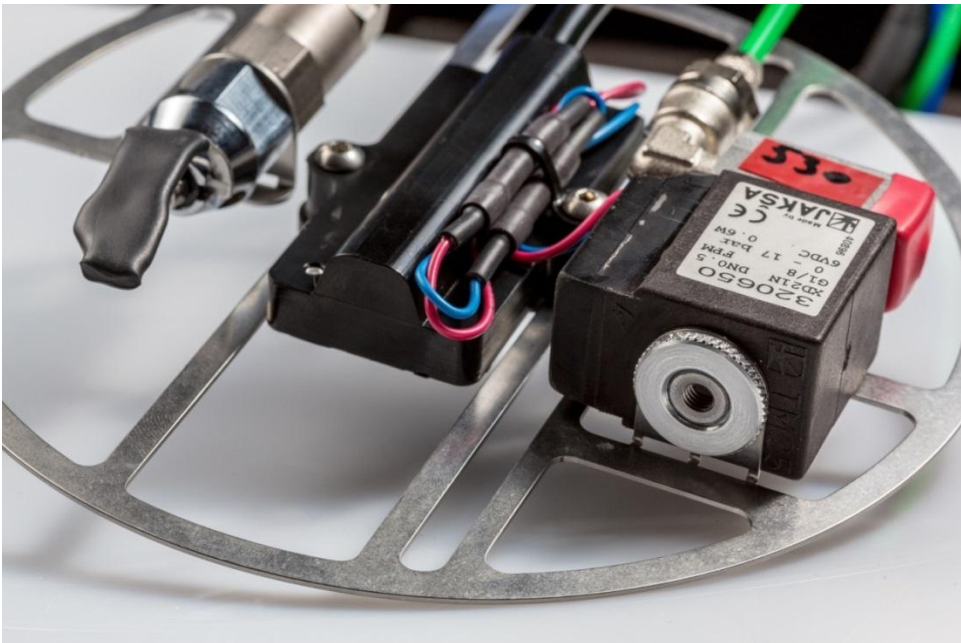


Düse mit konstantem Massendurchfluss



Paul Raymaekers

14/10/2010 V0.2

Übersetzung: W. Jocham, U. Herold

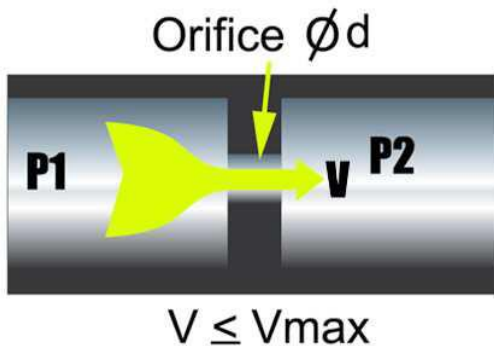
Angepasst und erweitert im Juni 2016 vom Koni Schwarz

Haftungsausschluss:

Die Darstellungen in diesem Artikel sind nur für ein besseres Verständnis abgebildet und stellen keine korrekten Werte dar. Weder der Autor, noch der Übersetzer übernehmen irgendeine Haftung für Schäden, die durch Verwendung der Information dieses Artikels entstehen könnten. Dieser Text ist eine einfache Erklärung des Prinzips zum leichteren Verständnis, wie und wann es in Kreislaufgeräten benutzt wird. Weder der Autor, noch der Übersetzer dieses Artikels übernehmen irgendeine Verantwortung für den Fall, dass jemand die nachfolgende Information benutzt, um selber ein Kreislaufgerät zu bauen oder zu modifizieren.

Konstanter Volumenfluss

Wenn wir über den konstanten Massenfluss sprechen, so sollen wir zunächst einem speziellen, physikalischen Grundgesetz unser Augenmerk schenken: Ein Gasfluss durch ein kleines Loch – in unserem Fall eine Düse (um genau zu sein, nennt man dies eine „Blende“ - englisch: orifice) – ist in seiner Fließgeschwindigkeit begrenzt. Je höher die Fließgeschwindigkeit, desto höher werden die Strömungswiderstände, bis ein Gleichgewicht erreicht ist. Eine höhere Geschwindigkeit als die Schallgeschwindigkeit ist bei einfachen Düsen nicht möglich (V_{\max} *)



Wenn also die Bedingungen für das Erreichen der maximalen Geschwindigkeit gegeben sind, so wird, egal was man macht (mehr Druck vor der Blende bzw. weniger Druck oder Vakuum hinter der Blende), die Fließgeschwindigkeit des Gases durch die Blende konstant V_{\max} bleiben.

Das bedeutet also, dass, bedingt durch die begrenzte Fließgeschwindigkeit, die Menge Gas (l/min) durch eine Düse (mit festem Durchmesser) begrenzt ist. So bekommen wir einen konstanten Volumenfluss (= Geschwindigkeit des Gases multipliziert mit der Fläche der Düse).

$$\text{Volumenfluss} = \text{Düsenfläche} * \text{Gasgeschwindigkeit}$$

$$\dot{V} = \frac{\pi * d^2}{4} * v$$

Wann aber erreichen wir die maximale bzw. Schallgeschwindigkeit? Dafür gibt es eine einfache Näherungs-Gleichung: V_{\max} wird dann erreicht, wenn der Druck am Eingang P1 mindestens doppelt so groß ist wie der Druck am Ausgang P2

$$P1 \geq 2 * P2$$

Beispiele:

$P1 = 10 \text{ bar}; P2 = 1 \text{ bar}$:

$P1$ ist viel größer als $P2$: wir haben V_{\max} erreicht

$P1 = 10 \text{ bar}; P2 = 7 \text{ bar}$

$P1$ ist nicht größer als zweimal P , wir haben V_{\max} nicht erreicht.

Das bedeutet also, dass bei gleichbleibendem Durchmesser der Düse und $P1 \geq 2 * P2$, ein konstanter Volumenfluss vorhanden ist.

Konstanter Massenfluss

Hier müssen wir jetzt ein bisschen aufpassen: Ich habe geschrieben, dass der Volumenfluss konstant ist, sobald V_{\max} erreicht ist.

Bitte beachte, dass der Volumenfluss nichts mit der Menge an Gas oder der Menge an Molekülen im Gas oder dem Gewicht des Gases zu tun hat: Beim Tauchen mit Kreislaufgeräten sind wir nicht daran interessiert, wie groß das Volumen des eingespeisten Sauerstoffs ist. Vielmehr interessiert uns die Anzahl der Moleküle (= Gramm/Minute) die ins System strömen.

Sobald wir den maximalen Volumenfluss durch eine Düse kennen wollen wir jetzt wissen, welche Masse bzw. Gramm/Minute (g/min) hindurchfließen. Hierfür müssen wir einen weiteren Faktor hinzuziehen: Die Dichte des Gases ρ (kg/m³ oder Gramm/Liter).

Wenn wir also den Volumenfluss (l/min) mit der Dichte (g/l) multiplizieren, erhalten wir den Massenfluss (Gramm/Minute).

Wenngleich die Geschwindigkeit und damit der Volumenfluss (l/min) durch V_{\max} begrenzt ist, kann man trotzdem eine größere Menge an Molekülen (mehr Gramm/Minute) durch die Düse strömen lassen. Dies kann durch ein dichteres Gas erreicht werden (je dichter das Gas umso mehr Moleküle/Liter). Also wird mit einem fixen Volumenfluss, aber einem dichteren Gas, die Menge an Molekülen/Minute bzw. Gramm/Minute (= Massenfluss) zunehmen.

Anmerkung zu den Kreislaufgeräten (mehr dazu später): Wenn wir von einem Sauerstoff-Fluss von 0,8 l/min sprechen, meinen wir tatsächlich 0,8 l/min bei 1 Bar Umgebungsdruck. Das ergibt in etwa 1,14 Gramm/Minute, da die Dichte von Sauerstoff ungefähr 1,43 Gramm/Liter beträgt)

Wie wird aber die Dichte eines Gases erhöht?

Ganz einfach, indem man es komprimiert oder den Druck des Gas erhöht.

$$\text{Massenfluss} = \text{Volumenfluss} * \text{Dichte}$$

Die Dichte des Gas kann erhöht werden, indem man es komprimiert (= P_1 erhöhen). Wenn man also den Druck von P_1 erhöht, wird die Dichte des Gases zunehmen, genauso wie der Massenfluss (Dichte multipliziert mit dem Volumenfluss).

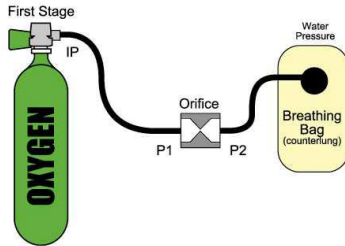
Beispiel:

Wenn die Bedingungen für V_{\max} gegeben sind, erhalten wir einen konstanten Volumenfluss. Wenn man jetzt den Eingangsdruck der Düse verdoppelt, wird sich auch die Dichte des Gases sowie die Masse, die durch die Düse fließt, verdoppeln.

Genug der Theorie. Jetzt ein paar praktische Beispiele:

Der kompensierte Druckminderer

Für diesen Versuch nehmen wir einen normalen Druckminderer (die erste Stufe) und verbinden sie mit einer Sauerstoffflasche. Der Ausgangsdruck der ersten Stufe (Mitteldruck) ist auf 10 Bar total (9 bar über Umgebungsdruck) eingestellt. An den Mitteldruckschlauch schließen wir eine Düse mit gleichbleibendem Durchmesser. Der Ausgang der Düse wird mit der Gegenlunge eines Kreislaufgerätes verbunden.



„Normale“ Druckminderer zum Tauchen sind „kompensiert“, d.h. so gebaut, dass sie den Umgebungsdruck „fühlen“ und entsprechend den Mitteldruck anpassen. Dadurch ist der Unterschied zwischen Mitteldruck und Umgebungsdruck (während des Tauchgangs) immer gleich groß. Dies ist wichtig, damit die zweite Stufe, die normalerweise zum Tauchen verwendet wird, ihrem Zweck entsprechend funktioniert.

Das bedeutet, dass der Mitteldruck eines „normalem“ Druckminderer immer mit dem Umgebungsdruck mitsteigt.

Beispiel:

An der Oberfläche (1 Bar Umgebungsdruck) liegt der Mitteldruck des Druckminderers bei 10 Bar total, der Druckunterschied ist also 9 Bar. Wenn wir tauchen gehen, nimmt der Wasserdruck alle 10 Meter, die wir abtauchen, um 1 Bar zu. Der Mitteldruck des Druckminderers wird also um 1 Bar alle 10 Meter zunehmen. Wenn wir an der Oberfläche mit 10 bar total starten, liegt der Mitteldruck, bei einer Tauchtiefe von 20 Metern, bei 12 Bar. Er hat also um 2 Bar zugenommen. In einer Tiefe von 50 Metern würde der Mitteldruck bei 15 bar liegen ... usw.

Jetzt aber wieder zurück zu unserem Druckminderer der Düse und der Gegenlung:

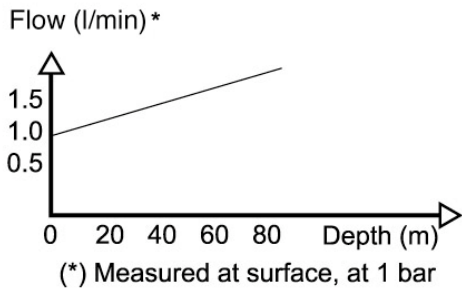
Stelle dir vor, wir wählen jetzt eine Düse, die uns an der Oberfläche, bei 10 Bar Mitteldruck einen Fluss von 1l/min liefert (+/- 1,43 Gramm/Minute an der Oberfläche!). P1 liegt bei 10 Bar, der Ausgangsdruck P2 bei 1 Bar. Da P1 um mehr als das doppelte größer ist als P2 strömt das Gas mit V_{max} durch die Düse.

Wenn wir jetzt mit unserem Kreislaufgerät in eine Tiefe von 20 Metern tauchen, haben wir einen Umgebungsdruck von 3 Bar. P2 hat also um 2 Bar zugenommen und liegt jetzt bei 3 Bar. Aber auch der Druckminderer hat seine Arbeit gemacht und liefert einen Mitteldruck von 12 Bar in dieser Tiefe. Da das Druckgefälle groß genug ist, strömt das Gas noch immer mit V_{max} . Der Volumenfluss hat sich also nicht verändert.

Aber was passiert dann? Da P1 von 10 auf 12 Bar zugenommen hat, wird das Gas (Sauerstoff) beim Düseneingang um 20 % komprimiert und nimmt dadurch um 20 % an Dichte zu.

Dadurch nimmt auch die Massenflussmenge (Volumenstrom x Dichte des Gases) um 20% zu! Jetzt fließen also +/- 1.72 Gramm/Minute durch die Düse was. Das würde an der Oberfläche 1,2 l/min entsprechen!

Tauchen wir in eine Tiefe von 50 Meter ab (P1 = 15 Bar, P2 = 6 Bar), so ist der maximale Volumenfluss ($15 > 2 \times 6$) nach wie vor gegeben, aber die Dichte hat, gemeinsam mit dem Massenfluss, um 50% zugenommen. Die Sauerstoffmenge, die jetzt durch die Düse strömt, ist 2,14 Gramm/Minute, was einem Fluss von 1,5 l/min an der Oberfläche entspricht.



Wir merken also, dass, je tiefer wir mit einem normalen Druckminderer an der Sauerstoffflasche tauchen, der Massenfluss des Gases (und der Volumenfluss gemessen bei 1 Bar) zunimmt: wir haben keinen konstanten Massenfluss des Sauerstoffs.

Wollen wir das...? Nein!

Der Druckminderer mit konstantem Mitteldruck

Jetzt schauen wir auf ein anders System: wir modifizieren unseren normalen Druckminderer in der Form, dass er den Umgebungsdruck des Wassers nicht mehr „fühlen“ kann. Somit kann der Mitteldruck beim Abtauchen nicht mehr steigen (dies kann durch die einfache Montage einer speziellen Kappe erfolgen, damit die Membrane der ersten Stufe vom Wasserdruck abgeschirmt wird).

Wenn nun der Druckminderer so eingestellt ist, dass er an der Oberfläche einen Mitteldruck von 10 Bar total liefert, bekommt man mit derselben Düse wie im vorherigen Beispiel wieder einen Volumenfluss von 1 l/min (~1,43 g/min).

Bei einem Tauchgang in 20 Meter Tiefe (3 Bar Umgebungsdruck) wird der Druckminderer den erhöhten Umgebungsdruck nicht erkennen und nach wie vor einen Mitteldruck von 10 Bar total liefern ($P_1 = 10$ Bar).

Sind die Bedingungen für den maximalen Fluss noch gegeben?

Ja, da der Ausgangsdruck der Düse ($P_2 = 3$ Bar) weniger als die Hälfte vom Eingangsdruck ($P_1 = 10$ Bar) ist, strömt das Gas mit V_{\max} ($P_1 < 2 \times P_2 = V_{\max}$). Der Volumenfluss ändert sich also nicht.

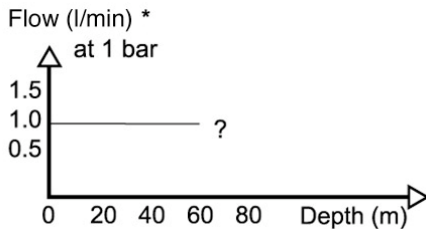
Was passiert aber mit dem Massenfluss?

Da sich P_1 beim Abtauchen auf 20 Meter nicht verändert, bleibt auch die Dichte des Sauerstoffs, der durch die Düse strömt, gleich und es gibt keine Veränderung des Massenflusses: wir haben noch immer unsere 1,43 g/min (1 l/min gemessen an der Oberfläche).

Somit haben wir einen KONSTANTEN Massenfluss.

Was passiert, wenn wir jetzt in eine Tiefe von 40 Meter, 5 Bar Umgebungsdruck, abtauchen?

P_1 ist noch immer 10 Bar, da der Druckminderer nichts „fühlen“ kann. Auch der maximale Volumenfluss ist gegeben, da P_1 (10 Bar) doppelt so groß ist wie P_2 (5 bar). Die Dichte des Gases bei der Eingangsseite der Düse hat sich nicht verändert (P_1 ist konstant 10 Bar) und somit haben wir noch immer einen konstanten Massenfluss.

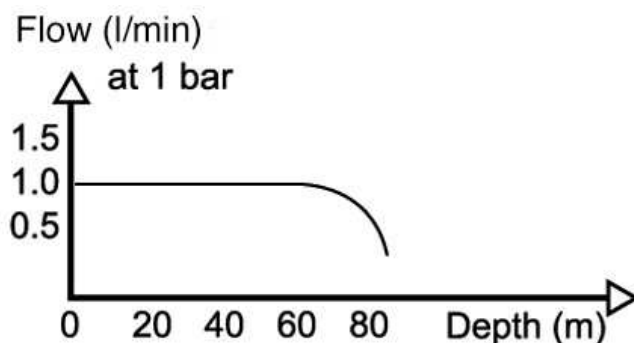


Und genau das ist es, was wir uns von Kreislaufgeräten erwarten: Wir lassen eine gewisse Menge an Sauerstoff in den Atemkreislauf strömen, die unserem Sauerstoffverbrauch (Metabolismus) im Ruhezustand oder bei langsamem Schwimmen entspricht. Da sich der Sauerstoffverbrauch mit zunehmender Tiefe nicht verändert, erwarten wir dasselbe vom Massenfluss, der in den Atemkreislauf strömt. Er soll konstant bleiben.

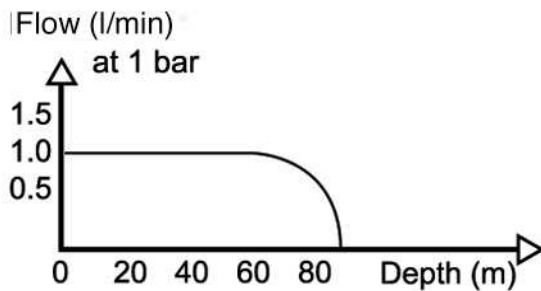
Wenn wir – anstrengungsbedingt - mehr Sauerstoff benötigen, kann dieser einfach manuell (mCCR) oder elektronisch gesteuert (hCCR) hinzugefügt werden.

Würde der Massenfluss des Sauerstoffs zunehmen, wäre er schnell höher als unser Sauerstoffverbrauch, und somit würde der pO_2 in den hyperoxischen Bereich steigen. Wir müssten das System ständig mit Verdünnungsgas spülen.

Was würde aber passieren, wenn wir mit einem Druckminderer mit konstantem Mitteldruck noch tiefer tauchen? In 60 Metern Tiefe haben wir einen Umgebungsdruck von 7 Bar total, aber der Mitteldruck ist noch immer 10 Bar. Da P1 nicht mehr doppelt so groß ist wie P2 (10 plus 7), sind die Bedingungen für V_{max} und somit maximalen Volumenfluss nicht mehr gegeben! Die Geschwindigkeit des Gases durch die Düse wird abnehmen und damit auch der Volumenfluss. Die Dichte des Gases (bestimmt durch P1) bleibt zwar gleich, dennoch nimmt der Massenfluss ab. Konstanter Massenfluss ist nicht mehr gegeben!



Je tiefer wir gehen, 70m, 80m, oder mehr, umso größer wird der Umgebungsdruck des Wassers und nähert sich an P1, den Mitteldruck. Die Geschwindigkeit des Gases wird gemeinsam mit dem Massenfluss abnehmen bis 90 Meter erreicht sind. In dieser Tiefe sind der Umgebungsdruck und der Mitteldruck ausgeglichen (beide 10 Bar). Es gibt bei der Düse keinen Druckunterschied mehr und deswegen wird auch kein Gas strömen. Der Massenfluss ist Null.



Was bedeutet das für das Tauchen mit einem Kreislaufgerät, bei der Verwendung eines Druckminderers mit konstantem Mitteldruck und Massenfluss?

Dass die Einsatztiefe des Kreislaufgerätes auf die Tiefe begrenzt ist, bei der der Umgebungsdruck den Mitteldruck des Druckminderers erreicht. In dieser Tiefe kann kein Sauerstoff in den Atemkreislauf strömen - weder über die Düse noch über die manuelle Sauerstoffzufuhr (Düse und manuelle Sauerstoffzufuhr werden von demselben Druckminderer gespeist).

Anmerkung der Redaktion:

Das bedeutet in der Praxis, dass der konstante Massendurchfluss durch die Düse bereits deutlich über dem Gleichgewichtsdruck spürbar abnimmt, also der pO_2 sinkt. Dies wird dann durch das Magnetventil ausgeglichen.

Beim rEvo (egal ob mCCR oder hCCR) wurde die maximale Tauchtiefe so festgelegt, dass sie 20 Meter über der Tiefe liegt, wo sich der Mitteldruck und der Umgebungsdruck ausgleichen. Bei der Graphik weiter oben im Text kann man sehen, dass in dieser Tiefe noch ein ausreichender Massenfluss durch die Düse gegeben sowie ausreichend Druckunterschied für die manuelle Sauerstoffzufuhr vorhanden ist.

Der Mitteldruck des Sauerstoffs ist beim rEvo normalerweise auf ca. 12 Bar eingestellt (11 Bar über Umgebungsdruck) und der Fluss beträgt ca. 0,8l/min (an der Oberfläche). In Tiefen größer als 100 Metern wird sich der Wasserdruck und der Mitteldruck ausgleichen, deshalb ist die empfohlene maximale Einsatztiefe des rEvo (mCCR und hCCR) 80 Meter.

Anmerkung der Redaktion:

Es existieren mehrere rEvo-Varianten mit unterschiedlichen O_2 -Drücken und maximal zugelassenen Tauchtiefen.

Wenn der Mitteldruck des Druckminderers verringert wird - etwa um den Gasfluss an einen Taucher mit geringem Sauerstoffverbrauch anzupassen - so verringert dies die maximale Einsatztiefe des rEvo um 10 Meter pro Bar.

Möchte man tiefer als diese Einsatztiefe tauchen, gibt es mehrere Lösungsansätze. Einer wäre es, eine normale, druckkompensierte erste Stufe zu verwenden. Dies macht dann die Nutzung der Düse mit konstantem Massendurchfluss unmöglich, daher muss man diese funktionsunfähig machen.

Dies ist nicht möglich für einen mCCR, aber gut möglich bei Hybrid-Kreislaufgeräten: Einfach die Stahlplatte aus der ersten Stufe nehmen und den Kompensationsstempel einbauen. Somit wird diese zu einer normalen ersten (kompensierten) Stufe und die Düse wird mit Hilfe des mitgelieferten Blindstopfens verschlossen. Somit wird aus einem hCCR ein reiner eCCR.

In diesem Fall beträgt die empfohlene maximale Einsatztiefe 100 Meter. 8