel 4 angesehen haben, ist es ersichtlich, weshalb es schwierig ist, die Lebensdauer eines Sensors hervorzusehen. Man wird nie genau wissen, wie die Qualität einer gewissen Produktionsserie ist und ob der Sensor, den man gerade in sein Kreislaufgerät einbaut zum Typ 1 oder doch eher zu Typ 2 oder 3 gehört...

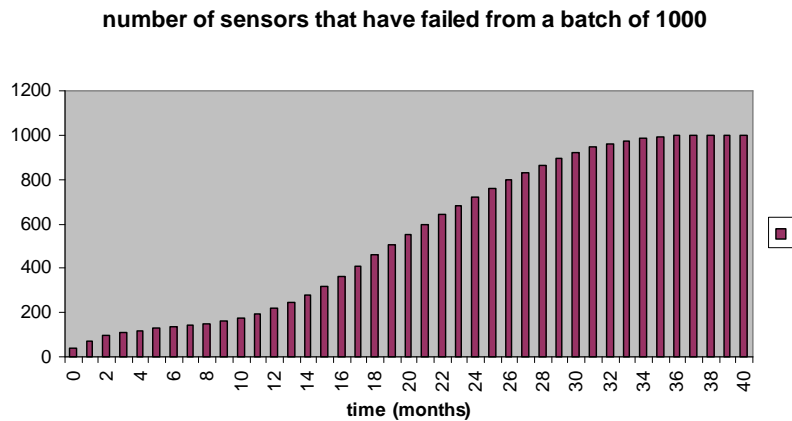
Das einzige, was wir bei neuen Sensoren machen können ist eine Einschätzung in Bezug auf die Erfahrungswerte.

Unsere beste Einschätzung der Lebensdauer von Sauerstoffsensoren sieht im Moment so aus:



Die hohe Kurve auf der linken Seite bezieht sich auf die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls durch die Verwendung von Sensoren des Typ 2 und die Kurve in der Mitte zeigt das normale Ausfallen durch Erreichen der maximalen Lebensdauer (Typ 1).

Die Kurve kann auch in unterschiedlicher Form dargestellt werden: als Kumulationswerte.



Diese Art von Grafik zeigt die Anzahl der Sensoren die vor einem gewissen Alter ausgefallen sind. Grundlage sind 1000 Sensoren.

Diese Grafik werden wir später auch für Computersimulationen verwenden, um die Lebensdauer von Sauerstoffsensoren zu schätzen: jedes Mal wenn wir einen Sensor in unser Gerät einbauen, lassen wir den Computer eine zufällige Zahl zwischen 1 und 1000 auswählen und durch die Grafik bekommen wir eine Lebenserwartung für genau diesen.

6) Simulation verschiedener Austauschstrategien von Sensoren und deren Ergebnisse:

Nachdem wir jetzt wissen wie Sensoren ausfallen, können wir versuchen, die beste Strategie für die Benutzung von Sensoren in Kreislaufgeräten zu finden (wann man sie am besten austauscht, wie viele man benutzt, etc.).

Um eine gute Strategie zu entwickeln, müssen wir zuerst bestimmen, welches Resultat wir uns erwarten bzw. welches Resultat wir absolut nicht wollen.

Bei ausreichender Redundanz ist es kein Problem, wenn ein einzelner Sensor während eines Tauchgangs ausfällt.

Das Schlimmste was uns aber passieren kann ist, dass alle Sensoren zugleich ausfallen. Insbesondere wenn sie alle dieselbe Ausfallart haben und man es dadurch nicht bemerkt... Ganz egal welche Sensorwechselstrategie wir uns aussuchen das darf nie passieren.

Das Zweitschlimmste wäre, dass der Grossteil der Sensoren zur selben Zeit auf dieselbe Art ausfällt, besonders in einem voll automatisierten Kreislaufgerät, da der Computer meistens die Werte für gut befindet, die ihm von den meisten Sensoren angezeigt werden (voting logic). Wenn 2 von 3 Sensoren ausfallen ist es in diesem Fall schlimmer als bei 2 von 4 oder bei 2 von 5 Sensoren (2 von 3 ist sogar schlimmer als 3 von 5; wir werden später noch sehen, dass die Möglichkeit, dass 3 von 5 Sensoren zur selben Zeit ausfallen sehr unwahrscheinlich ist, wobei 2 von 3 Sensoren jedoch zum Möglichen zählt).

Welche Sensorwechselstrategien wollen wir also testen (Simulieren):

P1: Die am weitesten verbreitete Standard Wechselstrategie: 3 Sensoren im System und nach 12 Monaten werden alle gegen neue ausgetauscht, damit man immer mit neuen Sensoren ins beginnende Tauchjahr startet. Diese Strategie werden wir auch mit 4 bzw. 5 Sensoren im System testen.

Anmerkung: Wenn wir alle 3 Sensoren zur selben Zeit austauschen, können wir die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls für die Sensoren nicht unserer „besten Einschätzung der Lebensdauer von Sauerstoffsensoren“ Grafik zugrunde legen (welche ja auf der Verwendung von verschiedenen Produktionsserien basiert) sondern nur den Grafiken von einzelnen Ausfall-Typen (1, 2 oder 3).

In diesem Fall wird man feststellen, dass wenn die Sensoren alle von derselben Produktions-Serie stammen das Herstellungsdatum von allen Sensoren auf einen spezifischen Zeitraum konzentriert ist und dieses die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Ausfalls erhöht.

Dies gilt umso mehr, aber noch nicht in diesen Vorhersagen, dass wenn die Sensoren exakt die gleiche Tauchgeschichte haben, die Wahrscheinlichkeit eines kompletten Sensorausfalls zur gleichen Zeit erhöht wird.

P2: Das genaue Gegenteil: 3, 4 oder 5 Sensoren im System und gewechselt wird jeder einzelne Sensor nur, nachdem er beim vorhergegangenen Tauchgang ausgefallen ist.

P3: Was rEvo schon seit einiger Zeit empfiehlt, „Sensoren rotieren“: Sobald der jüngste Sensor im System (3, 4 oder 5) ein Alter von 6 Monaten erreicht, wird der schwächste Sensor (der am langsamsten auf wechselnden PPO2 reagiert oder der am stärksten von Strom-Begrenzung betroffen ist) gegen einen neuen ausgewechselt. Sollten alle Sensoren noch gleich gut sein, wird der älteste durch einen neuen ersetzt. Sollte ein Sensor ausfallen bevor der „jüngste“ 6 Monate alt ist, muss er natürlich ersetzt werden und wird damit zum jüngsten Sensor im System.

Jetzt wo wir die verschiedenen Wechselstrategien mit 3, 4 oder 5 Sensoren ausgewählt haben, können wir ein paar Taucher bitten, jeweils einem bestimmten Szenario zu folgen und uns ihre Ergebnisse mitzuteilen. Um benutzbare Resultate zu erhalten bräuchten wir ein paar Millionen Tauchgänge... ☺

Glücklicherweise haben wir aber einen Computer der diese Strategien simulieren kann. Wie funktioniert das?

Für jede Strategie lassen wir den Computer eine Million aufeinanderfolgende Tauchgänge simulieren (jeweils mit 3, 4 oder 5 Sensoren). Wir gehen davon aus, dass wir jede Woche einen Tauchgang machen. Gestartet wird mit fabrikneuen Sensoren und jedes Mal, wenn ein Sensor ausgetauscht wird (egal ob am Anfang, weil einer ausgefallen ist, oder weil es Zeit zum Wechseln ist) wählt unser Computer in Bezug auf die Grafik mit den Kumulationswerten, per Zufallsprinzip eine Lebensdauer dafür aus. (für Wechselstrategie 1 wird per Zufallsprinzip derselbe Ausfalltyp für alle 3 Sensoren benutzt, für die anderen Szenarien wird aus der Grafik mit den verschiedenen Produktionsserien gewählt)

Als Ergebnis unserer Simulation erhalten wir die Werte, wie häufig **während eines Tauchgangs ein Sensor ausfällt**. Des Weiteren wissen wir wie viele Sensoren benötigt werden, um eine Million Tauchgänge durchzuführen (dadurch wissen wir zum Schluss wie viele Sensoren pro Jahr wir bei den verschiedenen Wechselstrategien benötigen).

Diese Tabelle zeigt das Resultat von 1.000.000 simulierten Tauchgängen:

	Sensoren im System	Insgesamt gebrauchte Sensoren	1 Ausfall	2 Ausfälle	3 Ausfälle	4 Ausfälle	5 Ausfälle	Sensoren pro Jahr
Strategie 1	3	73301	14542	524	7			3,81
	4	97936	18994	937	48	1		5,09
	5	121962	22448	1531	98	2	0	6,34
Strategie 2	3	39527	38499	511	2			2,06
	4	52733	50560	1070	11	0		2,74
	5	65816	62257	1745	23	0	0	3,42
Strategie 3	3	49627	23106	152	0			2,58
	4	59098	38140	527	4	0		3,07
	5	70205	52958	1095	6	1	0	3,65

Die erste Spalte zeigt die Anzahl Sensoren an, die in dem Kreislaufgerät benutzt werden. Die zweite Spalte zeigt die gesamte Anzahl Sensoren an, die in einer Million Tauchgängen bei der jeweiligen Sensorwechselstrategie verbraucht wurden. Die dritte Spalte zeigt an, wie oft es in einer Million Tauchgänge passiert ist, dass 1, 2 oder mehr Sensoren während des selben Tauchgangs ausgefallen sind. Man kann z. B. sehen, dass es bei keiner Strategie vorgekommen ist, dass 5 Sensoren während des selben Tauchgangs ausgefallen sind. Die letzte Spalte zeigt die durchschnittliche Anzahl Sensoren an die bei den jeweiligen Wechselstrategien pro Jahr gebraucht werden: den höchsten Verbrauch an Sensoren haben wir natürlich wenn wir 5 Sensoren in unserem Kreislaufgerät haben und alle jedes Jahr durch neue ersetzen. Wenn 3 Sensoren im Gerät sind und wir sie nur austauschen nachdem sie ausgefallen sind, brauchen wir die wenigsten Sensoren.... allerdings ist dies möglicherweise keine sichere Wahl ☹.

Bei näherer Betrachtung der Tabelle stellen wir Folgendes fest:

- Unabhängig von der Wechselstrategie ist es ausgesprochen selten, dass alle Sensoren zur selben Zeit ausfallen bzw. ist es bei einer geschickten Wechselstrategie ausgeschlossen. (Anmerkung: Diese Aussage stimmt natürlich nicht mehr, wenn man nur alle 3 Monate tauchen geht. In diesem Fall summieren sich die möglich Ausfallarten über einen längeren Zeitraum und dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls aller Sensoren zur selben Zeit. Ein Beispiel: wenn Wechselstrategie 2 angewendet wird und 5 Jahre wird nicht getaucht, dann werden beim nächsten Tauchgang alle Sensoren ausfallen! Man kann natürlich auch alle Sensoren durch andere Ursachen, wie z. B. Fluten des Kreislaufgerätes oder Ausfall der Elektronik, verlieren).

- je mehr Sensoren in einem Kreislaufgerät eingebaut sind, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit das der Grossteil von ihnen ausfällt: z. B. ist das Risiko das 2 von 3 Sensoren ausfallen höher als 3 von 4, oder 3 von 5.
- je mehr "unterschiedliche" Sensoren in einem Gerät sind, umso weniger Sensoren werden pro Jahr verbraucht.
- mit der richtigen Sensorwechsel – Strategie kann man das Risiko eines Ausfalls von mehreren Sensoren MINIMIEREN und zugleich WENIGER Sensoren pro Jahr verbrauchen, selbst wenn sich mehr Sensoren im Gerät befinden: das Risiko bei Szenario 1 mit 3 Sensoren 2 Ausfälle zu haben ist sehr hoch. Bei Szenario 3 mit 5 Sensoren ist die Wahrscheinlichkeit 3 von 5 Sensoren zu verlieren sehr gering und zusätzlich verbraucht man auch weniger Sensoren pro Jahr als bei Szenario 1.

7) Generelle Empfehlungen für den Gebrauch von Sauerstoffsensoren:

Vorneweg: Bis jetzt haben wir uns nur um den Ausfall von Sauerstoffsensoren gekümmert und keinen Gedanken an die Elektronik, die damit verbunden ist, verschwendet. Es muss klar sein, dass beim Gebrauch von nur einer Elektronik, mit der all Sensoren verbunden sind, völlig unabhängig von der Anzahl der Sensoren im System und von der Wechselstrategie alle Sensoren nutzlos für den Taucher werden, wenn die Elektronik ausfällt.

Empfehlung 1: Verbinde die Sensoren, wenn möglich, mit unterschiedlichen Elektroniken um für Redundanz zu sorgen, So wird die Wahrscheinlichkeit des Verlusts aller wichtigen Information durch Ausfall der Elektronik, zu mini minimiert.

Empfehlung 2: Überprüfe die Sensoren regelmäßig auf ihre Strombegrenzung: Das ist die einzige Ausfallart die wir feststellen können, bevor sie problematisch wird. Ein Sensor, der auf einen PPO2 von 1,55 Bar begrenzt ist, wird bei 1,30 Bar noch tadellos funktionieren, man kann ihn aber schon im Auge behalten und auswechseln, bevor die Strombegrenzung in einen gefährlichen Bereich kommt.

Empfehlung 3: Ein alter Sensor, der noch gut arbeitet, sollte niemals weggeworfen, sondern als extra (redundanter) Sensor im System belassen werden (?? Weshalb einen funktionierenden Sensor wegwerfen?): Versuche immer die maximale Anzahl an (guten) Sensoren in dem Kreislaufgerät zu haben. Genügend gute Sensoren geben genug Spielraum für **ECHTE** Redundanz (das bedeutet, dass sich die verschiedenen Elektroniken keine Sensoren teilen müssen).

Empfehlungen für die verschiedenen Systeme:

Empfehlung 4: Systeme mit maximal 3 Sauerstoffsensoren.

- e/hCCR: **Wechsle nie alle Sensoren zur selben Zeit!** Es sollte inzwischen klar sein, dass die Möglichkeit 2 Sensoren zugleich zu verlieren bei 1 von 2000 Tauchgängen liegt. In Wirklichkeit liegt die Wahrscheinlichkeit sogar noch höher (mehr dazu später).

P3 ist auf jeden Fall immer das sicherste System. Wenn du die Sensoren nicht länger als 12 Monate in deinem Kreislaufgerät lassen möchtest, wende einen Wechselintervall von 4 Monaten an (was die Wahrscheinlichkeit, dass 2 von 3 Sensoren ausfallen nur geringfügig verringert im Verhältnis zum Verbrauch an Sauerstoffsensoren pro Jahr).

-mCCR: die Wahrscheinlichkeit, dass ein doppelter Sensorausfall von dem Taucher entdeckt wird liegt höher als bei einem eCCR. Deshalb ist P3 definitiv die beste Strategie.

Empfehlung 5: Systeme mit mindestens 4 Sensoren und 2 redundanten Elektroniken

- unabhängig von mCCR oder e/hCCR: bei der Verwendung von 4 oder mehr Sensoren und Strategie P3 ist die Wahrscheinlichkeit, dass mindestens 2 gute Sensoren im System sind wesentlich höher als bei der Standard 3S-P1 Strategie, mit dem zusätzlichen Vorteil, weniger Sensoren pro Jahr zu verwenden. Sogar bei der 5S-P3 Strategie verbraucht man weniger Sensoren pro Jahr als bei der 3S-P1 und man hat auf jeden Fall immer mehr arbeitende Sensoren als bei der letzteren Strategie.

Bei 5 Sensoren im System könnte man sogar Strategie P2 anwenden und die Sensoren nur nach einem Ausfall austauschen. Da es aber nur eine geringfügige Verringerung beim Verbrauch von Sensoren gibt, hat man keinen wirklichen Grund P2 gegenüber P3 vorzuziehen.

Für Systeme mit 4 oder 5 Sensoren gilt:

-mCCR: starte mit 3 Sensoren, die an 2 voneinander unabhängige Elektroniken angeschlossen sind und füge, gemäss P3, Sensoren hinzu bis alle Plätze belegt sind. Wenn kein Platz mehr ist, tausche die Sensoren und folge dabei den Richtlinien von P3 (den ältesten Sensor – außer man hat einen schwächeren – aus dem System entfernen).

- e/hCCR: ebenso wie bei mCCR, nur startet man mit 4 Sensoren, da man 3 Sensoren für die "voting logic" benötigt und der vierte Sensor für die redundante Elektronik (Anzeige / HUD) ist. Um das Ausfallrisiko von mehreren Sensoren am Anfang dieser Strategie zu minimieren (da man oft keine andere Wahl hat als lauter neue Sensoren von der selben Produktionsserie einzubauen), kann man den ersten neuen Sensor schon nach 3 Wochen hinzufügen und danach im 6 Monats Intervall rotieren.

Der Gebrauch von 5 Sensoren hat noch einen weiteren großen Vorteil: Sobald ein Sensor ausfällt, hat man ausreichend Zeit, sich einen neuen Sensor zu kaufen. Damit fällt auch die Notwendigkeit ständigen Mitführens eines Reservesensors weg. Ein Gerät mit nur 4 Sensoren ist eine bessere Alternative als die 3SP1 Strategie.

Empfehlung 6: Wir haben gesehen, dass Sensoren bei höherer Temperatur mehr Strom produzieren (mehr „Treibstoff“ verbrennen). Wenn möglich, lagere dein Kreislaufgerät deshalb immer an einem kühlen Ort. Es wird aber auf keinen Fall empfohlen die Sensoren aus dem Gerät zu entfernen und z. B. im Kühlschrankschrank zu lagern, da sich dadurch die Wahrscheinlichkeit eines mechanischen Ausfalls erhöht. Des Weiteren kann ein ständiges Anstecken und Abziehen des Kabels dem Stecker schaden.

Empfehlung 7: Schreibe immer das Datum des Einbaus auf den Sensor, um später zu wissen welcher der jüngste ist. Bei unseren Beobachtungen sind wir immer davon ausgegangen, dass die Lebensdauer eines Sensors dann beginnt, wenn er aus dem luftdicht verschlossenen Behälter, in dem er geliefert wird, genommen wird. Diese Annahme erscheint korrekt zu sein solange das Produktionsdatum des Sensors nicht länger als ein Jahr - vor dem Einbau - zurück liegt

Das Produktionsdatum ist als Code auf den Sensor gedruckt. Zwei häufige Möglichkeiten sind:

- 3 Nummern bei denen die erste die Jahreszahl und die folgenden zwei den Monat angeben (z.B. 805XXX - der 5. Monat im Jahr 2008, oder Mai 2008)
- Ein Buchstabe gefolgt von einer Nummer, wobei der Buchstabe den Monat angibt und die Nummer das Jahr (z.B. A8 - Januar 2008)

8) Anmerkungen

- Manch einer wird sagen, dass die Zahlen auf der Tabelle für multiplen Sensorausfall sehr niedrig sind. Das ist richtig denn in Wirklichkeit scheinen sich manche Ausfälle zu häufen, was aber nicht alleine am Sensor liegt, sondern an Ereignissen, die alle Sensoren beeinflusst haben, oder aber an der Elektronik die den Sensor umgibt.

Solche Ereignisse können Sensoren dazu bringen, sich gleich zu verhalten. Dadurch wird wiederum die Wahrscheinlichkeit erhöht, dass alle Sensoren zugleich ausfallen, insbesondere wenn sie gleich alt sind und dieselben Tauchgänge hinter sich haben!

Wenn du zum Beispiel dein Kreislaufgerät komplett flutest und dir denkst, dass du die Sensoren noch benutzen kannst (nachdem du sie ordentlich gereinigt hast), ist die Wahrscheinlichkeit eines multiplen Sensorausfalls beim nächsten Tauchgang höher... Unabhängig von der Sensorwechselstrategie!

Dasselbe gilt für nicht redundante Elektronik oder nicht redundante Kabelführungen: Auch dadurch kann ein multipler Ausfall von Sensoren hervorgerufen werden, was wiederum nichts mit der Sensorwechselstrategie zu tun hat.

Das ist natürlich auch der Grund, weshalb man immer eine redundante Elektronik mit sich führen sollte: der beste Sensor und die beste Sensorwechselstrategie sind nutzlos wenn eine schlecht konzipierte Elektronik verwendet wird.

- Manch einer wird annehmen, dass die Kurve von Sensorausfällen nicht genau bekannt ist und sich mit besseren / anderen Sensoren am Markt verändern kann. Das ist natürlich korrekt und genau aus diesem Grund haben wir eine Simulation mit einer anderen Ausfallkurve, die einer besseren Produktionsserie entspricht, gemacht. Das Resultat dieser Simulation hat nichts an der Empfehlung zur Wechselstrategie geändert. Ganz im Gegenteil: je besser die Produktionsserien sind, umso eher werden sie wie bei „Typ 1“ bei den „guten“ Serien beschrieben ausfallen, was wiederum dafür spricht, dass P3 gegenüber P1 vorgezogen werden sollte.

- Eine weitere Anmerkung ist, dass die Benutzer von Kreislaufgeräten nicht am laufenden Band tauchen gehen und auch die Sensoren nicht wie empfohlen austauschen, weshalb es immer wieder zu einem „Neustart“ mit lauter fabrikneuen Sensoren kommt (z.B. beim Verkauf eines Gerätes oder bei einer Generalüberholung). Um das in die Empfehlungen mit einzubeziehen, wurden auch dafür Simulationen gemacht, mit einem Austausch aller Sensoren nach 5 Jahren bzw. nach 8 Jahren. Die Ergebnisse dieser Simulation bringen uns dennoch zu denselben Empfehlungen zum Sensorenwechsel wie in Kapitel 7 beschrieben.

- Warum nicht mehr als 5 Sensoren verwenden? 6 oder 7... Solange man die Sensoren auf verschiedene Elektroniken verteilen kann, besteht dafür keine Notwendigkeit, da die Wahrscheinlichkeit, dass mehr als 2 Sensoren ausfallen sehr niedrig ist, der Verbrauch an Sensoren pro Jahr aber merklich steigen wird. In den meisten Fällen wird man bei Konfigurationen mit mehr als 5 Sensoren die Probleme bekommen, dass der älteste Sensor,

bei einem Wechselintervall von 6 Monaten, seine maximale Lebensdauer erreicht, bevor er gewechselt wird und dass nicht ausreichend Platz zur Montage von zusätzlichen Sensoren ist.

- Denke bitte immer daran, dass Sauerstoffsensoren eigentlich für die Benutzung unter einem Bar Umgebungsdruck gebaut werden: Bei ihrer Entwicklung wurde nicht mit einbezogen, dass sie wiederholt abwechselnd hohem und niedrigem Druck ausgesetzt sind. Es gibt noch keine Antworten, welchen Einfluss dies auf die Lebensdauer hat. Es wird aber angenommen, dass Kompression und Dekompression mechanische Schäden herbeiführen kann, was wiederum die Lebensdauer verkürzen kann. Genau das ist ein weiterer Grund der für mehrere Sensoren mit unterschiedlicher Tauchvergangenheit im Kreislaufgerät spricht.