

# **SCUBA**

Courses & Publications

Funktionsweise und Pflege von Tauchausrüstung  
Scuba Publications – Daniela Goldstein  
Jan Oldenhuiizing

Alle Rechte des Autors und seiner Lizenzgeber bleiben vorbehalten

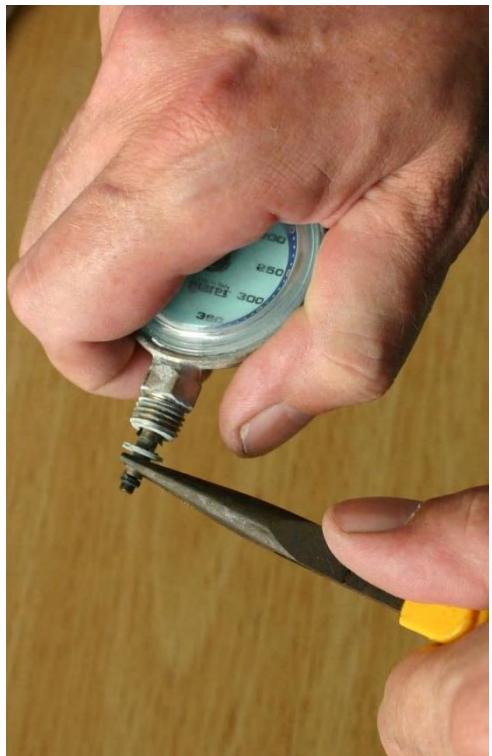
Dieses Werk einschliesslich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwendung ausserhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages nicht zulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen und die Speicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Logos, Handelsnamen, Warenzeichen, etc. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedem benutzt werden dürfen.

## Inhaltsverzeichnis

Flaschen und Ventile.....	3
Tauchflaschen.....	4
Ventile.....	6
Lungenautomaten.....	9
Erste Stufen.....	10
Zweite Stufen.....	19
Automatenvereisung.....	24
Weitere Ausrüstung .....	28
Kreislauftauchgeräte.....	29
Enriched Air und Ausrüstung.....	33
Inflatoren & Ventile .....	34
Instrumente .....	36
Index .....	40

## Einleitung



Dieses Buch wurde geschrieben, um das Verständnis der Arbeitsprinzipien von Tauchausrüstung zu vergrössern und den Tauchern zu ermöglichen, ihre Ausrüstung besser pflegen zu können. Tauchen ist eine ausrüstungsintensive Aktivität. Der Komfort und die Sicherheit eines Tauchers stehen in direktem Zusammenhang mit einer richtig funktionierenden Ausrüstung. Ein grundlegendes Verständnis der Funktionsweisen und der Pflege wird einen positiven Effekt auf Komfort und Sicherheit haben.

Allgemeines Wissen über Ausrüstungsteile wie Masken, Anzüge, Messer und andere Ausrüstung sind normalerweise schon ausführlich im Anfängerkurs behandelt worden. Diese allgemeinen Aspekte der Tauchausrüstung werden wir nicht mehr wiederholen. Um ein breiteres Wissen über die jeweiligen Themen zu gewährleisten ist es eine gute Idee, Kursbücher vorangegangener Kurse als zusätzliche Lektüre zum entsprechenden Kapitel zur Hand zu nehmen.

Dieses Buch konzentriert sich auf die technischen Merkmale der Tauchausrüstung und vermittelt vertiefte Kenntnisse, um ein umfassendes Wissen der Funktionsweise von Ausrüstung, der verschiedenen technischen Lösungsmöglichkeiten sowie deren mögliches Versagen zu entwickeln.

# Flaschen und Ventile

Tauchflaschen und Ventile werden unter hohem Druck benutzt. Deswegen existieren Vorschriften und Prozeduren, um unsichere Situationen zu vermeiden. Als Spezialist für Tauchausrüstung musst du über solche Vorschriften und Prozeduren informiert sein. Die Wahl von Flaschen und Ventilen sowie der Umgang mit diesen haben einen Einfluss auf den Komfort des Tauchers, auf die Lebensdauer der Ausrüstung und die Sicherheit. Oft sind Taucher über solche sekundäre Überlegungen nicht informiert. In diesem Kapitel werden Vorschriften und Prozeduren erläutert, du erhältst Informationen über die Kriterien für die Auswahl von Flaschen und Ventilen sowie deren Umgang.



### Tauchflaschen

Eine Tauchflasche ist ein "Gefäß" mit dem Luftvorrat für den Taucher. In einigen Gebieten wird Aluminium verwendet. Stahlflaschen sind allerdings die am häufigsten verwendeten Tauchflaschen, vor allem in gemässigten Klimazonen. Es gibt mehrere Gründe, Stahlflaschen zu wählen, wenn die Klimabe dingungen nicht zu materialbeanspruchend sind:

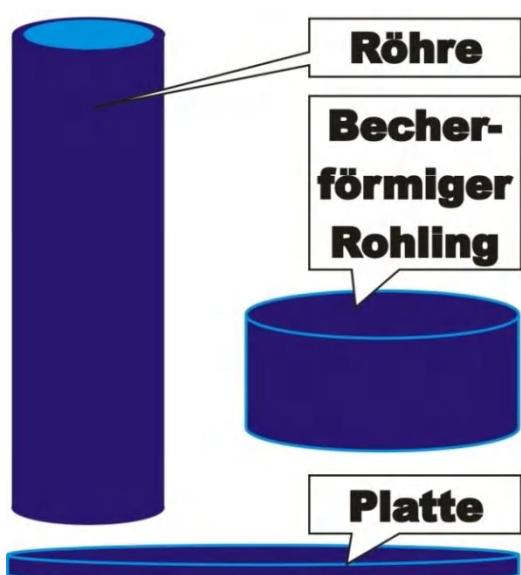
- Aluminiumflaschen sind aufgrund der dickeren Aussenwand schwerer als Stahlflaschen (die Aussenwand ist ungefähr viermal so dick als bei Stahlflaschen, wobei Aluminium dreimal leichter als Stahl ist).
- Wegen der dickeren Aussenwand ist das äussere Volumen der Aluminiumflaschen (und somit die verdrängte Wassermenge) im Vergleich zum Innenvolumen grösser. Um den zusätzlichen Auftrieb auszugleichen, braucht der Taucher mehr Blei.
- Viele Aluminiumflaschen haben negativen Auftrieb, wenn sie gefüllt sind und positiven Auftrieb, sobald sie leer sind. Dies verändert die Tarierung des Tauchers während des Tauchgangs, was nicht sehr angenehm ist.
- Aluminiumflaschen reagieren stärker auf galvanische Reaktionen im Flaschengewinde aufgrund der unterschiedlichen Metalle von Flasche und Ventil.
- Nahezu bei allen Unfällen aufgrund von explosivem Druckabbau von Druckbehältern waren Aluminiumflaschen involviert (mit der Ausnahme von Flaschenventilen, aber dazu später mehr).
- Eine gelagerte Aluminiumflasche kann in einem Feuer explodieren, wenn der Lagerraum Feuer fängt und die Temperatur ansteigt (deshalb verlangen manche Länder Berstscheiben, in denen Aluminiumflaschen häufig eingesetzt werden).

Aluminiumflaschen haben jedoch einen grossen Vorteil: Sie sind viel beständiger gegen den Einfluss von Salzwasser und Feuchtigkeit in einem tropischen Klima. Deshalb wählen viele Tauchcenter in tropischen Gebieten Aluminiumflaschen.

Für Tauchflaschen gibt es drei Produktionsmethoden. Obwohl der Unterschied kaum von aussen zu erkennen ist, hat die Produktionsmethode einen Einfluss auf den Komfort des Tauchers. Flaschen können aus einer Stahlplatte, -Röhre oder aus einem becherförmigen Rohling hergestellt werden. Die leichtesten Flaschen werden aus einer Stahlplatte produziert. Stahlröhren liefern eine Flasche mit mittlerem

Gewicht, die schwersten Flaschen stammen aus der Produktion von becherförmigen Rohlingen. Der Gewichtsunterschied entsteht in erster Linie aufgrund der Stärke des Flaschenbodens, der natürlich je nach Produktionsart, unterschiedlich ausfällt.

Alle Tauchflaschen sind ohne Schweißnähte gefertigt. Bei der Produktion aus einer Stahlröhre wird der Boden zuerst verschlossen und dann der Flaschenhals geformt. Die Flasche ist schon auf die richtige Länge zugeschnitten und die Wandstärke ändert sich nicht im Verlaufe des Produktionsprozesses. Bei Flaschen aus einem becherförmigen Rohling ist der Boden schon verschlossen. Der Rohling wird um eine Form „gezogen“ und somit die Wandstärke festgelegt. Die Wandstärke muss vielleicht noch leicht verändert werden. Die Produktion aus einer Stahlplatte ist ähnlich, erzeugt aber einen dünneren und leichteren Boden.



Stahlflaschen gibt es in 200, 232 und 300 bar Ausführungen. Die 200 bar Version ist die üblichste. Traditionelle 300 bar Flaschen haben ein zu grosses Gewicht, als dass sie für das Sporttauchen geeignet wären (man braucht eher Korken als Gewichte). Neuere Modelle, bei denen eine 200 bar Flasche mit Karbonfaser und Epoxydharz umwickelt wird, erlauben Füllungen bis 300 bar bei weniger Gewicht. 300 bar Flaschen haben spezielle Ventile mit einem 300 bar Lungengautomatenanschluss.

Du kannst keinen 200 bar Lungengautomaten an ein 300 bar Flaschenventil anschliessen. Somit ist der Taucher vor einer Fehlbedienung geschützt. Ein 300 bar Lungengautomat kann aber an ein 200 bar Flaschenventil angeschlossen werden. Ein Problem tritt sich erst beim Füllvorgang mit dem Füllschlauch auf. Ein 200 bar Füllschlauch kann nicht an ein 300 bar Ventil angeschlossen werden (obwohl dies kein Sicherheitsproblem darstellen würde), aber ein 300 bar Füllschlauch kann an ein 200 bar Ventil angeschlossen werden. Ein Kompressor, der mit 300 bar Füllschläuchen an der Füllkonsole ausgestattet ist, hat ein 330 bar Enddrucksicherheitsventil. Wird eine 200 bar Flasche an den falschen Füllschlauch angeschlossen, gibt es sehr wohl ein Sicherheitsproblem. Darum wirst du selten Füllstationen finden, die 300 bar Füllungen anbieten.

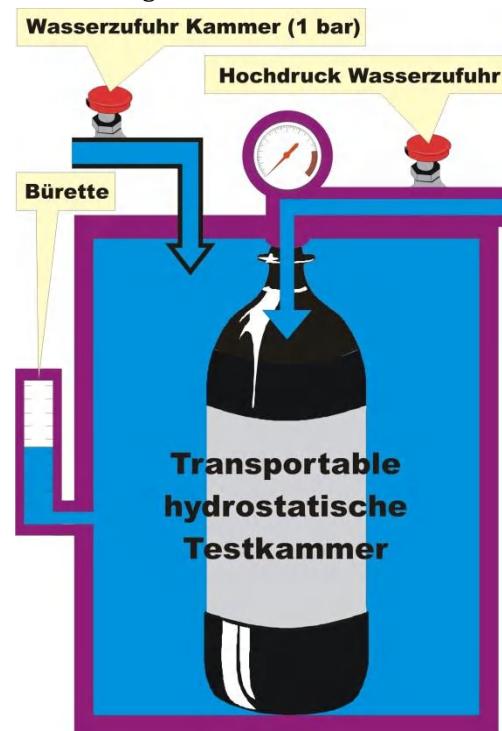


Der Hauptunterschied zwischen einem DIN 300 bar Anschluss und einem DIN 200 bar Anschluss ist die Gewindelänge, weshalb du keinen 200 bar Lungengautomaten an ein 300 bar Flaschenventil anschrauben kannst. Das Gewinde ist zu kurz, um den O-Ring unten im Ventil abzudichten. Rechts im Bild ist ein 300 bar Flaschenanschluss und links ein 200 bar Anschluss abgebildet.

Zum heutigen Zeitpunkt sind 200 bar Flaschen immer noch die beste Wahl fürs Sporttauchen, da die Füllstationen darauf ausgelegt sind und der Taucher keine Probleme mit der Flaschenfüllung hat. Beim technischen Tauchen mag das anders sein, aber technische Taucher sind es gewohnt, weite Wege auf sich zu nehmen, um ihre Flaschen entsprechend ihren Wünschen gefüllt zu bekommen.

Tauchflaschen müssen periodisch hydrostatisch getestet werden. Das Intervall variiert von Land zu Land. Meist liegt es bei 2 bis 5 Jahren für Tauchflaschen und bei 2 bis 10 Jahren für Flaschen, die keinen direkten Wasserkontakt haben (wie Standflaschen oder Sauerstoffflaschen für Erste-Hilfe). Es ist gesetzlich vorgeschrieben, sie in diesen Intervallen zu testen. Es wäre aber kontraproduktiv, sie öfter als nötig dieser Prozedur zu unterziehen, weil die Flasche während dem Test einem hohen Druck ausgesetzt wird.

Während eines hydrostatischen Tests wird die Flasche mit Wasser gefüllt und 50 oder 66 Prozent über Arbeitsdruck getestet. (200 bar Flaschen werden bei 300 bar getestet, also 50% mehr und 3000 psi bei 5000 psi, also 66% mehr). Neben dem Drucktest wird der allgemeine Zustand der Flasche geprüft. Dies kann durch Expansion der Flasche unter Druck oder im Vergleich des Gewichts zum Produktionsgewicht oder mittels anderer Methoden geschehen.



Zusätzlich zum hydrostatischen Test muss eine Tauchflasche jährlich visuell inspiziert werden. Dies wird durch einen Profi gemacht und beinhaltet eine visuelle Inspektion des Flaschenäusseren (beson-

ders unter dem Flaschenfuss), -inneren und des Flaschenhalses sowie dort, wo das Ventil in das Flaschengewinde greift. Für die visuelle Inspektion braucht der Prüfer ein spezielles Instrument, womit er die ganze Flaschenwand, inklusive Flaschenhals sehen kann.

Der hydrostatische Test und die visuelle Inspektion werden durch professionelle Techniker durchgeführt. Der Eigentümer der Flasche kann aber viel tun, um seine Tauchflasche in gutem Zustand zu halten. In erster Linie musst du sicherstellen, dass kein Wasser in die Flasche gelangt. Dies beinhaltet nicht nur, dass du immer etwas Druck in der Flasche lässt, sondern auch, dass du das Flaschenventil innen trocknest, bevor du die Flasche füllen lässt. Ein kleiner Luftstoss (indem du das Flaschenventil kurz öffnest) reicht dafür meistens aus. Normalerweise wird das vom Füllpersonal auch gemacht, es wird aber manchmal vergessen.



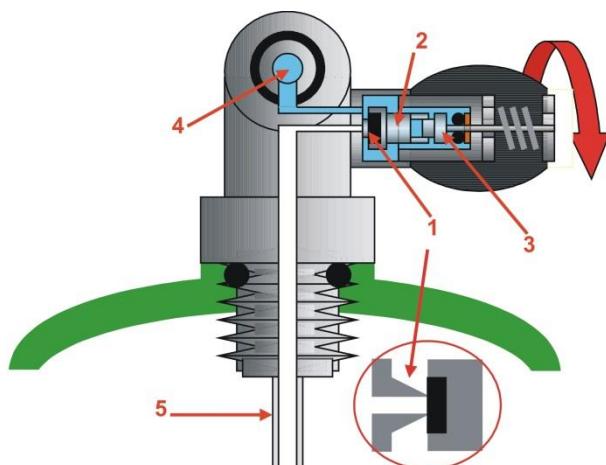
Beim Transport nach dem Tauchgang ist die Flasche manchmal unter Bergen von Anzügen und Tauchtaschen „begraben“. Das Wasser, das auf das Ventil tropft, bleibt dort und kann dieses auch nicht mehr verlassen. Beim Füllen wird das Wasser dann in die Flasche gedrückt und nach einigen Flaschenfüllungen kann sich eine erhebliche Menge Wasser akkumulieren. Dank der Konstruktion des Flaschenvents (eine kleine Röhre an dessen Ende) kann während des Tauchgangs kein Wasser in Tropfenform in den Lungenautomaten gelangen. Wasser in der Flasche führt aber sehr wohl zu Problemen. Wasser beschleunigt Korrosion im Flascheninneren und bei Tauchgängen in kaltem Wasser kann die erste Stufe wegen eintretendem Wasserdunst vereisen. Das Vereisen von Automaten diskutieren wir noch detailliert im Kapitel „Vereisung“.

Den Flaschenfuss solltest du von Zeit zu Zeit entfernen, um den unteren Teil der Flasche zu reinigen. Am grössten ist das Risiko von Korrosion am Flaschenäußersten, wo Wasser nicht leicht ablaufen kann und somit eine feuchte Umgebung während längerer Zeit besteht. Manche Taucher empfehlen, gar keine Flaschenfüsse einzusetzen, aber dies erhöht wiederum das Risiko, den Flaschenboden zu beschädigen. Man löst so ein Problem nur, indem man ein neues kreiert.

## Ventile

Die meisten Tauchflaschen und Ventile sind einfache Auf- und Zu-Ventile. Durch Hinzufügen oder entfernen eines „Inserts“, können sie entweder an einen DIN - oder INT (Bügel) Automaten angegeschlossen werden (Nummer 4).

Der Druck in der Flasche wird durch das Ventil (weich) blockiert, welches auf dem Sitz (hart, scharf) schliesst. (Nummer 1). Das Ventil ist Teil der „Unterspindel“ (Nummer 2), die mittels einer Art „Schraubenzieher“, der „Überspindel“ (Nummer 3), rein- und rausgeschraubt wird. Die Über-spindel wiederum ist mit dem Handrad verbunden.

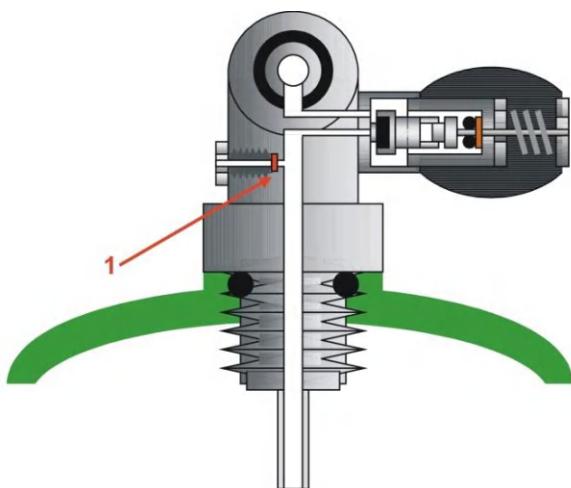


Bringt man ein geschlossenes Ventil ohne angeschraubten Automaten unter Wasser, füllt sich der ganze blau markierte Bereich mit Wasser. Ein Luftstoss beseitigt nur den Teil des Wassers, das sich in der „Richtung“ des Luftstroms befindet. Somit bleiben Salz, Schmutz und Mineralien im Ventil zurück, wodurch ein problemloser Betrieb gestört wird.

Dies ist vor allem ein Problem, wenn du mit einem Doppelabgang tauchst, aber nur eine erste Stufe anschliesst. Um Schäden am Ventil zu verhindern, musst du bei einem Doppelabgang immer zwei erste Stufen anschliessen, oder wenigstens das unbenützte Ventil mit einem waserdichten Stopfen verschliessen. Nicht nur wegen den Rückständen stellt Wasser im Ventil ein Problem dar, sondern auch, weil es beim Füllen in die Flasche gedrückt werden kann. Wie erwähnt führt Wasser in der Flasche zu Problemen durch Korrosion oder kann ein Vereisen der ersten Stufe (aufgrund von Wasserdunst) verursachen. Dank der kurzen Röhre unter dem Ventil (Nummer 5) gelangt das Wasser nicht in Tropfenform in die erste Stufe. Eine Flasche, die unter nasser "Tauchausstattung" begraben ist und deren Ventilöffnung nach oben zeigt, verursacht früher oder später dasselbe Problem.



Immer noch findest du viele Taucher, die ihr Flaschenventil nicht komplett öffnen. Früher war es üblich, die Flasche komplett zu öffnen und dann wieder eine viertel Umdrehung zu schliessen. Diese Angewohnheit stammt aus der Zeit, in der das Flaschenventil noch nicht in eine Über- und Unterspindel unterteilt war. Bei abnehmendem Flaschendruck (und kompletter Öffnung) konnten diese blockieren. Deswegen die Angewohnheit der „viertel Umdrehung zu“. Sehr selten findet man solche Ventile noch im Tauchsport und es ist nicht nötig, diese Technik bei neuen Ventilen anzuwenden. Öffne dein Flaschenventil immer vollständig.

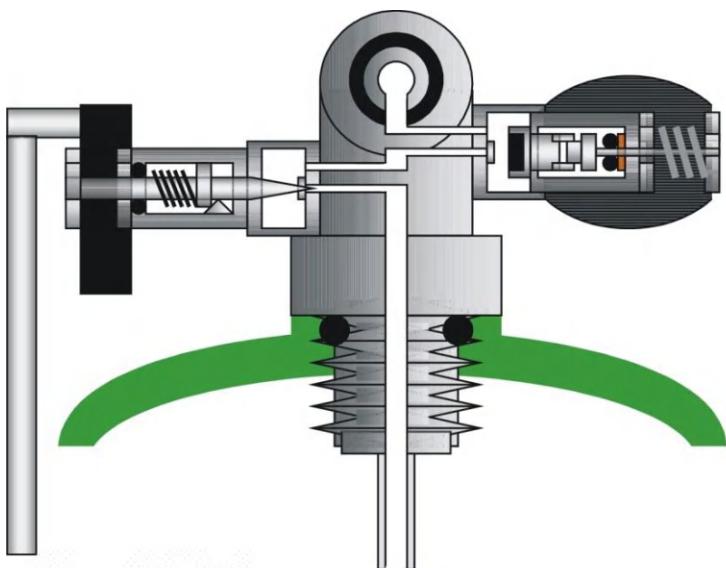


Einige Flaschen sind mit einer "Berstscheibe" (Nummer 1) ausgestattet. In Ländern, in denen hauptsächlich Aluminiumflaschen eingesetzt werden, ist dies oft gesetzlich vorgeschrieben. Die Berstscheibe hat für den Tauchgang keine Funktion. Sie existiert lediglich aus Sicherheitsgründen, um z.B. Feuerwehrleute zu schützen, falls ein Lagerraum mit Tauchflaschen Feuer fängt. Aluminium verliert seine Festigkeit bevor der O-Ring zwischen Flasche und Ventil schmilzt. Das Resultat ist ein explosiver Druckabbau. Bei Stahlflaschen schmilzt meistens der O-Ring, bevor der Stahl seine Festigkeit verliert.

Die Berstscheibe ist nur eine kleine Metallplatte, die bei ca. 15 % über dem Betriebsdruck der Tauchflasche bricht (berstet). Die Berstscheibe gibt eine kleine Bohrung frei, wodurch Luft aus der Flasche entweicht. Die Berstscheibe wird durch einen Stopfen am Platz gehalten. Zur Vereinfachung der Zeichnung oben ist das Loch am Ende des Stopfens gezeichnet, in Wirklichkeit aber sind die Löcher an der Seite zu finden. Die Druckreduktion durch mehrere Löcher gleichzeitig verhindert, dass die Flasche rollt. Berstscheiben sind in manchen Ländern gesetzlich vorgeschrieben. Andere Länder empfehlen sie für die sichere Lagerung von Aluminiumflaschen.

Im Sporttauchen sind Reserveventile (J-Ventile) selten geworden. Feuerwehrleute und Polizeitaucher, die in Gewässern ohne Sicht tauchen, bedienen sich ihrer manchmal noch. Grundidee ist, dass ein federbelasteter Kolben in den Luftweg drückt. Solange der Flaschendruck über der Federkraft liegt, fliesst die Luft ohne Einschränkung. Je niedriger der Flaschendruck wird, desto mehr drückt der Kolben in die Bohrung, wodurch der Durchgang der Luft verkleinert wird und somit der Atemwiderstand ansteigt.

Spürt der Taucher den erhöhten Atemwiderstand, weiss er, dass die Flasche beinahe leer ist und beendet den Tauchgang. Um den Tauchgang ohne den erhöhten Atemwiderstand zu beenden, zieht der Taucher den Hebel nach unten, wodurch der Kolben in die offene Position gezogen wird.



Einige Taucher verspüren den erhöhten Atemwiderstand nicht, andere vergessen den Hebel vor dem Tauchgang in die Position „oben“ zu drehen und einige Reserven können eine Fehlfunktion aufgrund einer ausgeleierten Feder haben oder gar in der offenen Position blockieren. All dies macht eine Reserveschaltung nicht sehr zuverlässig.

Beim Füllen einer Tauchflasche mit Reserveschaltung muss die Reserve in der „unten“ (offenen) Position sein. Ansonsten ist die Luftmenge in Litern pro Minute zu hoch, um durch eine reduzierte Bohrung fliessen zu können. Das bedeutet, dass das Ventil bald mit 200 bar „gefüllt“ ist, obwohl kaum Luft

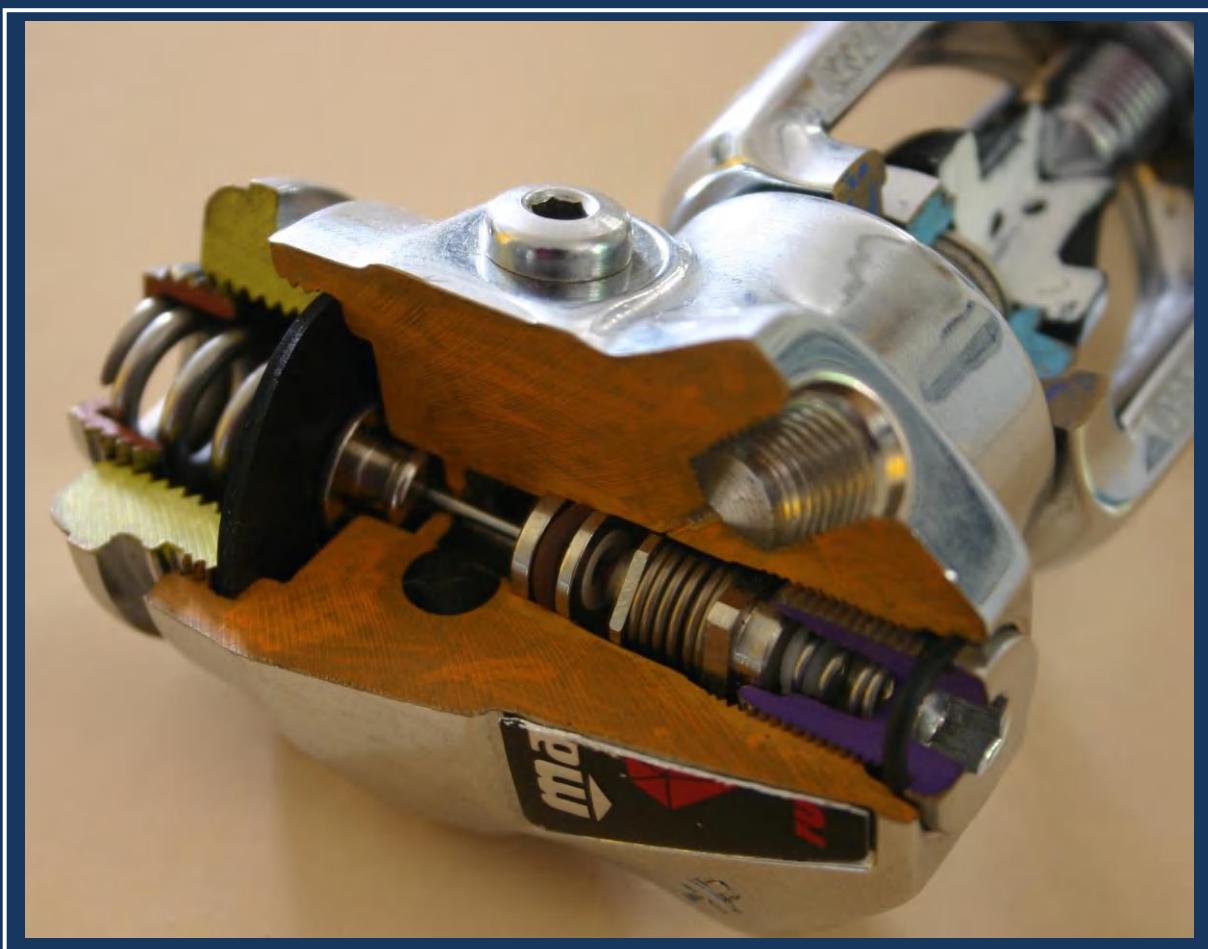
in die Flasche gelangte. Der Kompressor schaltet sich automatisch beim Enddruck ab und das Füllpersonal nimmt an, dass die Flasche voll ist, obwohl sie nicht gefüllt wurde. Die Reserveschaltung reduziert auch den Luftstrom im Flaschenventil, wodurch sowohl der Atemkomfort, als auch die Leistung des Lungenautomaten beeinträchtigt werden.

# Lungenautomaten

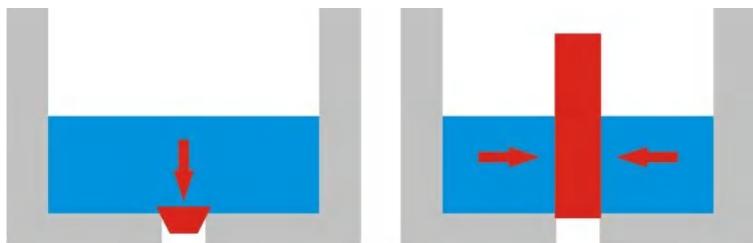
Lungenautomaten sind bestimmt für den Komfort und die Sicherheit der Taucher. Es gibt verschiedene Bauweisen und jede hat ihre eigenen Merkmale, Vorteile und Nachteile. Eine uninformede Auswahl kann nicht nur den Komfort des Tauchers negativ beeinflussen, sondern bringt auch ein Sicherheitsrisiko mit sich. Automaten müssen für die örtlichen Tauchbedingungen und die geplanten Tauchtiefen geeignet sein.

In diesem Abschnitt wird zuerst die Funktionsweise der vier verschiedenen Modelle von ersten Stufen erläutert. Aus diesen Erklärungen ergeben sich die Konsequenzen hinsichtlich der verschiedenen Bauweisen. Die drei Modelle der zweiten Stufen werden als nächstes behandelt. Für zweite Stufen ist es (im Gegensatz zu ersten Stufen) nicht möglich, klare Auswahlkriterien festzulegen. Aufgrund der Erklärungen der verschiedenen Merkmale wird aber Schritt für Schritt klar werden, was bei unterschiedlichen Bedingungen wichtig ist.

Das Kapitel wird mit einer Erklärung über das Vereisen von Lungenautomaten abgeschlossen. Nach dieser Erklärung folgen die Auswahlkriterien für Lungenautomaten, die in kalten Gewässer benutzt werden.



## Erste Stufen

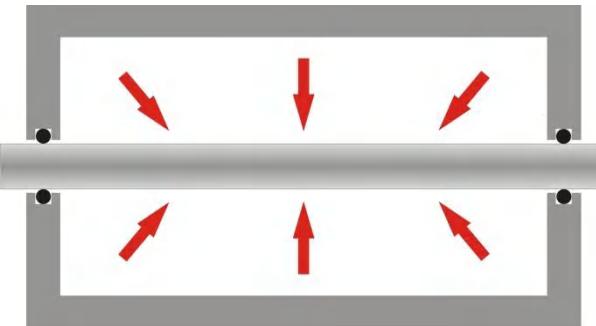


Um die Funktionsweise der ersten Stufen zu verstehen, schauen wir uns als erstes einige grundlegende Prinzipien an. Wir betrachten zu diesem Zweck Kräfte als axiale und radiale Kräfte. Axial bedeutet: "In der Achse der Bewegung" und radial bezieht sich auf eine Kraft, die waagrecht auf die Bewegungsrichtung wirkt. Eine Kraft, die einen Winkel zwischen den beiden

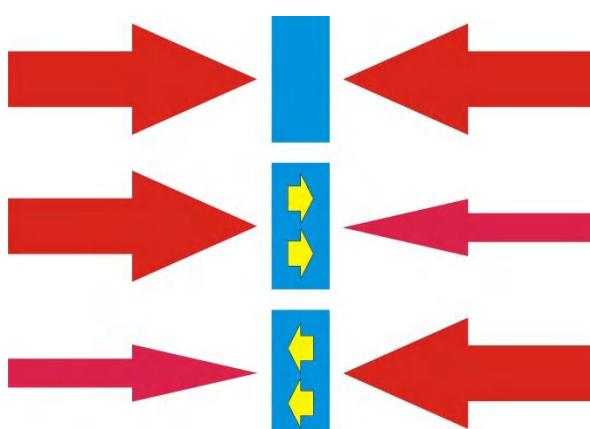
Richtungen einnimmt, können wir immer in eine axiale und eine radiale Komponente aufteilen.

Auf der Zeichnung siehst du ein Wasserbecken, das am Boden verschlossen ist. Links mit einem Stopfen, der vollständig unter Wasser ist und rechts durch ein Rohr mit einem konstanten Durchmesser. Links drückt das Gewicht der Wassersäule „in der Bewegungsrichtung“, weil der Stopfen eine Oberfläche hat, worauf das Gewicht des Wassers einwirken kann. Rechts haben wir es mit einer radialen Kraft zu tun. Das Wassergewicht ist das gleiche wie links, es fehlt aber eine axiale Angriffsfläche.

Das Rohr ist von Wasser umgeben. Jede Kraft, die auf das Rohr wirkt, hat genau eine gegenüberliegende Kraft der gleichen Stärke. Somit wird weder eine Bewegung unterstützt noch behindert. Links gibt es aber sehr wohl einen Unterschied in der Kraft, die nötig ist, um den Stopfen herausziehen zu können. Diese Kraft ist proportional zur Höhe der Wassersäule im Wasserbecken. Das gleiche gilt für eine luftgefüllte Hochdruckkammer. Die Luft, die den Metallstab umgibt, findet keine Oberfläche, welche die Bewegung des Stabes unterstützt oder behindert. Es gibt keine Angriffsfläche in axialer Richtung.

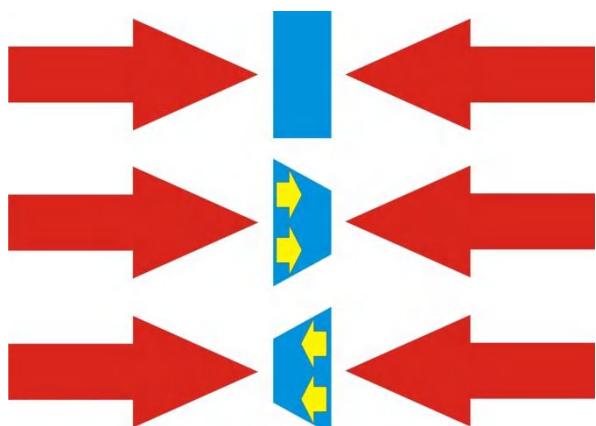


Egal wie hoch der Druck in der Kammer ist, der Metallstab bewegt sich weder nach links noch nach rechts. Die Bewegung des Stabes wird durch den Druck weder behindert noch unterstützt. Dies ändert sich aber, wenn sich der Durchmesser des Stabes über die Gesamtlänge verändert. In dem Fall würde sich der Stab in die Richtung des grössten Durchmessers des Metallstabes bewegen.



Ein anderes, grundlegendes physikalisches Prinzip ist, dass sich zwei gegenüberliegende Kräfte gleicher Stärke aufheben. Dieses Prinzip verwenden membrangesteuerte erste Stufen, deren Funktionsweise völlig anders ist, als bei kolbengesteuerten ersten Stufen.

Zwei gleich grosse gegenüberliegende Kräfte, die auf eine Oberfläche gleicher Grösse wirken, heben sich gegenseitig auf – es entsteht keine Bewegung und die Summe der Kräfte ist Null. Ist die Kraft von links grösser als von rechts und beide wirken wiederum auf eine Oberfläche gleicher Grösse ein, gibt es eine Bewegung nach rechts. Die resultierende Kraft ist



gleich der Kraft von links minus der Kraft von rechts. Ist die Kraft von rechts grösser und die Oberfläche immer noch gleich, wird die resultierende Kraft nach rechts einsetzen.

Wirkt auf beide Flächen der gleiche Druck, aber auf unterschiedlich grosse Flächen (ausgedrückt in  $\text{mm}^2$ ), entsteht eine Bewegung. Die resultierende Kraft ist gleich der Druck von links multipliziert mit der Oberfläche von links und davon abgezogen der Druck von rechts mal die Oberfläche von rechts. Zum Beispiel:  $200 \text{ bar} \times 20 \text{ mm}^2 - 200 \text{ bar} \times 10 \text{ mm}^2 = 4.000 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2 - 2.000 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2 = 2.000 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2$

als resultierende Kraft. (Korrekterweise eigentlich in Newton ausgedrückt  $1 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2 = 0,1 \text{ Newton}$ ).

Theoretisch ist es möglich, dass sich zwei ungleich grosse Drücke gegenseitig aufheben, indem die Oberfläche, auf die sie wirken, unterschiedlich gross ist. Zum Beispiel:  $100 \text{ bar} \times 20 \text{ mm}^2 - 200 \text{ bar} \times 10 \text{ mm}^2 = 2.000 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2 - 2.000 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2 = 0 \text{ bar} \cdot \text{mm}^2$ . Wegen dem sich verändernden Flaschendruck wird dieses Prinzip in der Praxis nicht oft eingesetzt. Merke dir einfach: Kraft ist das Ergebnis der Multiplikation von Druck und Oberfläche.



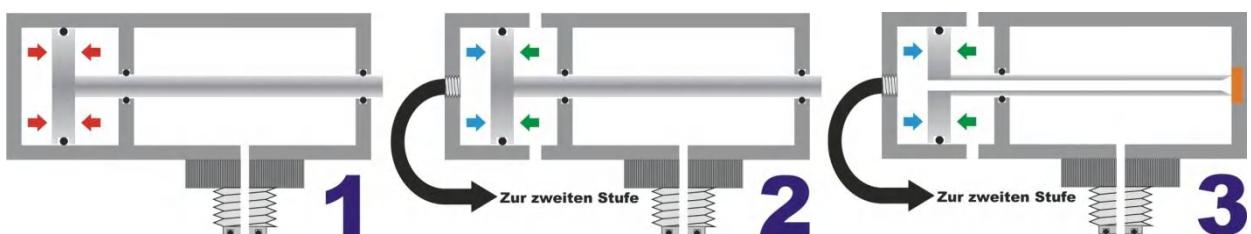
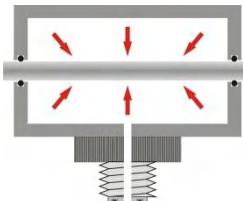
Das Verständnis dieser zwei grundlegenden Prinzipien ermöglicht es dir, die Funktionsweisen von ersten Stufen und vielen anderen Ausrüstungsgegenständen zu verstehen. Es gibt nur vier grundlegende Typen von ersten Stufen, aber für jede gibt es eine ganze Reihe von Zusätzen. Die vier grundlegenden Typen sind: balancierte kolbengesteuerte erste Stufe, unbalancierte (traditionelle) kolbengesteuerte erste Stufe, balancierte membrangesteuerte erste Stufe und unbalancierte membrangesteuerte erste Stufe.

Obwohl es membrangesteuerte erste Stufen schon viel länger gibt, schauen wir uns zuerst kolbengesteuerte erste Stufen an. Kolbengesteuerte erste Stufen wurden 1963 (unbalancierte) und 1965 (balancierte) eingeführt. Damals waren sie ein kostengünstiger und einfacher Weg, erste Stufen für das Tauchen herzustellen. Du erkennst kolbengesteuerte erste Stufen daran, dass sie Bohrungen haben, durch welche Wasser in die Umgebungsdruckkammer eindringt (solange die Löcher nicht unter einem Plastik-, Neopren-, oder Silikonschutz verborgen sind).



Um die Funktionsweise einer kolbengesteuerten, balancierten ersten Stufe zu verstehen gehen wir auf die Zeichnung zurück, die sich in der Einleitung über erste Stufen befindet. Diese "erste Stufe" ist mit einem DIN Ventil an die Flasche angeschlossen. Bei offener Flasche ist der Kammerdruck in der ersten Stufe identisch zum Flaschendruck. Daher auch der Name: "Hochdruckkammer".

In der Hochdruckkammer gibt es keine Fläche, in der der Druck in axialer Richtung arbeiten kann, es gibt nur radial liegende Oberflächen. Der Flaschendruck hat keinen Einfluss auf die Bewegung des Metallstabes – dem Kolben.



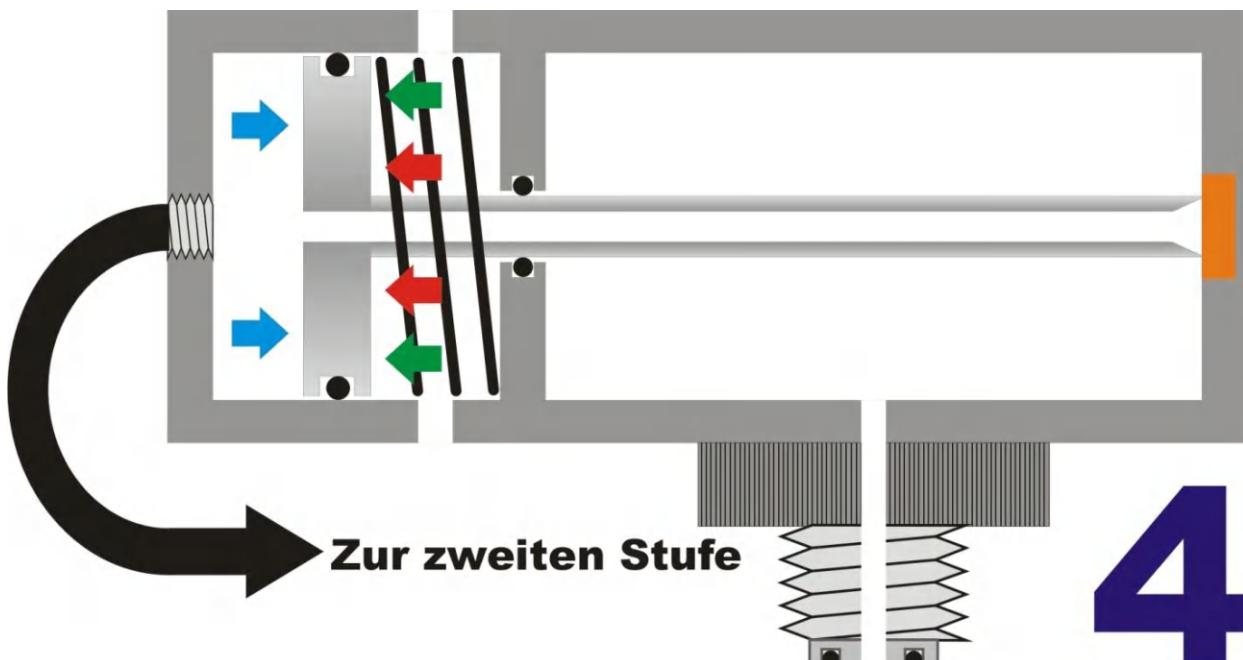
In **Abbildung 1** fügen wir eine zweite Kammer zu unserer "ersten Stufe" hinzu und geben unserem einfachen Metallstab die Form eines „echten“ Kolbens einer ersten Stufe. Der Kolben muss mit einem O-Ring abgedichtet sein, wodurch nun die neue Kammer in zwei Teile geteilt ist. Beide Seiten des Kolbens in der "neuen" Kammer haben eine Oberfläche, auf die der Druck in axialer Richtung wirkt. In dieser besteht kein Hochdruck (Flaschendruck), da ein O-Ring den Durchgang zwischen Hochdruckkammer und „neuer“ Kammer abdichtet. In Abbildung 1 ist der Druck in der "neuen" Kammer nicht definiert, aber es ist sicher, dass der Druck auf beiden Seiten des Kolbens ungefähr gleich ist. Auf beiden Seiten des Kolbens gibt es eine axiale Fläche von beinahe gleicher Grösse, auf die der Druck wirkt. Der Kolben bewegt sich also so weit, bis auf beiden Seiten der Fläche der gleiche Druck herrscht.

In **Abbildung 2** bohren wir nun drei Löcher in die "neue" Kammer und schliessen eine zweite Stufe am äussersten linken Loch an. Die anderen zwei Löcher stehen in Verbindungen mit dem Umgebungsdruck. Der Druck innerhalb der zwei Teile der "neuen" Kammer ist nun definiert. Der Druck in der Kammer mit den grünen Pfeilen ist gleich dem Aussendruck – an der Oberfläche 1 bar. Ist dies nicht der Fall, bewegt sich der Kolben bis beide Drücke bei Umgebungsdruck gleich sind. Atmest du von der zweiten Stufe ein, ziehst du den Kolben nach links. Die zwei Teile der "neuen" Kammer haben somit einen Namen: Der Teil mit den Löchern erlaubt es dem Umgebungsdruck in die erste Stufe zu gelangen, also in die "Umgebungsdruckkammer" (oder Wasserkammer). Die linke Kammer hat den gleichen Druck wie der Schlauch, der zur ersten Stufe führt und somit den Druck zwischen der ersten und der zweiten Stufe. Dies ist der so genannte "Mitteldruck" und die Kammer heisst somit „Mitteldruckkammer“.

In **Abbildung 3** verändern wir den Kolben. Statt eines Metallstabes, der aus der Hochdruckkammer herausragt, ist er nun röhrenförmig. Die Bohrung im Kolben erlaubt es dem Atemgas von der Hochdruckkammer zur Mitteldruckkammer zu gelangen. Das äusserste rechte Ende des Kolbens ist nun eine scharfe Kante, ein Sitz, der auf einem Ventil schliesst (das aus einem weicheren Material gefertigt ist, wie zum Beispiel Teflon). Da das scharfe Material auf der Innenseite "eingeschnitten" ist, ist der externe Durchmesser auf der Seite des Sitzes gleich gross wie der externe Durchmesser am anderen Ende der Hochdruckkammer. Der Flaschendruck hat keinen Einfluss auf die Bewegung des Kolbens.

Atmet der Taucher ein, wird der Kolben nach links gezogen. Der Sitz hebt sich somit vom Ventil weg, wodurch Luft von der Hochdruckkammer zu Mitteldruckkammer fliesst und von da zum Mitteldruckschlauch und zur zweiten Stufe. Hört der Taucher auf einzutauen, wird sich der Kolben in die geschlossene Position begeben, sobald der Druck in der Mitteldruckkammer gleich dem Druck in der Umgebungsdruckkammer ist. Wir haben nun eine funktionierende erste Stufe, aber der Mitteldruck beträgt nur 1 bar (an der Oberfläche). Wie schon im Anfängerkurs gelernt, ist der Mitteldruck höher. Also müssen wir etwas zur ersten Stufe hinzufügen, damit wir einen höheren Mitteldruck erhalten.

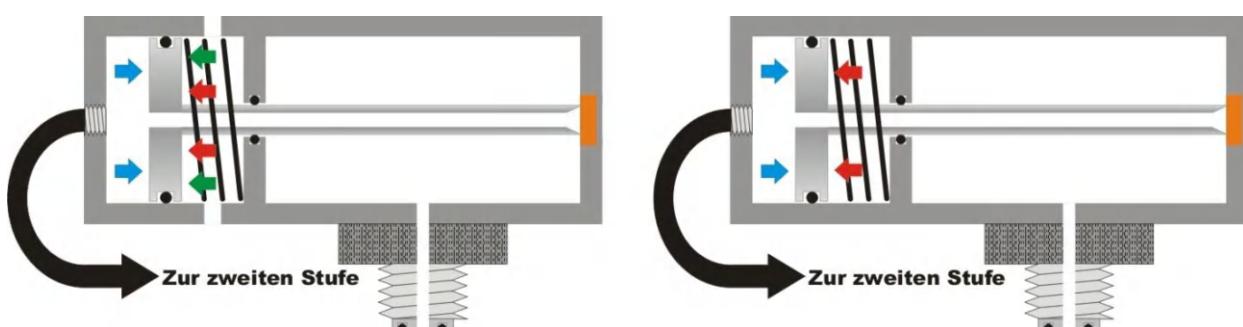
Wir fügen eine Feder in die Mitteldruckkammer ein (**Abbildung 4**). Diese Feder unterstützt den Umgebungsdruck bei der „Öffnung“ des Kolbens. Der Druck in der Mitteldruckkammer muss also höher sein,



um den Kolben wieder zu „schließen“. Der Druck in der Mitteldruckkammer muss gleich hoch sein, wie der Umgebungsdruck plus der Kraft, die die Feder auf den Kolben ausübt.

$$\text{MP}_{\text{(Mitteldruck)}} = \text{P}_{\text{Feder}} + \text{P}_{\text{Umgebung}}$$

Gilt diese Formel, handelt es sich um eine so genannte „balancierte erste Stufe“. Kommt eine Variable (positiv oder negativ) zur Formel hinzu (zum Beispiel Flaschendruck), ist die erste Stufe „unbalanciert“. Eine balancierte erste Stufe hat, unabhängig vom Flaschendruck, immer den gleichen Atemkomfort. „Kompensiert“ bezieht sich auf etwas anderes. Dies heißt nur, dass der Aussendruck den Mitteldruck beeinflusst (der grüne Teil in der Formel). Alle heutigen ersten Stufen sind kompensiert.



$$\text{MP}_{\text{(Mitteldruck)}} = \text{P}_{\text{Feder}} + \text{P}_{\text{Umgebung}}$$

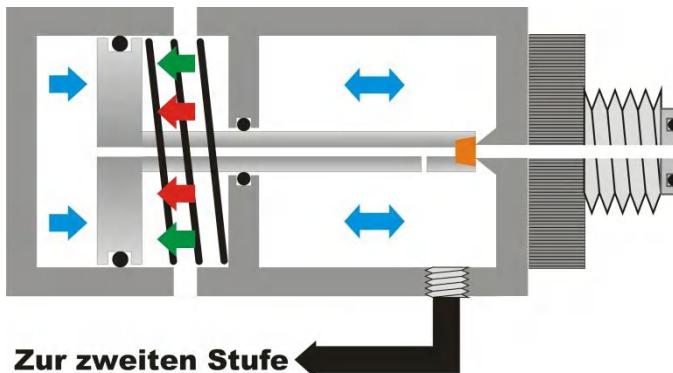
**Kompensiert**

$$\text{MP}_{\text{(Mitteldruck)}} = \text{P}_{\text{Feder}}$$

**Nicht kompensiert**

Um die richtige Funktionsweise der zweiten Stufe zu gewährleisten, muss der Mitteldruck 1 bar pro 10 Meter Tiefe zunehmen, weil der Druck in der zweiten Stufe auch in diesem Verhältnis zunimmt. Bleibt der Mitteldruck unabhängig vom Umgebungsdruck gleich, übersteigt der Umgebungsdruck in einer gewissen Tiefe den Mitteldruck und statt Luft abzugeben wird jetzt Wasser in die zweite Stufe eindrin-

gen. Der Atemkomfort nimmt bei einem unkomponierten Lungengenomaten mit zunehmender Tiefe ab.



druckkammern ist gleich gross, weil beide durch die Kolbenbohrung verbunden sind. Der Flaschen-

Eine unbalancierte kolbengesteuerte erste Stufe ist anders aufgebaut, aber die meisten Teile kennen wir schon von der balancierten kolbengesteuerten ersten Stufe. Ein grosser Unterschied ist die Abwesenheit einer grossen Hochdruckkammer. Der Sitz befindet sich am Hochdruckeingang der ersten Stufe und blockiert den Durchgang des Hochdrucks. Wir haben jetzt "zwei" Mitteldruckkammern. Eine rechts, wo die zweite Stufe angeschlossen ist und die zweite links hinter dem Kolben. Der Druck in beiden Mitteldruckkammern ist gleich gross, weil beide durch die Kolbenbohrung verbunden sind. Der Flaschen-

druck wirkt nun in axialer Richtung und hat somit einen Einfluss auf die Kolbenbewegung. Die Formel für einen balancierten Lungengenomaten gilt nicht mehr:

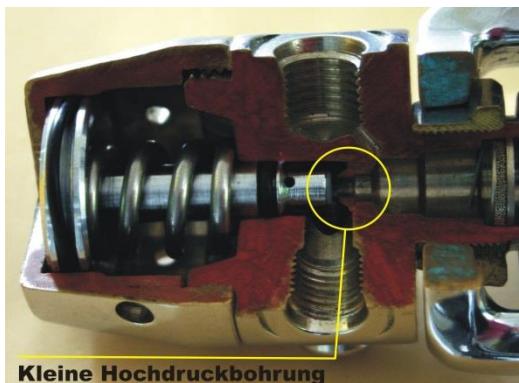
$$MP_{\text{(Mitteldruck)}} \neq P_{\text{Feder}} + P_{\text{Umgebung}}$$

Wie bringen wir nun den Flaschendruck in die Formel? Die Bohrung vor dem Hochdrucksitz ist sehr klein, verglichen mit der gegenüberliegenden Seite des Kolbens. Wenden wir an, was wir bei der Einleitung über erste Stufen gelernt haben:  $10 \text{ bar} \times 500 \text{ mm}^2 - 200 \text{ bar} \times 3 \text{ mm}^2 = 5.000 \text{ bar.mm}^2 - 600 \text{ bar.mm}^2 = 4.400 \text{ bar.mm}^2$  Oder: Der Mitteldruck in der linken Kammer multipliziert mit der Oberfläche der linken Kolbenseite minus dem Flaschendruck mal der Oberfläche des Hochdrucksitzes. Das Resultat ist die fehlende Kraft, um den gewünschten Mitteldruck aufzubauen (in diesem Beispiel 10 bar). Der Umgebungsdruck und die Federkraft müssen also zusammen diese Kraft aufbauen. Dies bedeutet, dass der Flaschendruck der Feder beim Öffnen des Kolbens "hilft". Die Federkraft könnte also kleiner sein als die Federkraft eines balancierten Lungengenomaten mit dem gleichen Mitteldruck.

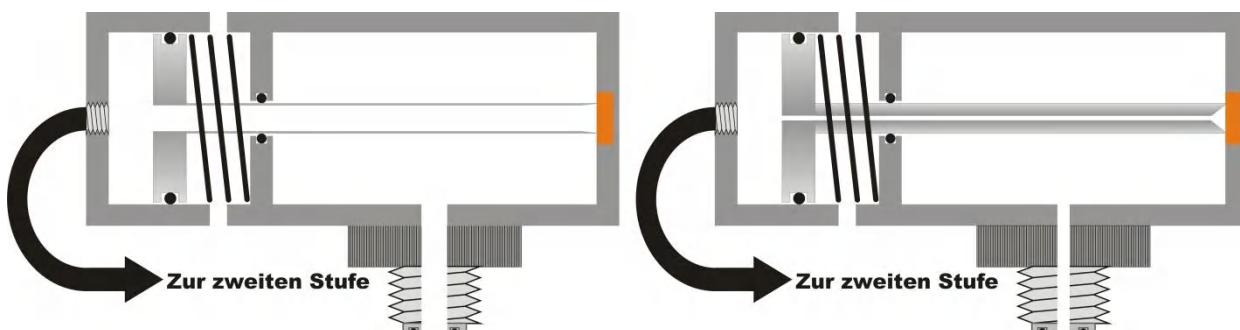
Das Grundproblem ist der variierende Flaschendruck. Schauen wir uns die Gleichung am Ende des Tauchgangs an (wenn der Taucher nur noch 10 bar Luft in der Flasche übrig hat):  $10 \text{ bar} \times 500 \text{ mm}^2 - 10 \text{ bar} \times 3 \text{ mm}^2 = 5.000 \text{ bar.mm}^2 - 30 \text{ bar.mm}^2 = 4.970 \text{ bar.mm}^2$ . Somit bräuchten wir also eine Feder mit einer unterschiedlichen Kraft (570 bar.mm<sup>2</sup> oder 57 Newton mehr), um den Mitteldruck bei 10 bar zu halten. Die Notwendigkeit einer unterschiedlichen Federkraft wird bei nahezu allen unbalancierten ersten Stufen ignoriert. Dies führt zu Änderungen des Mitteldrucks während des Tauchgangs. Die Formel für eine unbalancierte erste Stufe lautet somit:

$$MP_{\text{(Mitteldruck)}} = P_{\text{Feder}} + P_{\text{Umgebung}} + (x \cdot P_{\text{Flasche}})$$

Je grösser X in der Formel ist, desto grösser ist der Unterschied des Mitteldrucks zwischen dem Anfang und dem Ende des Tauchgangs. Um X so klein als möglich zu halten, sollte der Durchmesser des Sitzes (3 mm<sup>2</sup> in dem gegebenen Beispiel) so schmal als möglich sein. Der Entwickler ist also gezwungen einen Kompromiss einzugehen. Er kann sich für eine kleine Abweichung im Mitteldruck entscheiden, hat so aber einen eingeschränkten Luftstrom (eine kleine Öffnung für das Atemgas) oder er kann den grösseren Luftstrom wählen (eine grosse Öffnung für das Atemgas), hat somit aber eine grössere Abweichung des Mitteldrucks. Je mehr sich der Mitteldruck während des Tauchgangs ändert, desto schlechter wird mit sinkendem Flaschendruck auch der Atemkomfort.

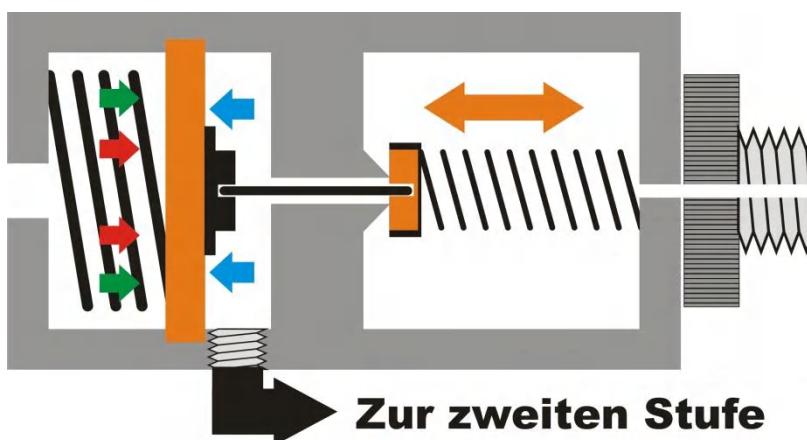


Um die Änderung des Atemkomforts in akzeptablen Grenzen zu halten, produzieren die Hersteller unbalancierte klobengesteuerte erste Stufen mit einer kleinen Hochdruckbohrung. Die verfügbare Öffnung erlaubt einen ausreichenden Luftstrom, zumindest in geringen Tiefen. Wenn dieser Typ erster Stufen in grossen Tiefen eingesetzt wird, um den Hauptautomaten, Inflator und Oktopus zu versorgen, ist es fraglich, ob die erste Stufe dem Taucher genügend Atemgas liefern kann. Deshalb werden unbalancierte erste Stufen nicht für grössere Tiefen empfohlen und normalerweise nur für Trainingszwecke im Schwimmbad oder in begrenzten Tiefen eingesetzt. Unbalancierte klobengesteuerte erste Stufen sind billig und sehr leicht zu warten. Deswegen besteht immer noch Bedarf für sie. Man muss aber immer sicherstellen, dass sie unter solchen Tauchbedingungen eingesetzt werden, wofür sie konstruiert wurden.



Bei balancierten klobengesteuerten Lungentautomaten muss kein Kompromiss eingegangen werden. Egal wie gross der Hochdruckeingang oder die Kolbenbohrung ist; die Formel um den Mitteldruck zu berechnen bleibt dieselbe.

$$MP_{\text{(Mitteldruck)}} = P_{\text{Feder}} + P_{\text{Umgebung}}$$



Membrangesteuerte erste Stufen haben den Vorteil, dass die beweglichen (dynamischen) Teile des Lungentautomaten nicht mit Wasser in Berührung kommen. Wasser dringt nur bis zur flexiblen Membrane (in orange) ein. In dieser unbalancierten membrangesteuerten ersten Stufe gibt es keine dynamischen O-Ringe. Atmet der Taucher durch die zweite Stufe ein, biegt sich die Membrane nach innen, die Nadel wird nach unten gedrückt und das Ventil öffnet sich. Das Atemgas kann jetzt aus der Hochdruckkammer (oranger Pfeil) zur Mitteldruckkammer (blauer Pfeil) und dann zur zweiten Stufe strömen. Hört der Taucher auf einzutauen, baut sich der Druck in der Mitteldruckkammer auf und die Membrane biegt sich wieder in die Ausgangsposition zurück.

unten gedrückt und das Ventil öffnet sich. Das Atemgas kann jetzt aus der Hochdruckkammer (oranger Pfeil) zur Mitteldruckkammer (blauer Pfeil) und dann zur zweiten Stufe strömen. Hört der Taucher auf einzutauen, baut sich der Druck in der Mitteldruckkammer auf und die Membrane biegt sich wieder in die Ausgangsposition zurück.

Ein grosser Unterschied zu klobengesteuerten ersten Stufen ist, dass der Hochdruck nicht in der gleichen Richtung wie die Feder wirkt, sondern entgegengesetzt dazu. In bar ausgedrückt sieht die Formel dann so aus:

$$MP_{\text{(Mitteldruck)}} = P_{\text{Feder}} + P_{\text{Umgebung}} - (x \cdot P_{\text{Flasche}})$$

Deswegen steigt der Mitteldruck mit sinkendem Flaschendruck, umgekehrt also zur unbalancierten klobengesteuerten ersten Stufe. Als nächstes definieren wir X. Wenn die Oberfläche des Sitzes 20 mm<sup>2</sup> und die Öffnung von Hochdruckkammer zu Mitteldruckkammer einen Durchmesser von 4 mm<sup>2</sup> hat, lautet die komplette Gleichung in Newton (Kräftegleichgewicht):

$$MP \cdot 500\text{mm}^2 = P_{\text{Feder}} \cdot 500\text{mm}^2 + P_{\text{Umgebung}} \cdot 500\text{mm}^2 + P_{\text{Mitteldruck}} \cdot 4\text{mm}^2 + P_{\text{Flasche}} \cdot 16\text{mm}^2 - P_{\text{Flasche}} \cdot 20\text{mm}^2$$

Der Einfluss des Mitteldrucks, der auf die Oberfläche der Öffnung zwischen Hochdruckkammer und Mitteldruckkammer (hier 4 mm<sup>2</sup>) wirkt, ist sehr beschränkt, und zur Vereinfachung vernachlässigen wir diesen Term. Für den Term mit dem Flaschendruck sind wir nur an dem Unterschied zwischen der positiven und negativen Kraft interessiert (wiederum in diesem Beispiel 16 mm<sup>2</sup> minus 20 mm<sup>2</sup> = - 4 mm<sup>2</sup>). Die vereinfachte Formel lautet:

$$MP \cdot 500\text{mm}^2 = P_{\text{Feder}} \cdot 500\text{mm}^2 + P_{\text{Umgebung}} \cdot 500\text{mm}^2 - P_{\text{Flasche}} \cdot (\text{Durchmesser MP-HP Passage})$$

Und in unserem Beispiel:

$$MP \cdot 500\text{mm}^2 = P_{\text{Feder}} \cdot 500\text{mm}^2 + P_{\text{Umgebung}} \cdot 500\text{mm}^2 - P_{\text{Flasche}} \cdot 4\text{mm}^2$$

## Konsequenzen für die Einstellung

*Der Techniker muss wissen, welchen Typ einer ersten Stufe er einstellt. Die zweite Stufe muss gegen den höchsten Mitteldruck schliessen können, den die erste Stufe liefert.*

*Eine unbalancierte membrangesteuerte erste Stufe muss bei geringem Flaschendruck eingestellt werden (nur knapp über dem gewünschten Mitteldruck). Wird dieser Typ erster Stufe bei voller Flasche eingestellt, wird sie gegen Ende des Tauchgangs abblasen.*

*Das Gegenteil erfolgt bei nicht balancierten klobengesteuerten ersten Stufen: Diese müssen mit einer vollen Flasche eingestellt werden. Eine Einstellung mit beinahe leerer Flasche wird zum Abblasen führen, wenn der Lungenautomat an eine volle Flasche angeschlossen wird.*

*Bei balancierten ersten Stufen spielt der Flaschendruck bei der Einstellung überhaupt keine Rolle (solange der Flaschendruck über dem gewünschten Mitteldruck liegt).*



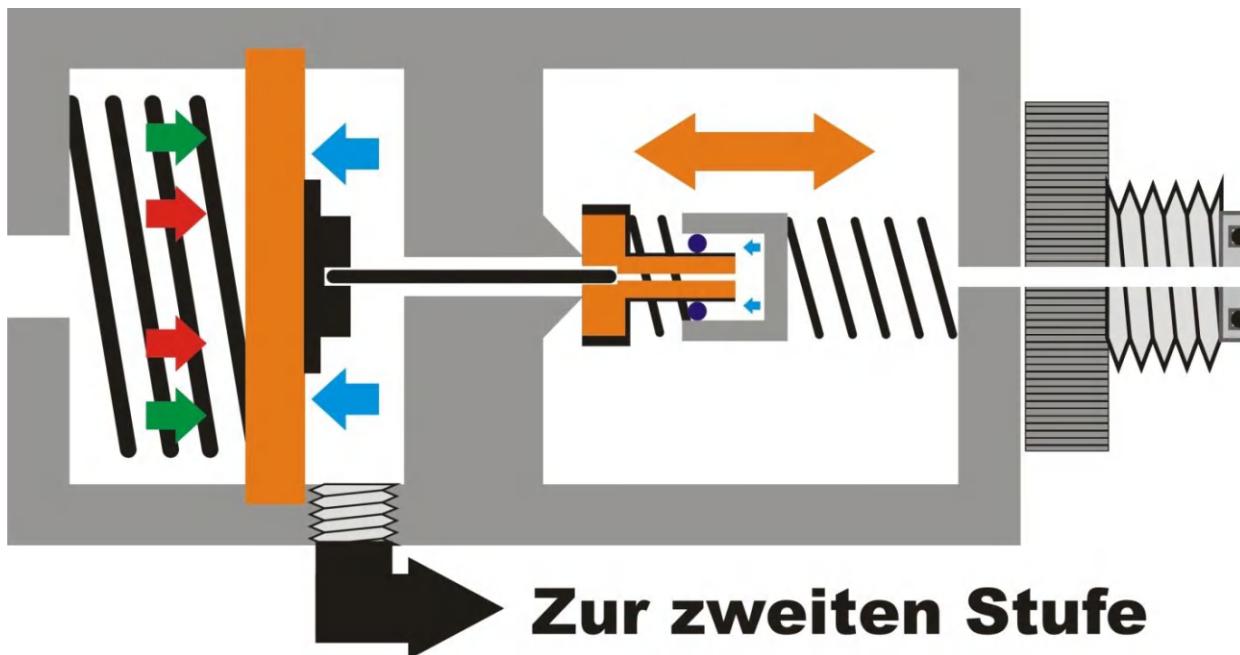
Unbalancierte membrangesteuerte erste Stufen sind selten. Einige Modelle werden noch getaucht und ein oder zwei Hersteller produzieren diesen Typ von erster Stufe noch. Nahezu jede membrangesteuerte erste Stufe, die du in Tauchgeschäften findest, ist allerdings balanciert. Dafür gibt es zwei Gründe. Erstens, erlauben die heutigen Präzisionsbohrungen eine viel einfachere Herstellung und zweitens, haben unbalancierte membrangesteuerte erste Stufen oft keine lange Lebensdauer.



Die membrangesteuerte erste Stufe wurde in den neunziger Jahren die beliebteste erste Stufe im Sporttauchen. Sogar Hersteller mit einer langen Tradition in der Produktion von klobengesteuerten ersten Stufen führen nun membrangesteuerte erste Stufen in ihrem Sortiment. Der grosse Vorteil dieser ersten Stufe ist, dass kein Wasser in die beweglichen Teile des Automaten eindringt. Salz, Minerale, Sand und Schmutz können nicht in die erste Stufe gelangen und der Materialverschleiss reduziert sich.

Balancierte membrangesteuerte erste Stufen unterliegen der gleichen Formel wie balancierte klobengesteuerte erste Stufen. Das ganze wird aber mit einer anderen Technik erreicht.

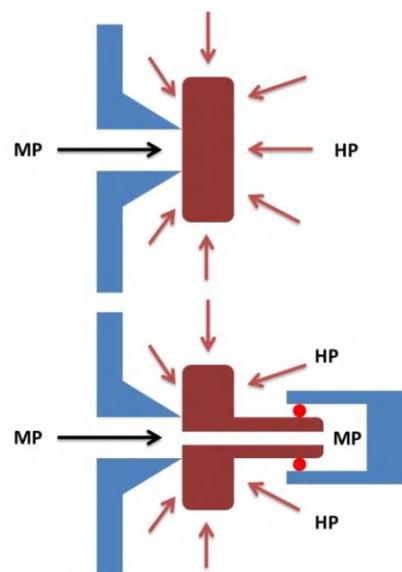
$$\mathbf{MP}_{\text{(Mitteldruck)}} = \mathbf{P}_{\text{Feder}} + \mathbf{P}_{\text{Umgebung}}$$



Auf den ersten Blick sind membrangesteuerte erste Stufen komplizierter aufgebaut. Erinnern wir uns einfach an die Einführung über erste Stufen, dann ist ihr Aufbau leicht verständlich. Die balancierte membrangesteuerte erste Stufe ist nahezu identisch mit der unbalancierten membrangesteuerten ersten Stufe, aber anstatt eines flachen Ventils, ist ein Ventil mit einer Bohrung vorhanden.

Der Eingang des Hochdrucks, der Anschluss an die zweite Stufe und andere Mitteldruckabgänge sind an der gleichen Stelle zu finden, wie bei unbalancierten membrangesteuerten ersten Stufen. Die Funktionsweise dieser ersten Stufe basiert darauf, dass sich gegenüberliegende Kräfte gleicher Stärke gegenseitig aufheben.

Der kleine Kolben hat einen Durchgang zu einer Mitteldruckkammer (oder Balancierungskammer). Der erste Teil der Bohrung ist gross genug, sodass die Nadel eindringen kann; der zweite Teil ist aber kleiner und verhindert, dass die Nadel durch den Kolben durchfällt. Der Durchmesser der Balancierungskammer ist der



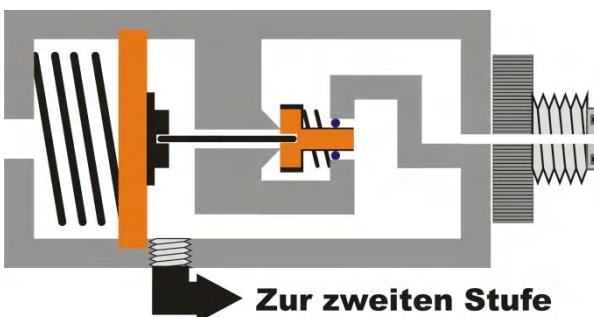
gleiche, wie der Durchmesser der Bohrung zwischen Hochdruck- und Mitteldruckkammer. Das heisst, dass der Teil des kleinen Kolbens, der seitlich vom Sitz weg ragt, ober- und unterhalb die gleiche Oberfläche haben muss. Das ergibt die folgende vollständige Formel für eine balancierte membrangesteuerte erste Stufe (angenommen der Durchmesser zwischen Hoch- und Mitteldruckkammer ist 8 mm<sup>2</sup> und der kleine Kolben ragt 10 mm<sup>2</sup> über den Sitz hinaus):

$$MP \cdot 500mm^2 = P_{Feder} \cdot 500mm^2 + P_{Umgebung} \cdot 500mm^2 + P_{Mitteldruck \cdot 8mm^2} - P_{Mitteldruck \cdot 8mm^2} + P_{Flasche \cdot 10mm^2} - P_{Flasche \cdot 10mm^2}$$

Da sich gleich grosse Kräfte gegenseitig aufheben, erhalten wir nach dem Kürzen gleicher Oberflächen und gleicher Kräfte dieselbe Formel, wie für balancierte kolbengesteuerte erste Stufen.

$$MP \cdot 500mm^2 = P_{Feder} \cdot 500mm^2 + P_{Umgebung} \cdot 500mm^2 + P_{Mitteldruck \cdot 8mm^2} - P_{Mitteldruck \cdot 8mm^2} + P_{Flasche \cdot 10mm^2} - P_{Flasche \cdot 10mm^2}$$

$$MP_{(Mitteldruck)} = P_{Feder} + P_{Umbgebung}$$



Um die Präzisionsansprüche bei der Herstellung des kleinen Kolbens zu minimieren, verwenden manche Hersteller einen anderen Weg, um den Mitteldruck zur Balancierungskammer zu leiten. Statt durch einen kleinen Kolben wird eine Verbindung um den Hochdrucksitz herum konstruiert.

Die Kriterien für die balancierte erste Stufe bleiben gleich. Der Durchmesser der Bohrung der Hochdruckkammer zur Mitteldruckkammer muss den gleichen Durchmesser haben wie der Teil des Kolbens, der in die Balancierungskammer hineinragt. Der Teil des Kolbens, der über das Ventil herausragt, muss oben und unten den gleichen Durchmesser haben. Im Prinzip ist der einzige Unterschied die Art und Weise, wie der Mitteldruck zur Balancierungskammer geführt wird. Trotzdem haben wir immer noch einen balancierten Lungenautomaten.

Die Qualität von ersten Stufen ist einfach zu definieren und kann auf einer Testbank gemessen werden. Die Kriterien von ersten Stufen sind hohe Luftlieferleistung, Stabilität des Mitteldrucks bei jeder Beanspruchung und lange Lebensdauer.

- Hohe Luftlieferleistung wird für die zweite Stufe (also für den Taucher) und zusätzliche Ausrüstung benötigt und zwar auf jeder Tiefe und für jeden Bedarf.
- Stabilität des Mitteldrucks auf jeder Tiefe und für jede Luftlieferleistung gewährleistet einen konstanten Atemkomfort für den Taucher.
- Lange Lebensdauer verhindert Fehlfunktionen der ersten Stufe und stellt sicher, dass sich der Taucher lange an ihr erfreuen kann.

Eine erste Stufe, die eine der oben genannten Kriterien nicht erfüllt, kann nicht als eine erste Stufe mit hoher Qualität angesehen werden. Daher sind unbalancierte erste Stufen sicher nicht mit dem Qualitätsprädikat „gute Qualität“ zu versehen, da ihr Mitteldruck variiert und sie nur eine eingeschränkte Luftlieferleistung haben. Aufgrund ihrer Konstruktion können sie einfach nicht an die Leistung von balancierten ersten Stufen heranreichen.

Wenn wir den Aspekt der Haltbarkeit anschauen, gibt es keinen Zweifel daran, dass membrangesteuerte balancierte erste Stufen die beste Wahl sind. Die Membrane verhindert, dass Wasser in die erste Stufe eindringt, wodurch der Verschleiss verringert wird (unter der Voraussetzung, dass die Flasche mit sauberer Luft gefüllt und korrekt gepflegt wird).

Oft haben uns Taucher ihre membrangesteuerten balancierten ersten Stufen nach drei, vier Jahren täglichem Tauchen gezeigt, ohne sie je gewartet oder mit Süßwasser gespült zu haben. Die ersten Stufen waren immer noch in gutem Zustand. Mit kolbengesteuerten ersten Stufen ist das aufgrund des Kontaktes mit Wasser und der Möglichkeit galvanischer Reaktionen unwahrscheinlich (typische Probleme der kolbengesteuerten ersten Stufen).

Die Luftlieferleistung einer ersten Stufe muss hoch sein, um die Bedürfnisse eines Tauchers abzudecken. Bei einem Luftverbrauch von 15 Liter pro Minute kann man durchaus annehmen, dass der Taucher das ganze Atemgas in nur 12 Sekunden einatmet (12 Atemzüge pro Minute, jeder eine Sekunde lang). An der Oberfläche muss die erste Stufe also eine Atemgeschwindigkeit für einen entspannten Taucher von 75 Liter/Minute abdecken können. In 40 Metern Tiefe verfünfacht sich die Luftpumpe. Fünf mal 75 Liter/Minute = 375 Liter/Minute Atemgeschwindigkeit für einen entspannten Taucher. Überanstrengung, Bedienung des Inflators oder das Atmen aus der alternativen Luftversorgung durch einen anderen Taucher sind weitere Aspekte. Somit muss eine erste Stufe eine Luftlieferleistung von 1.000 Liter/Minute für das Sporttauchen und einiges über 2.000 Liter/Minute für das technische Tauchen liefern.

Ein Problem entsteht, wenn sich die Atemgeschwindigkeit der maximalen Luftlieferleistung der ersten Stufe annähert. Der Mitteldruck sinkt und erhöhter Atemwiderstand ist die Folge. Dies ist natürlich besonders in Situationen unerwünscht, in denen sich der Taucher überanstrengt. In solchen Situationen führt ein erhöhter Atemwiderstand zu einem Gefühl von Atemnot, was beim Taucher Panik hervorrufen und sogar in einem Tauchunfall enden kann. Um einen stabilen Mitteldruck zu gewährleisten, muss die Luftlieferleistung eines Lungenautomaten (im schlimmsten Fall) weit über der maximalen Atemgeschwindigkeit des Tauchers liegen. Deshalb ist es ratsam, nur erste Stufen mit einem Fluss von 2.000 Liter/Minute für das Sporttauchen zu wählen (höher für technisches Tauchen). Eine unbalancierte erste Stufe liefert meist weniger als 1.500 Liter/Minute und die Luftlieferleistung verringert sich mit fallendem Mitteldruck.

## Zweite Stufen



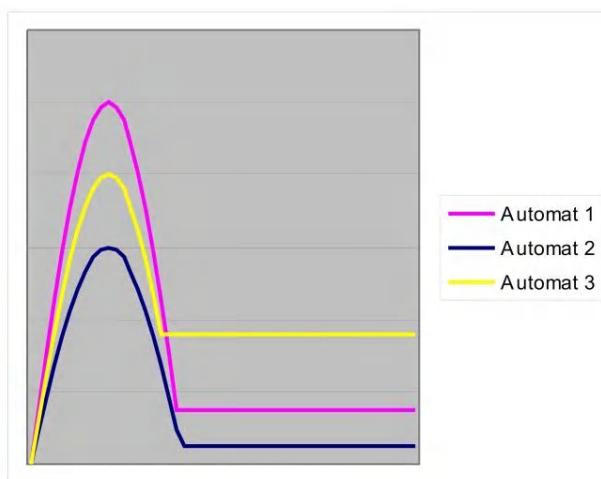
Die Qualität von zweiten Stufen ist nicht so einfach zu bestimmen, wie für erste Stufen. Erste Stufen haben immer die gleichen Qualitätsanforderungen: Lange Lebensdauer, grosse Luftlieferleistung und Stabilität des Mitteldrucks. Bei zweiten Stufen gilt es mehrere Aspekte zu beachten, inklusive den unterschiedlichen persönlichen Vorlieben und besonderen Bedürfnissen des Tauchers. Zweite Stufen sind entweder auf bestimmte Tauchumgebungen zugeschnitten oder sind "Alleskönnner".

Das Hauptproblem zweiter Stufen ist, dass man keine Verbesserung aller wichtigen Aspekten zugleich erreichen kann. Eine zweite Stufe ist immer ein Kompromiss. Zum Beispiel: ein längerer Kiphebel reduziert den Atemwiderstand und steigert somit den Atemkomfort. Dabei vergrößert sich aber das Innenvolumen der zweiten Stufe und damit auch der Totraum. Der Taucher atmet verhältnismässig mehr verbrauchtes Atemgas ein und somit mehr CO<sub>2</sub>. Die Atemfrequenz steigt und damit wird das Atemgas schneller verbraucht. Eine Reduktion des Atemwiderstandes führt somit zu einem grösseren Luftverbrauch.

Einige Aspekte, die für zweite Stufen wichtig sind:

- Lebensdauer
- Ansprechdruck (Cracking pressure)
- Einatemwiderstand
- Ausatemwiderstand
- Atemkomfort bei unterschiedlichen Kopfstellungen
- Totraum
- Gewicht
- Flexibilität der Schlauchanschlüsse und der Schläuche selbst
- Anfällig für Salz, Sand, Schmutz und Mineralien
- Vereisungsgefahr

Es ist klar, dass wir kein Optimum in allen Punkten erreichen können, ohne Kompromisse einzugehen. Du kannst eine erste Stufe bauen und sie als die "beste" erste Stufe der Welt anpreisen und dies sogar beweisen. Ist sie in der Stabilität des Mitteldrucks, Lebensdauer und Luftlieferleistung allen anderen auf dem Markt verfügbaren ersten Stufen überlegen, ist es die beste erste Stufe der Welt. Bei einer zweiten Stufe kannst du das nicht, da du nie in allen Punkten alle auf dem Markt verfügbaren Modelle übertreffen wirst. Du kannst nur eine zweite Stufe bauen, die sich in den von dir als wichtig erachteten Punkten optimal verhält und hoffen, dass der Taucher, der das Produkt kaufen soll, auch so denkt. Eine zweite Stufe, die in den Tropen perfekt ist, kann für das Kaltwassertauchen ungeeignet sein. Eine zweite Stufe, die auf Bootstauchgängen eine optimale Leistung bringt, kann bei Brandungseinstiegen abblasen.



Beim Einatmen aus einer zweiten Stufe unterscheiden wir zwei Momente. Die Kraft, die nötig ist, die zweite Stufe zu aktivieren, heisst „Ansprechdruck“ (cracking pressure). Die Kraft, die aufgewendet wird, um den Atemzug fortzusetzen, heisst „Atemwiderstand“. Automat 1 hat einen hohen Ansprechdruck, aber einen geringen Atemwiderstand. Automat 2 verhält sich in beiden Punkten besser, während Automat 3 einen relativ niedrigen Ansprechdruck hat, aber einen hohen Atemwiderstand.

Je mehr sich die Atmung der natürlichen Atmung an der Oberfläche angleicht, desto besser ist es. Es ist unmöglich, einen Lungenautomaten ohne

Atemwiderstand (wie beim Atmen an Land) zu konstruieren. Dieser Lungenautomat würde bei jeder Kopfbewegung abblasen. Viele Automaten sind auf einen Ansprechdruck von 3 bis 5 Zentimeter Wasserdruk eingestellt. Bei einigen zweiten Stufen kannst du den Atemkomfort während des Tauchganges verändern. Hierzu verändert man entweder den Ansprechdruck oder den Atemwiderstand. Mit der Änderung des Ansprechdrucks wird immer auch der Atemwiderstand verändert.

Bevor wir die Details von zweiten Stufen besprechen, schauen wir uns einige Grundlagen an. Der Mechanismus, der sich während des Einatmens öffnet, ist der Mitteldrucksitz. Es gibt drei grundlegende Konstruktionsprinzipien von zweiten Stufen: die „traditionelle“ zweite Stufe, „downstream override“ und die „Pilot zweite Stufe“. Natürlich gibt es auch hier wieder Varianten.

Neben dem Atmen dient die zweite Stufe als Überdruckventil und sichert das System, erste und zweite Stufe, vor einem Versagen (fail safe). Gibt es einen Defekt in der ersten oder zweiten Stufe, fängt die zweite Stufe an abzublasen.

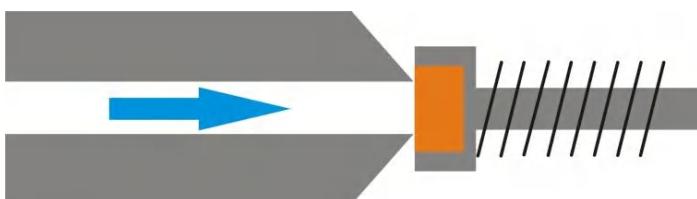
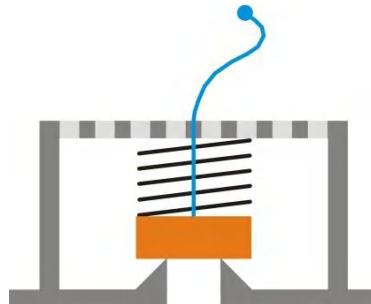


Die Basis der traditionellen zweiten Stufe ist ein federbelastetes Ventil, wie wir es auch an unserem Jacket als Überdruckventil finden. Bei dem Jacket verhindert dieses Ventil, dass die Blase platzt, sollte der Taucher das Jacket zu stark aufblasen oder sich der Inflator verklemmen. Anders gesagt: Die Konstruktion versagt nicht, auch wenn der Taucher oder andere Elemente des Systems versagen. Vor dem Versagen sicher: also „fail safe“. In der zweiten Stufe haben wir genauso ein Ventil, das dem gleichen Zweck dient. Gibt

es ein technisches Problem in der ersten Stufe, ist der Taucher noch nicht einer Verletzungsgefahr ausgesetzt, da die zweite Stufe noch Luft liefert. Auch hier wird dies „fail safe“ genannt.



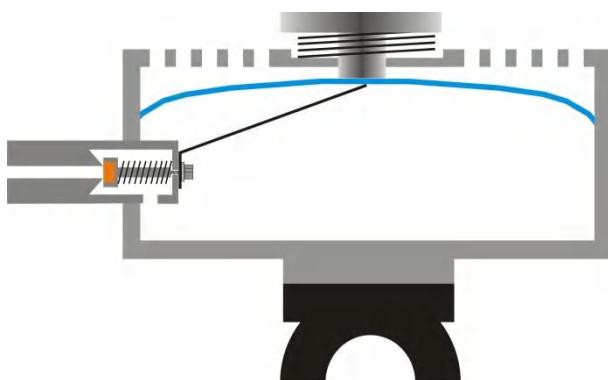
Das Überdruckventil eines Jackets ist oft mit einer Schnur versehen, womit der Taucher das Überdruckventil als Schnellablass benutzen kann. Der Kipphebel in der zweiten Stufe funktioniert nach dem gleichen Prinzip, wie die Schnur am Überdruckventil des Jackets. Der Kipphebel ist zwar keine Schnur aber ein Mechanismus, den der Taucher manipuliert, um ein Ventil zu öffnen. Das Ventil nur seitlich zu kippen (wie es der Fall wäre, wenn der Kipphebel auf der Mitte des Sitzes angebracht wäre und zur Seite drückt), könnte das Ventil nicht genügend weit öffnen, um den Taucher mit der nötigen Menge an Atemgas zu versorgen. Daher finden wir einen Mechanismus, der das ganze Ventil vom Sitz hebt. Die meisten Ventile sind am Ende eines kleinen Kolbens angebracht und der Kipphebel zieht am kleinen Kolben.



Der Mitteldruck kommt von der ersten Stufe zum Sitz (blauer Pfeil). Eine Feder drückt das in den kleinen Kolben eingebaute Ventil auf den Sitz und als Folge ist die zweite Stufe geschlossen. Die Federstärke kombiniert mit dem Umgebungsdruck in der zweiten Stufe muss gross genug sein,

um gegen den Mitteldruck schliessen zu können. Um gegen einen Mitteldruck von 10 bar zu arbeiten, wird schon eine sehr starke Feder benötigt. Die Grundidee ist, die Feder gerade etwas stärker zu machen als nötig, damit sie gegen den Mitteldruck schliessen kann. Ist die Federkraft zu gross, steigt der Atemwiderstand an, da mehr Kraft aufgewendet werden muss, um das Ventil vom Sitz zu heben.

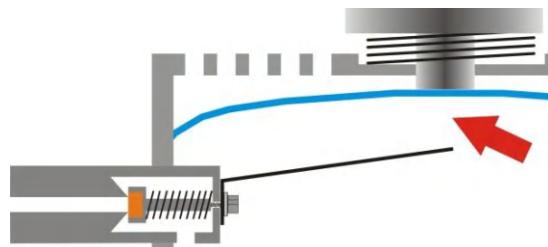
Jetzt verstehen wir die Änderung des Atemwiderstandes, wenn wir mit einer unbalancierten ersten Stufe tauchen. Die zweite Stufe ist auf den höchsten Mitteldruck eingestellt, den die erste Stufe liefert. Der Mitteldruck schwankt mit Änderungen des Flaschendrucks, aber die Feder in der zweiten Stufe bleibt gleich stark. Den Unterschied spürst du, da du mehr Kraft aufwenden musst, um das Ventil vom Sitz gegen die Federkraft, zu heben. Der Atemwiderstand (oder zumindest der Ansprechdruck) steigt.



Automaten auszublasen. Ältere zweite Stufen hatten diese Einschränkung noch nicht.

Je weiter der Hebel nach unten gedrückt wird, desto höher wird die Luftlieferleistung der zweiten Stufe. Um sicherzustellen, dass die zweite Stufe dem Taucher in jeder Tiefe und in jeder Situation genügend Luft gibt, muss der Kipphebel eine maximale Bewegungsfreiheit haben. Daher muss der Kipphebel unter Druck Kontakt mit der Membran haben. Nur dann kann der Kipphebel seine maximale Bewegung ausführen und die zweite Stufe die benötigte Luft liefern. Du überprüfst dies, indem du die zweite Stufe unter Druck langsam hin und her bewegst und hörst, ob sich der Kipphebel bewegt. Hörst du den Kipphebel sich frei bewegen, ist diese zweite Stufe nicht sicher.

Die Einstellung einer zweiten Stufe beinhaltet vor allem die Positionierung des Kipphebels. Ist der Kipphebel zu hoch, drückt die Membran auf den Kipphebel und die zweite Stufe bläst ab. Ist der Kipphebel zu niedrig eingestellt ist der Platz für die Hebelbewegung zu klein und die maximale Luftlieferleistung wird nicht erreicht. Der Mitteldruck mit der die zweite Stufe betrieben wird, ist durch die Federstärke in der zweiten Stufe definiert. Die erste Stufe wird auf den definierten Mitteldruck eingestellt. Die zweite Stufe ist auf den Mitteldruck abgestimmt, den die erste Stufe nach Herstellerangaben liefert.



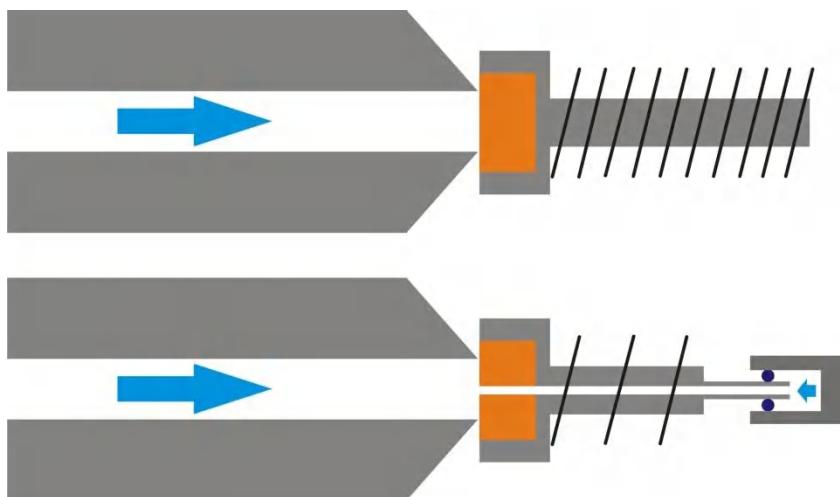
Die traditionelle zweite Stufe ist immer noch die am weitesten verbreitete. Du findest diese Art Öffnungsmechanismus der zweiten Stufe (das Mitteldruckventil) in den meisten zweiten Stufen. Mit einer grossen Ausnahme ist die Leistung dieses Ventiltyps in fast allen Punkten sehr gut. Die Lebensdauer dieses Typs von zweiten Stufen ist beschränkt, wenn der Automat nicht benutzt wird. Dies mag seltsam klingen, aber dieser Typ einer zweiten Stufe verschleißt schnell, wenn er nicht benutzt wird. Täglicher Gebrauch verringert den Verschleiss. Der Grund liegt in der Konstruktion des kleinen Kolbens, auf dem das Ventil sitzt und der mit der gesamten Federkraft auf den Sitz gedrückt wird. Die Federkraft ist gross genug, um dem grössten Mitteldruck zu widerstehen.



schwach abblasende zweite Stufe, die neu eingestellt oder deren Ventil ausgewechselt werden muss.

Ist der Automat in Gebrauch, hat die Federkraft eine entgegengesetzte Kraft (den Mitteldruck) und die Kraft, mit der die Feder das Ventil auf den Sitz drückt, ist nahezu Null. Die Abnutzung des Ventils ist somit sehr klein. Ist der Automat nicht in Gebrauch, gibt es keinen Mitteldruck der auf das Ventil drückt, aber die Federstärke bleibt die gleiche. Das Ventil drückt mit einer grossen Kraft auf den Sitz und das weiche Material des Ventils (1) verkratzt. Ist das Ventil beschädigt (2), muss der kleine Kolben einen weiteren Weg zurücklegen, um den Luftstrom abzudichten. Der Kipphebel wird weiter angehoben, als ursprünglich eingestellt. Das Resultat ist eine schwach abblasende zweite Stufe, die neu eingestellt oder deren Ventil ausgewechselt werden muss.

Dieses Problem tritt häufig auf, wenn der Automat lange nicht in Gebrauch ist. Oft bei Automaten eines Tauchers, der über den Winter seine Tauchaktivitäten einstellt oder ein Automat einer Tauchschule, der nur bei Hochbetrieb eingesetzt wird. Das Problem tritt also immer in einem unerwarteten Moment auf, da wir annehmen, dass der Automat immer noch so gut funktioniert, wie er eingelagert wurde.



“Downstream Override” zweite Stufen werden manchmal fälschlicherweise als balancierte zweite Stufen bezeichnet. Sie sind den traditionellen zweiten Stufen sehr ähnlich, sind aber mit einer Balancierungskammer ausgestattet (ähnlich einer Balancierungskammer in membrangesteuerten ersten Stufen), um die Feder beim Schliessen des Ventils auf dem Sitz zu unterstützen.

Die Federstärke kann so viel kleiner gehalten werden,

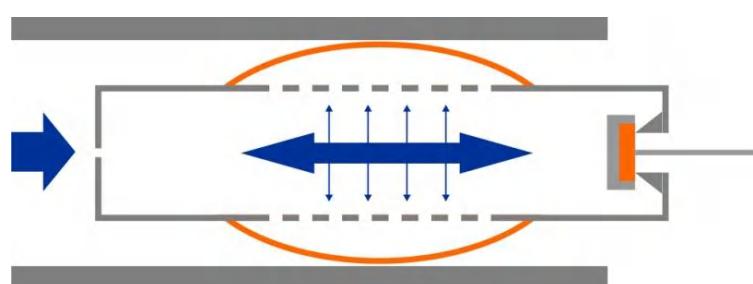
wodurch das Verkratzen des Ventils minimiert wird, wenn der Automat nicht in Gebrauch ist. Außerdem kann ein “leichterer” Mechanismus eingesetzt werden, der schneller als das traditionelle Modell reagiert. Wie für alles in einer zweiten Stufe, muss dafür ein Preis bezahlt werden. Die zweite Stufe ist anfälliger für Schmutz, Sand, Salz oder Mineralienrückstände.



Verglichen mit dem Kolben der traditionellen zweiten Stufe, hat die “downstream override” Ausführung eine Bohrung durch den Kolben, die zur Balancierungskammer führt. Diese ist ihrerseits durch einen O-Ring abgedichtet. Der Mitteldruck drückt nun von beiden Seiten auf den kleinen Kolben und so fehlt nur noch eine Kraft, die das Ventil schliesst, sobald der Taucher mit dem Atmen aufhört. Das ist die Rolle der Feder.

Würde das System wirklich nach obigem Prinzip funktionieren, könnten wir diese zweite Stufe tatsächlich eine balancierte zweite Stufe nennen. Dies ist aber nicht der Fall. Wie erwähnt, hat die zweite Stufe zwei Rollen. Sie erlaubt dem Taucher das Atmen und dient als Sicherheitsventil (oder Überdruckventil)

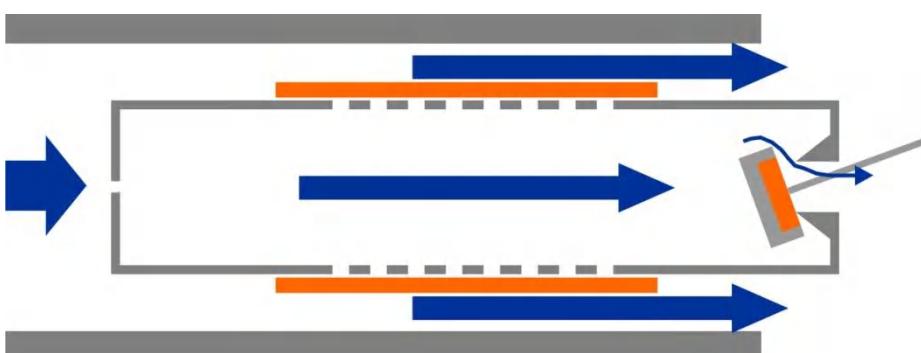
bei einer Fehlfunktion der ersten Stufe. Wäre das System vollständig “balanciert”, könnte die zweite Stufe nicht mehr als Sicherheitsventil funktionieren, weil der Druck in der Balancierungskammer gleich dem Mitteldruck ist und sogar bei 200 bar würde das Ventil nicht öffnen.



Der Druck in der Balancierungskammer und dem Mitteldruckschlauch ist zwar identisch, nicht aber die zwei Oberflächen auf die der Druck wirkt. Der Durchmesser, auf den der Mitteldruck in der Balancierungskammer wirkt, ist fast halb so gross wie auf der Schlauchseite. Die Balancierungskammer unterstützt nur die Feder, ohne sie aber zu ersetzen. Die Feder verrichtet immer noch die halbe Arbeit. Wir überbrücken (override) den

Mangel eines Sicherheitsventil (mit dem Luftstrom downstream) mit dem Einsatz unterschiedlicher Oberflächen, statt die zweite Stufe wirklich zu balancieren. Daher ist das Problem des Verkratzens des Ventils auch nicht vollständig gelöst.

Die Pilot zweite Stufe verwendet ein upstream Ventil. Grundsätzlich benützt eine Pilot zweite Stufe einen kleinen Fluss von Atemgas, um den Weg für einen grossen Fluss Atemgas freizugeben. Direkt an dem Mitteldruckschlauch ist eine Röhre angebracht, in die das Atemgas von der ersten Stufe ungehindert einströmt. In die Hauptröhre, die zur Membrane der zweiten Stufe und dem Mundstück führt, ist eine zweite Röhre mit einer sehr kleinen Bohrung eingeführt, in die der Mitteldruck eindringt. Öffnest du die Flasche bläst die zweite Stufe so lange ab, bis die innere Röhre den Mitteldruck erreicht hat. Der Mitteldruck biegt das flexible Material auf der inneren Röhre nach aussen und dichtet somit die äussere Röhre ab.



Die Bohrung, durch die das Atemgas in die innere Röhre strömt, ist sehr klein. Das ist der Grund, weshalb die zweite Stufe etwa eine Sekunde lang abblässt, wenn man die Flasche aufdreht. Atmet der Taucher ein, biegt sich das kleine upstream

Ventil vom Sitz weg und der Druck in der inneren Röhre wird nach rechts abgegeben. Weil die Öffnung beim kleinen upstream Ventil grösser ist als die Bohrung vom Eingang der inneren Röhre, fliesst das Atemgas schneller durch die Ventilöffnung, als es durch die Bohrung wieder nachströmt. Das flexible Material dichtet nicht mehr mit der äusseren Röhre und ein grosser Strom an Atemgas folgt nach. Solche zweiten Stufen haben einen hohen Ansprechdruck, aber einen sehr kleinen Atemwiderstand und eine grosse Luftlieferleistung.

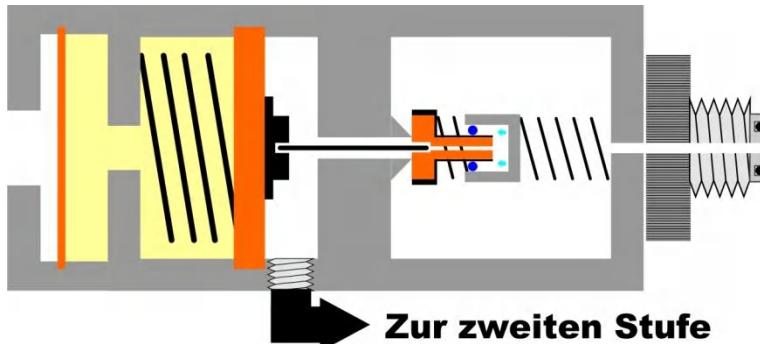
Diese Automaten sind vor allem bei Tauchern in sehr kaltem Wasser beliebt. Der Unterschied zwischen Ansprechdruck und Atemwiderstand reduziert den Atemkomfort aber soweit, dass sie keine gute Wahl für Taucher sind, die ihre Tauchausrüstung nicht an die Tauchbedingungen anpassen müssen. Beim Kaltwassertauchen funktionieren diese Automaten aber sehr gut, da das flexible Material sogar auf Eis dichten kann.

Ein Problem mit diesem Typ zweiter Stufen ist, dass sie nicht "fail safe" sind. Sie können nicht als Sicherheitsventil funktionieren. Je höher der Mitteldruck ist, desto besser kann das flexible Material auf der äusseren Röhre dichten. Darum haben Pilot zweite Stufen ein zusätzliches Überdruckventil (Sicherheitsventil), damit das System „fail safe“ bleibt. Solch ein Sicherheitsventil wird an einen Mitteldruckabgang der ersten Stufe angefügt oder kann Teil des Mitteldruckschlauches selbst sein. Es ist ein federbelastetes Ventil, das die Verbindung zwischen zweiter Stufe und Schlauch öffnet, um überschüssiges Atemgas unter zu hohem Druck abströmen zu lassen.

## Automatenvereisung

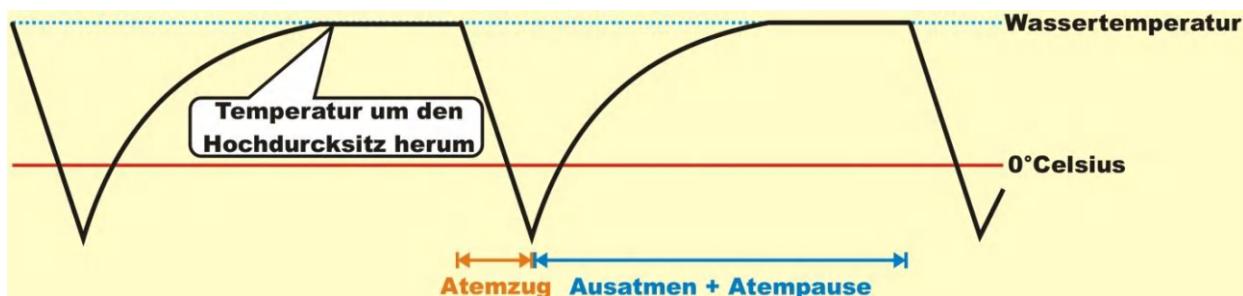
Beim Tauchen in kaltem Wasser führt Eis im Lungenautomat zum Abblasen. Damit sich Eis bildet, müssen zwei Faktoren vorhanden sein: Temperaturen unter Null Grad Celsius und Wasser. Fehlt einer dieser Faktoren vereist ein Automat nicht. Erste Stufen vereisen kaum. Niedrige Temperaturen entstehen dort, wo der Druck abfällt, folglich in einer ersten Stufe um den Hochdrucksitz. Egal welche erste Stufe

wir uns anschauen, kolbengesteuert oder membrangesteuert, balanciert oder unbalanciert, finden wir dort, wo der Druck abfällt, normalerweise kein Wasser.

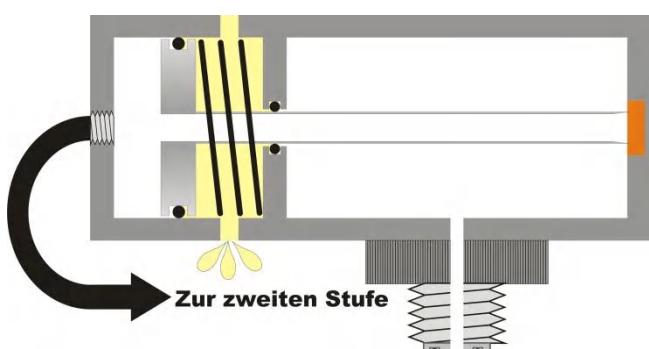


Das Ventil schliesst dann nicht mehr auf dem Sitz. Die Tauchflasche muss also unbedingt trocken sein, bevor die Kaltwassertauchsaison anfängt.

Gelangt Wasser zum Hochdrucksitz kommt es von der Flasche. Darum müssen wir so vorsichtig sein, dass kein Wasser in die Tauchflasche gelangt, wie wir im Kapitel über Flaschen und Ventile schon besprochen haben. Gelangt feuchte Luft in die erste Stufe, können sich Wassertropfen um den Hochdrucksitz herum sammeln und sobald die Temperatur unter Null Grad fällt, bildet sich Eis.



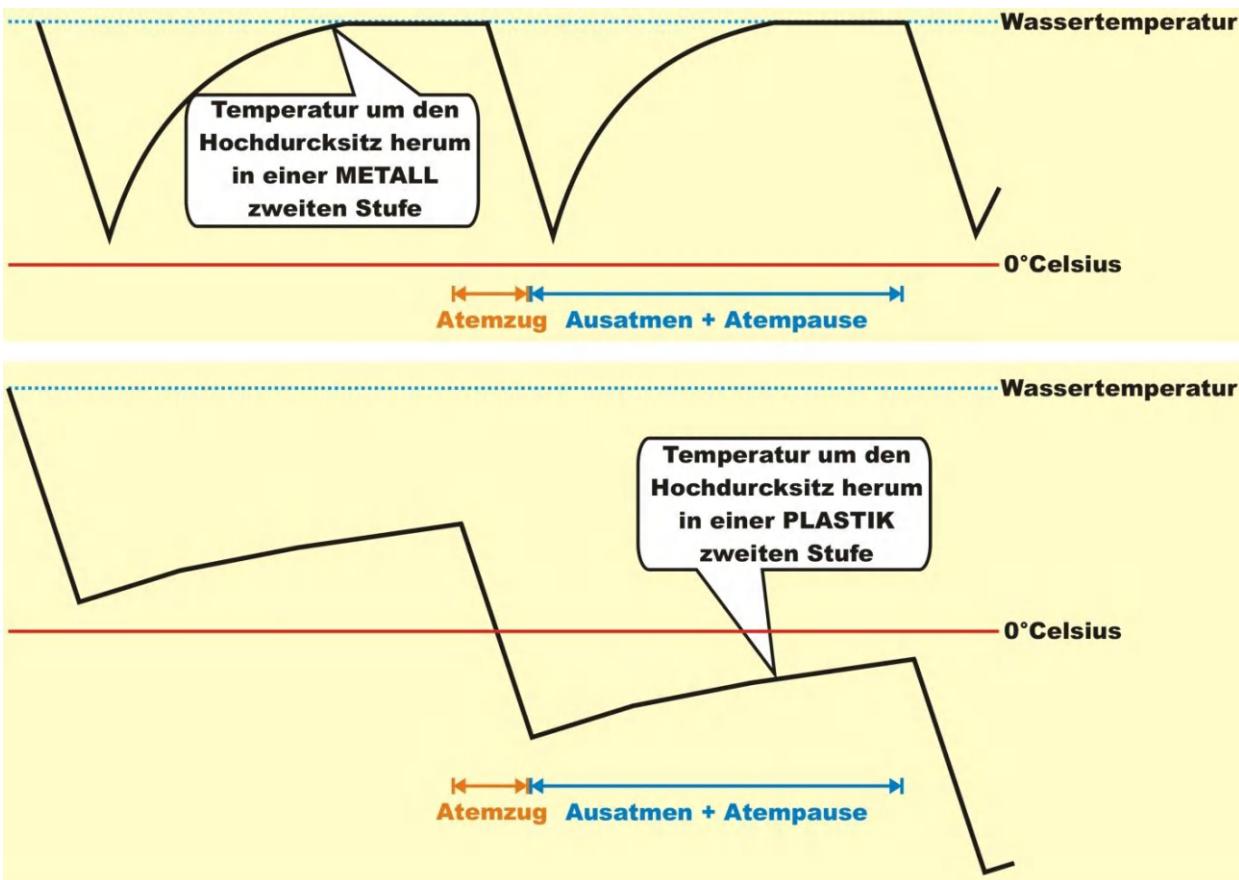
Einige erste Stufen sind mit Zusätzen ausgestattet, die Vereisung verhindern sollen. Meist funktionieren diese nicht, da sie vom eigentlichen Problem weit weg angebracht sind. Nur am Hochdrucksitz fällt die Temperatur unter Null Grad. Die erste Stufe ist immer aus Metall gebaut (ein guter Wärmeleiter) und wir tauchen immer in Wassertemperaturen über Null Grad Celsius. Atmet der Taucher ein, fällt die Temperatur um den Hochdrucksitz unter Null (was kein Problem ist, solange die Luft in der Flasche trocken ist). Da die Wassertemperatur höher ist, steigt die Temperatur wieder über Null Grad, bevor der Taucher das nächste Mal einatmet.



Die Isolation der Mitteldruckfeder kann Mineraleien und Salze abhalten, in die Umgebungsdruckkammer einzudringen und Vereisungen an der Oberfläche zu verhindern, aber nicht unter Wasser. Statt dieser Zusätze zu kaufen, sollte der Taucher eher sicherstellen, dass keine Feuchtigkeit in die Tauchflasche gelangt.

Taucher haben es auch probiert, die Wasserkammern von kolbengesteuerten ersten Stufen mit Silikon zu füllen, was aber nicht zum gewünschten Effekt führte. Anstatt Sand und Schmutzrückstände aus der ersten Stufe fern zu halten, hält sie das Silikon nun in der Umgebungsdruckkammer. Bei jeder Kolbenbewegung wird Silikon aus der ersten Stufe gedrückt und Wasser (mit Salz und Schmutz) eingesaugt. Sand, Salz und Schmutz bleiben am Silikon kleben und man hat eine Mischung aus Silikon und Schmutz, was schädlich für die erste Stufe ist. Des Weiteren ist es sehr unangenehm, wenn immer kleine Mengen Silikon aus der ersten Stufe tropfen, da sich die erste Stufe dann ölig und schmierig anfühlt.

Bei der zweiten Stufe haben wir ein anderes Problem. In der zweiten Stufe befindet sich immer Feuchtigkeit und Temperaturen unter Null Grad bringen den Automaten zum Abblasen. Alleine schon die Luft, die der Taucher ausatmet, kann genügend Feuchtigkeit in der zweiten Stufe ansammeln, damit sich Eis um den Mitteldrucksitz bildet. Für zweite Stufen haben wir nur eine Möglichkeit: Die Temperatur um den Mitteldrucksitz muss über Null Grad Celsius bleiben.



Der Druckabfall bei einem einzigen Atemzug (Mitteldruck zu Umgebungsdruck) erzeugt normalerweise nicht genügend Kälte, eine zweite Stufe vereisen zu lassen. Um die Temperatur in der zweiten Stufe über Null zu halten, bedienen wir uns der Umgebungstemperatur, die immer über Null liegt. Mit der Umgebungstemperatur wärmt sich die zweite Stufe auf, bevor der Taucher erneut einatmet. Daher brauchen wir einen guten Wärmeleiter und wenig Isolation zwischen dem Inneren der zweiten Stufe und der Umgebungstemperatur. Die bestmöglichen Wärmeleiter sind Metall und Carbon. Daher haben viele Kaltwassertaucher Lungenautomaten aus diesen Materialien, sowohl für den Oktopus, als auch für den Hauptautomaten. Zweite Stufen mit einem Metallgehäuse sind die beste Wahl für das Tauchen in kalten Gewässern.

Um das Isolationsproblem von Plastik zweiter Stufen zu lösen, fügen manche Hersteller Metallteile an. Obwohl dies keine Äquivalenz zu einer Metall oder Carbon zweiten Stufe ist, funktioniert das oft gut, solange die Metalloberfläche gross genug ist.



Der Lungenautomat in der Abbildung hat einen Zusatz, der das Vereisen auch verhindert. Der Kipphobel ist auf der gegenüberliegenden Seite des Gehäuses angebracht, so weit als möglich vom Mitteldrucksitz entfernt. Die Brücke zwischen Kipphobel und Mitteldrucksitz ist aus Plastik (ein schlechter Wärmeleiter). Somit sind die beweglichen Teile des Automaten von dem Ort des Temperaturabfalls weit weg. Das Vereisungsrisiko ist kleiner. Zweite Stufen aus Metall oder Carbon sind nicht die einzige Lösung, den Automaten vor Vereisung zu schützen, aber die einfachste.

# Weitere Ausrüstung

Ein Buch über Tauchausrüstung ist ohne Information über alternative Möglichkeiten und Zusatzausrüstung nicht vollständig. Hierbei sind nicht Maske, Schnorchel, Flossen, Bleigurt und ähnliche Ausrüstung gemeint, da diese in Anfängerkursen ausreichend behandelt werden. Dieses Kapitel beginnt mit Alternativen für Lungenautomaten. Des Weiteren werden die Funktionen von vier verschiedenen Bauweisen von Rebreathern erläutert.

Danach beschäftigen wir uns mit Ausrüstungsteilen, die mit dem Lungenautomat verbunden werden, sowie dem Inflator, das Finimeter und pneumatische Systeme und stellen Überlegungen für die Benutzung von Nitrox mit Tauchausrüstung an.

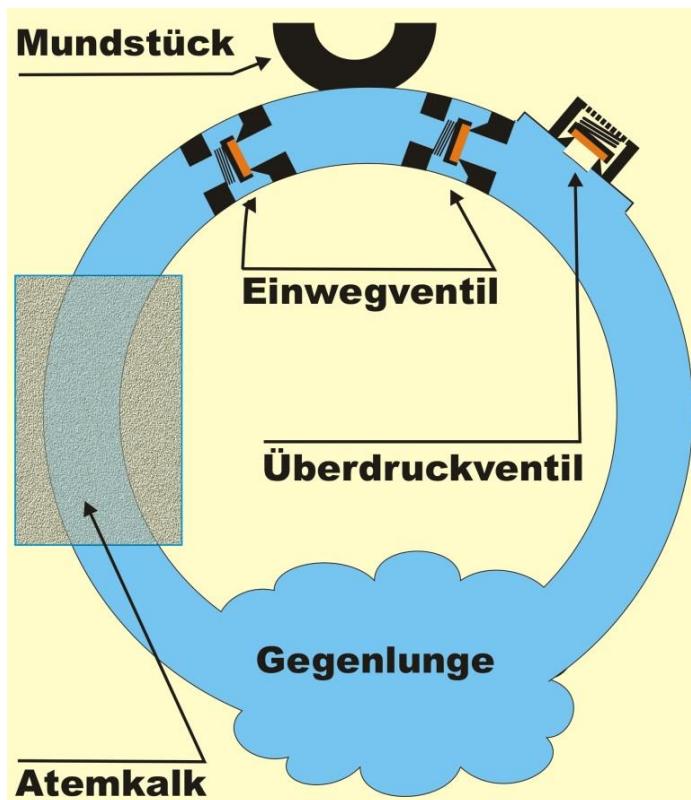


## Kreislauftauchgeräte

An der Oberfläche atmen wir 21 Prozent Sauerstoff ein. Verwenden wir ein offenes Tauchgerät (einen Lungenautomaten), atmen wir ungefähr 17 Prozent Sauerstoff unverbraucht aus. Das gleiche gilt beim Tauchen mit Sauerstoff angereicherter Luft (Nitrox). Ein Taucher atmet mit EANx36 an der Oberfläche 32 Prozent Sauerstoff unverbraucht aus. Mit grösserer Tiefe nimmt der Prozentanteil von Sauerstoff, den wir verbrauchen, ab (solange wir dieselbe Anstrengung des Tauchers voraussetzen). In einer Tiefe von 30 Metern (4 bar) atmen wir 20 Prozent Sauerstoff unverbraucht aus. Die Anzahl von Sauerstoffmolekülen die wir aufnehmen, bleibt aber gleich (sonst würden wir erstickten). In 30 Metern Tiefe ist die Dichte des Atemgases in der Lunge viermal höher, was bedeutet, dass der gleiche Prozentanteil (21 Prozent) eines Gases viermal so viele Moleküle beinhaltet. Vergrössert sich die zur Verfügung stehende Zahl von Sauerstoffmolekülen, steigt aber nicht die Anzahl von Sauerstoffmolekülen, die durch den Metabolismus verbraucht werden. Der Anteil von unverbrauchtem Sauerstoff steigt mit der Tiefe und steigendem Prozentanteil von Sauerstoff im Atemgas.

Tiefe	O <sub>2</sub> eingeatmet	O <sub>2</sub> ausgeatmet	CO <sub>2</sub> ausgeatmet	O <sub>2</sub> eingeatmet	O <sub>2</sub> ausgeatmet	CO <sub>2</sub> ausgeatmet
Oberfläche	<b>21%</b>	<b>17%</b>	<b>4%</b>	<b>36%</b>	<b>32%</b>	<b>4%</b>
10 Meter	<b>21%</b>	<b>19%</b>	<b>2%</b>	<b>36%</b>	<b>34%</b>	<b>2%</b>
30 Meter	<b>21%</b>	<b>20%</b>	<b>1%</b>	<b>36%</b>	<b>35%</b>	<b>1%</b>

Mit einem offenen System "verschwenden" wir also sehr viel Sauerstoff. Lange vor der Entwicklung von Lungenautomaten verwendeten Armeetaucher schon Kreislaufgeräte, die das ausgeatmete Atemgas aufbereiten (indem das CO<sub>2</sub> herausgefiltert wird) und so einen effizienteren Einsatz des Atemgases erlauben. In den Neunzigern wurden Kreislaufgeräte auch im Sporttauchen populär. Hauptanwender bleibt aber nach wie vor die Armee.



Alle Kreislaufgeräte haben einige Merkmale gemeinsam. Alle haben einen Kreislauf mit Ventilen, die das Atemgas immer in die gleiche Richtung leiten. Alle haben ein verschliessbares Mundstück, damit kein Wasser in den Kreislauf gelangt, sollte sich das Mundstück nicht im Mund des Tauchers befinden.

Alle Kreislaufgeräte haben einen flexiblen "Plastiksack" im Kreislauf: Die Gegenlunge. Atmet der Taucher aus füllt sie sich mit Atemgas und leert sich, wenn der Taucher einatmet. Die Summe von Atemgas in der Gegenlunge und der Lunge des Tauchers ist also konstant. Die Tarierung wird durch den Atemvorgang nicht beeinflusst. Einfach nur ausatmen um abzutauchen, funktioniert also nicht mehr.

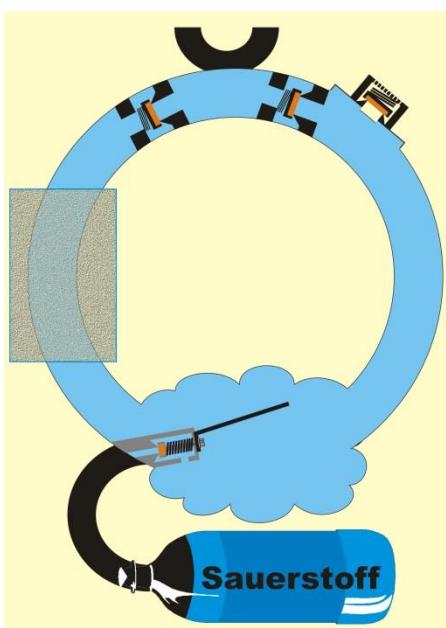
Da wir einen komprimierbaren Behälter haben, gilt das Gesetz von Boyle. Das Volumen nimmt mit Tiefenänderungen zu und ab. Um zu verhindern, dass sich die Gegenlunge überdehnt, sind alle Kreislaufgeräte

mit einem Überdruckventil ausgestattet. Die Federstärke im Ventil definiert den Druck im System. Deswegen strömt beim Aufstieg bei jedem Typ eines Kreislaufgerätes Luft ab.

Alle Kreislaufgeräte haben außerdem einen Behälter mit Atemkalk. Atemkalk ist eine Chemikalie, die CO<sub>2</sub> bindet und es aus der Ausatemluft entfernt. Jedes Körnchen Atemkalk kann mit einer gewissen Menge CO<sub>2</sub> Molekülen eine Bindung eingehen. Die Menge von CO<sub>2</sub> Molekülen (nicht der Prozentanteil) in der Ausatemluft des Tauchers bleibt gleich (solange sich die Anstrengung des Tauchers nicht ändert). Kann eine Menge Atemkalk an der Oberfläche drei Stunden eingesetzt werden, dann kann sie dieses auch in 30 Meter Tiefe.

Der einzige Unterschied der verschiedenen Kreislaufsysteme ist, wie frisches Atemgas dem System hinzugefügt wird. Der Kreislaufgerätetyp ist definiert durch die Gasmischung und die Art und Weise, wie das Gas in das System gelangt. Zur Vereinfachung unterscheiden wir vier Typen von Kreislaufgeräten:

- Geschlossenes Sauerstoff-Kreislaufgerät
- Halbgeschlossenes Sauerstoff-Kreislaufgerät
- Halbgeschlossenes Nitrox-Kreislaufgerät
- Geschlossenes Mischgas-Kreislaufgerät



Das geschlossene Sauerstoff-Kreislaufgerät ist mit einer kleinen Sauerstoffflasche ausgestattet. In der Gegenlunge befindet sich ein Hebel, ähnlich wie der Kipphebel in einer zweiten Stufe.

Der Taucher atmet aus dem Atemkreislauf ein und wieder in ihn aus. Das ausgeatmete Gas gelangt in den Kanister, wo das CO<sub>2</sub> mit dem Atemkalk reagiert und es kommt zu einem Volumenverlust (das CO<sub>2</sub> fehlt). Wenn dieser Verlust gross genug ist, wird das Volumen der Gegenlunge so klein, dass der Kipphebel aktiviert wird und frischer Sauerstoff in die Gegenlunge strömt.

Neues Atemgas wird also nur bei einem Volumenverlust im Kreislauf nachströmen. Mögliche Gründe sind Abstiege (Boyle) oder ein Taucher atmet durch die Nase aus (und gibt damit das Atemgas in die Umgebung ab). Normalerweise ist der Grund für einen Volumenverlust allerdings die Konsumation von Atemgas durch den Taucher. Der momentane Verbrauch von Atemgas durch den Taucher wird also bei der Menge von frischem Atemgas, die nachströmen muss, berücksichtigt. Wird der momentane Verbrauch berücksichtigt, sprechen wir von einem "geschlossenen Kreislaufgerät" (CCR). „Geschlossen“ hat nichts damit zu tun, dass das System wirklich geschlossen ist. Das System kann aufgrund der flexiblen Teile und der Einwirkung des wechselnden Umgebungsdrucks nicht geschlossen sein.

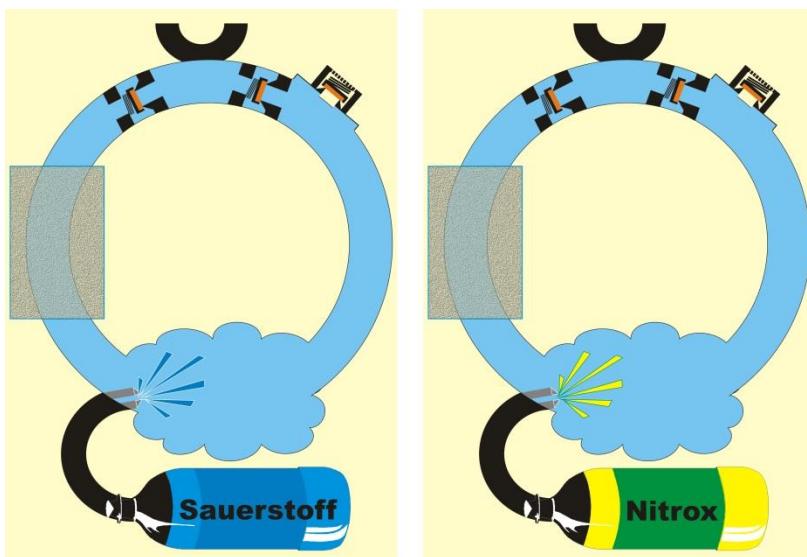
Vom Sicherheitsstandpunkt aus ist ein geschlossenes Sauerstoffkreislaufgerät bedenklich. Das Atemgas im System ist nicht das gleiche Gas wie in der Flasche und der Taucher atmet also nicht reinen Sauerstoff. Im Kreislauf ist immer Stickstoff vorhanden. Vor dem Tauchgang sind Kreislaufgerät und Lungen des Taucher mit Luft gefüllt (nahezu 80 Prozent Stickstoff). Nimmt der Taucher ohne Vorkehrungen einfach das Mundstück in den Mund und fängt an zu atmen, verkleinert sich das Volumen um maximal 21 Prozent. Das bedeutet, dass der ganze Sauerstoff verbraucht ist.

Eine Volumenreduktion von 21 Prozent ist vielleicht zu klein, um den Kipphebel in der Gegenlunge zu aktivieren und der Taucher verliert aufgrund einer Hypoxie (oder sogar Anoxie) das Bewusstsein. Um

dies zu verhindern, muss der Taucher seine Lunge und die Gegenlunge vollständig leeren, bevor er aus dem Mundstück atmet. Dies führt zu einem vorteilhafteren Sauerstoff-Stickstoff Verhältnis und der Volumenverlust wird gross genug sein, um den Kipphobel zu aktivieren. Somit kann neuer Sauerstoff (den der Taucher verbraucht hat) von der Flasche in die Gegenlunge nachströmen.

Es ist einfach, sich die Routine anzueignen, die Gegenlunge und die Lunge vor jedem Tauchgang zu entleeren. Schwieriger ist es, dies auch wirklich jedes Mal zu machen, auch wenn der Taucher kurze Oberflächenintervalle einlegt, um zum Beispiel eine Kompasspeilung zu überprüfen oder einen kleinen Schwatz mit dem Tauchpartner zu halten. Schon ein Atemzug atmosphärischer Luft lässt den Stickstoffanteil im System dramatisch steigen. Daher bevorzugen es viele, mit einem halbgeschlossenen Sauerstoff-Kreislaufgerät zu tauchen.

Da das Atemgas für diesen Typ Kreislaufgerät nicht reiner Sauerstoff, sondern Nitrox ist (wegen des Stickstoffs, der im System verbleibt), ist die maximale Tauchtiefe mehr als 6 Meter (Sauerstoff wird bei Partialdrücken über 1,6 bar toxisch, was 6 Meter Tiefe bei reiner Sauerstoffatmung entspricht). Trotzdem ist es nicht ungefährlich mit diesem Gerätetyp tiefer als 6 Meter zu tauchen. Ein Taucher, der immer wieder seine Maske ausblasen muss, atmet mehrmals pro Minute durch die Nase aus. Bei jedem Ausatmen durch die Nase gehen Sauerstoff und Stickstoff verloren, aber nur Sauerstoff wird dem Kreislauf wieder zugeführt. Der Sauerstoffanteil steigt und damit der Sauerstoffpartialdruck. Tauchst du tiefer als 6 Meter kann der Sauerstoffpartialdruck mehr als 1,6 bar betragen und du hast das Risiko, eine Sauerstoffvergiftung unter Wasser zu erleiden. Eine Sauerstoffvergiftung unter Wasser endet fast immer mit dem Ertrinken des Tauchers.



der Sauerstoffverbrauch auf vielleicht 0,5 Liter pro Minute. Schwimmt er hingegen gegen eine starke Strömung, steigt der Sauerstoffbedarf auf 2 Liter pro Minute.

Ein zu hoher Sauerstoffanteil stellt kein Problem dar (ausser der Sauerstoffpartialdruck überschreitet 1,6 bar). Ein zu kleiner allerdings schon, da dieser eine hypoxische Situation hervorruft und der Taucher bewusstlos wird. Die Düse ist daher auf den "schlimmsten aller erdenklichen Fälle" eingestellt. In obigem Beispiel stellt man die Düse auf 2 Liter pro Minute Sauerstoffinjektion ein. Verbraucht der Taucher nicht den ganzen Sauerstoff, verlässt das überschüssige Atemgas den Kreislauf durch das Überdruckventil.

Da immer Sauerstoff und Stickstoff aus dem System entweichen und nur Sauerstoff hinzugefügt wird (ausser dem Stickstoff, der von der Ausatemluft des Tauchers stammt), ist der Sauerstoffanteil grösser,

Das Verhalten eines halbgeschlossenen Sauerstoff-Kreislaufgeräts ist etwas vorhersehbarer und das Risiko einer Hypoxie (oder Anoxie) ist kleiner. Die Gegenlunge in so einem Gerät ist nicht mit einem Kipphobel ausgestattet, sondern mit einer Düse, die eine bestimmte Menge Sauerstoff pro Minute in das System einspeist.

Die Sauerstoffeinspeisung ist konstant und muss deswegen die Bedürfnisse des Tauchers in jeder erdenklichen Situation erfüllen. Macht der Taucher Makroaufnahmen von Kleintieren, sinkt

als in einem geschlossenen Kreislaufgerät. Der Taucher muss viel mehr die maximale Tauchtiefe beachten. Ein halbgeschlossenes Nitrox-Kreislaufgerät funktioniert genauso.

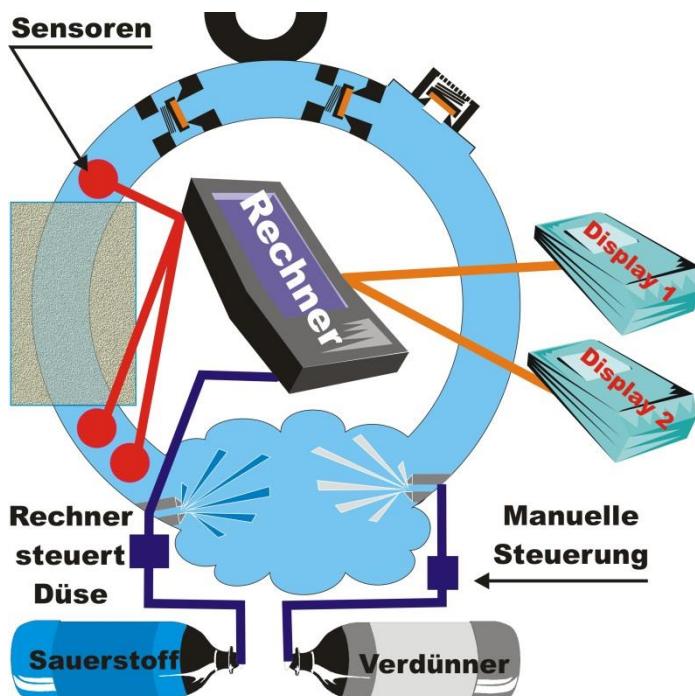
### **Geschlossenes Kreislaufgerät = Injektion basiert auf gemessenem O<sub>2</sub> Verbrauch**

### **Halbgeschlossenes Kreislaufgerät = Injektion basiert auf angenommenem O<sub>2</sub> Verbrauch**

Die Konstruktion von halbgeschlossenen Nitrox-Kreislaufgeräten ist identisch mit den halbgeschlossenen Sauerstoff-Kreislaufgeräten. Die Menge von eingespritztem Atemgas kann aber nicht linear berechnet werden. Du kannst nicht sagen, dass ein Taucher, der 2 Liter reinen Sauerstoff pro Minute verbraucht, vier Liter EANx50 pro Minute benötigt (was 2 Liter Stickstoff und 2 Liter Sauerstoff sind). Du musst auch den Sauerstoff berechnen, der durch das Überdruckventil entweicht.

Halbgeschlossene Nitrox-Kreislaufgeräte erlauben es dem Taucher lange Tauchgänge zu unternehmen. Die Abweichungen der Prozentanteile von Stickstoff und Sauerstoff in dem Atemkreislauf bergen allerdings ein paar Nachteile und der Fluss muss so berechnet werden, damit der Sauerstoffanteil des Atemgases im System gerade über einem hypoxischen Wert bleibt. Ein Taucher, der tatsächlich die "angenommene Menge" Sauerstoff von zwei Litern pro Minute verbraucht, atmet Luft. Ohne Instrumente weiß der Taucher nie, was er im Moment gerade für ein Atemgas im Kreislauf hat. Das einzige logische ist es, den Tauchcomputer für die Berechnung der Nullzeitgrenze auf Luft als verwendetes Atemgas zu stellen.

Maske leeren und ähnliches (wie das Leeren der Gegenlunge, das du in einem Rebreather Kurs lernst), füllt das ganze System mit neuem Atemgas aus der Flasche. Die maximale Tauchtiefe muss also immer mit dem Sauerstoffanteil in der Flasche berechnet werden. Es entstehen einige Nachteile durch das Rechnen mit dem „schlimmsten Fall“. Verwenden wir Instrumente, die in Echtzeit rechnen, ist das Problem reduziert. Trotzdem kennen wir noch nicht genau die Zusammensetzung unseres Atemgases, wie bei normalen offenen Tauchgeräten.



Ein geschlossenes Mischgas-Kreislaufgerät ist die komplexeste Variante. Bei diesem Gerät berechnen wir den Verbrauch von Sauerstoff nicht durch den Volumenverlust. Der Taucher verwendet ein Gasgemisch und der Volumenverlust sagt nichts darüber aus, welches Gas fehlt.

Daher haben geschlossene Mischgas-Kreislaufgeräte einen elektronischen Sauerstoffpartialdruckmesser. Meist haben wir drei Sensoren, die den Sauerstoffgehalt messen und an eine Steuereinheit übermitteln. Der Taucher kann den Sauerstoffpartialdruck auf zwei Displays ablesen.

Die Steuereinheit vergleicht den gemessenen zum eingestellten Sauerstoffpartialdruck. Der Taucher wählt die Einstellungen für den Sauerstoffpartialdruck. Meist gibt er einen minimalen (oft 0,7 bar) und einen maximalen (oft 1,3 bar) Sauerstoffpartialdruck an. Fällt der Sauerstoffpartialdruck unter den Minimum Wert, aktiviert die Steuereinheit die Einspritzdüse der Sauerstoffflasche, bis der Partialdruck wieder auf dem gewünschten Wert ist. Der Tau-

cher kontrolliert manuell das Einspritzen von Verdünnungsgas. Dies kann Luft, reiner Stickstoff, reines Helium, ein Helium-Stickstoffgemisch oder ein anderes Gas sein.

Im Prinzip verwendet der Taucher das Verdünnungsgas zur Tarierungskontrolle. Die Verdünnungsgase sind Inertgase und bleiben im System. Der Taucher muss nur Verdünnungsgas einspritzen, um den Volumenverlust und damit den Auftriebsverlust auszugleichen.

Mischgas-Kreislaufgeräte werden für das Sporttauchen nicht empfohlen. Wartungsarbeiten sind sehr zeitaufwändig und teuer. Der Schaltkreislauf muss gegen Wasser geschützt sein, indem alle Kabel zum Beispiel in Mitteldruckschläuchen untergebracht sind. Die Sensoren müssen periodisch ausgewechselt und die elektronischen Einspritzdüsen müssen regelmässig auf ihre korrekte Funktion überprüft werden. Der Zeit- und Geldaufwand übersteigt oft das, was ein Sporttaucher investieren möchte.

Durch viele tödliche Unfälle kamen diese Tauchgeräte in Verruf. Die meisten Unfälle waren einem Fehler des Tauchers zuzuschreiben, wobei die Geräte sehr anfällig auf Bedienungsfehler sind. Ein Beispiel: Ein Taucher mit einer hohen Einstellung des Sauerstoffpartialdrucks (1,3 bar) taucht von 10 Metern Tiefe plötzlich auf 30 Meter ab, ohne dabei manuell Verdünnungsgas hinzuzufügen (das System macht dies nicht automatisch). Der Sauerstoffpartialdruck liegt dann plötzlich bei 2,6 bar. Es ist wahrscheinlich, dass der Taucher aufgrund der Sauerstofftoxizität ertrinkt und das nur, weil er kein Verdünnungsgas hinzugefügt hat.

Ein anderes Beispiel: Ein Taucher kehrt an die Oberfläche zurück und der Sauerstoffpartialdruck ist immer noch auf 1,3 bar eingestellt. Die Steuerungseinheit findet einen zu niedrigen Partialdruck (an der Oberfläche kann der Sauerstoffpartialdruck nicht höher als 1 bar sein) und löst die Einspritzdüse aus. Der Taucher schliesst die Sauerstoffflasche, um Sauerstoff zu sparen. Taucht er nun aus irgendwelchen Gründen wieder ab, wird das Atemgas im System schon nach ein paar Atemzügen hypoxisch und der Taucher verliert das Bewusstsein.

In militärischen und kommerziellen Anwendungen haben geschlossene Mischgas-Kreislaufgeräte aber enorme Vorteile. Sie arbeiten nicht mit konstantem Sauerstoffanteil, sondern mit konstantem Sauerstoffpartialdruck. Theoretisch gesehen gibt es keine auf Sauerstoff basierte maximale Einsatztiefe. Der Sauerstoffpartialdruck übersteigt nie 1,6 bar und die Verdünnungsgase können abhängig von der Tiefe gewählt werden. Auf drei Metern Dekompressionstiefe atmet der Taucher (nach einer Weile) fast reinen Sauerstoff.

## Enriched Air und Ausrüstung

Du musst einige Vorsichtsmassnahmen treffen, abhängig des Sauerstoffpartialdrucks, mit dem deine Tauchausrüstung in Kontakt kommt. In den Anfängen des Tauchens mit sauerstoffangereicherter Luft wurden die Vorsichtsmassnahmen oft übertrieben. Lungenautomaten wurden mit Trichlorethylen gereinigt, was die Person, die den Automaten reinigte, einem viel höheren Risiko aussetzte, als das bisschen Fett, das den Taucher gefährdete. Taucher sahen noch nie ein Problem darin, einen mit Silikon verschmierten Lungenautomaten mit 300 bar Tauchflaschen einzusetzen, wurden aber bei einer Tauchflasche mit EANx32 auf 200 bar nervös. Rechnen wir einmal nach:  $200 \text{ bar} \times 0,32 = 64 \text{ bar}$  und  $300 \times 0,21 = 63 \text{ bar}$ . Der Sauerstoffpartialdruck ist also nahezu identisch.

Das obige Rechenbeispiel will nicht sagen, dass wir jegliche Fette mit Tauchausrüstung verwenden können. Alles hängt vom Sauerstoffpartialdruck, der Hitze, bei der die Tauchausrüstung benutzt wird, der Anwesenheit von Brennstoffen und deren Selbstentzündungscharakteristiken und von den Materialien, die mit dem Sauerstoff in Kontakt kommen, ab.

Die Praxis in der Tauchindustrie sagt, dass jegliche Gase mit einem Sauerstoffanteil bis 40 Prozent wie Luft und alle Gase mit einem höheren Sauerstoffanteil wie reiner Sauerstoff behandelt werden sollten. Dies gilt auch für das Füllen von Nitroxflaschen. Gase, die bei Umgebungsdruck gemischt werden, leiten wir in ölgeschmierte Kompressoren ein, solange der Sauerstoffpartialdruck unter 40 Prozent liegt (ausgenommen örtliche Gesetze, die diese Praxis verbieten). Für höhere Sauerstoffanteile brauchen wir einen speziellen Kompressor oder der Mischer füllt die Flaschen nach der Partialdruckmethode.

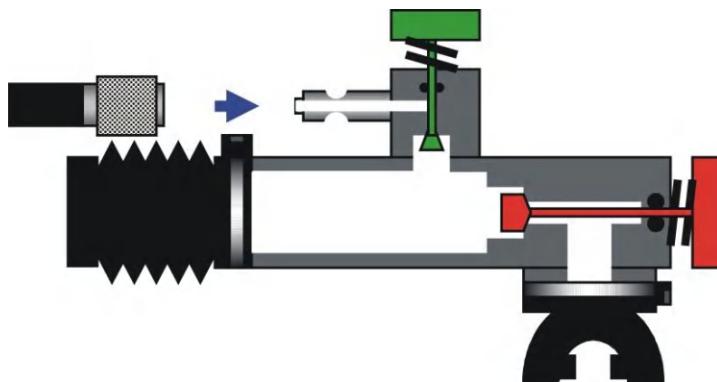
Kommen Tauchflaschen und Ventile regelmässig mit Sauerstoffanteilen von über 40 Prozent in Kontakt, müssen sie entsprechend gereinigt werden. Die Norm für Sauerstoffkompatibilität erlaubt immer noch einen gewissen Anteil von Kohlenwasserstoff. Mit der Zeit akkumulieren diese in der Tauchflasche und überschreiten zu irgendeinem Zeitpunkt einen kritischen Wert. Ob es in der Flasche dann aber zu einer Entzündung kommt, hängt von der Anwesenheit von Brennstoffen, Energie und Selbstentzündungskarakteristiken der Rückstände in der Flasche ab. Es ist unmöglich, einen Schwellenwert für den maximalen Anteil von Kohlenwasserstoff zu nennen. Also ist die einzige vernünftige und sichere Praxis, die Ausrüstung regelmässig nach den Kriterien der Sauerstoffkompatibilität zu reinigen. Die nötigen Schritte lernst du in einem Gasblender Kurs.

Alle anderen Tauchausrüstungsteile sollten nach den Herstellerrichtlinien gereinigt und gewartet werden. Dies beinhaltet meist das Fetten mit sauerstoffkompatiblen Schmiermitteln. Die O-Ringe sollten zudem aus Viton (oder einem ähnlichen Material) sein. Du findest alle nötigen Details in der Herstellerdokumentation für deinen Lungenautomaten.

Für offene Sporttauchgeräte benutzen wir selten Mischungen mit einem höheren Sauerstoffanteil als 36 Prozent. Oft wird davon abgeraten, Aluminium oder Titan mit Sauerstoff angereicherte Luft einzusetzen, aber auch dies kann man nicht generalisieren, da es von vielen Faktoren abhängt.

Abschliessend können wir sagen, dass wir einige wenige Sicherheitsvorkehrungen für das Tauchen mit Nitrox treffen müssen, diese aber sehr limitiert sind und vom Hersteller vorgeschrieben werden. Die Herstellerempfehlungen sind sowohl für den Benutzer, als auch den Wartungstechniker bindend.

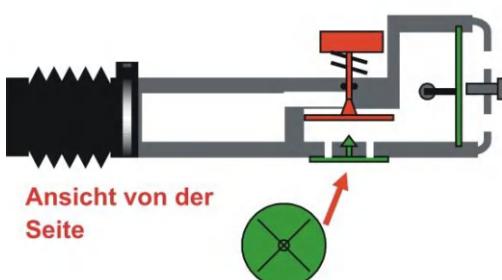
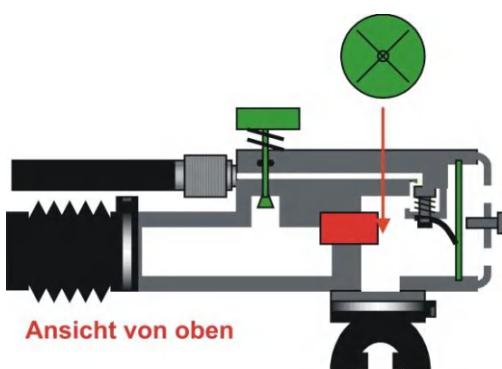
### Inflatoren & Ventile



Mithilfe des Inflators kontrolliert der Taucher seinen Auftrieb, indem er Luft von der Flasche in sein Jacket fügt. Der Inflatorschlauch ist an einem Mitteldruckabgang der ersten Stufe angebracht und hat einen Anschluss am Jacket (oder Trockentauchanzug). Der Aufbau eines Inflators ist im Vergleich zu einem Lungenautomaten sehr einfach.

Wie auch bei den Lungenautomaten ist die Luftlieferleistung ein wichtiges Qualitätsmerkmal für den Inflator. Ein Taucher mit Abtrieb in der Tiefe will ohne grosse Verzögerung das Jacket aufblasen können. Daher solltest du keine Signalinstrumente zwischen Inflatorschlauch und Inflator anbringen. Manche von diesen Signalinstrumenten reduzieren die Luftlieferleistung um mehr als die Hälfte.

Der Aspekt der Luftlieferleistung ist vor allem wichtig, wenn wir mit kombiniertem Inflator/Lungenautomat-System tauchen. Hier wird einfach eine zweite Stufe im Inflatorgehäuse untergebracht. Der Taucher kann sein Jacket aufblasen und entleeren, und gleichzeitig aus dem Inflator atmen.



Alle Einzelteile haben wir bis jetzt schon besprochen. Die zweite Stufe hat eine normale Membrane und der Kipphebel ist mit einem Mitteldrucksitz und Ventil ausgestattet. Der Inflator hat den gleichen Mechanismus wie ein normaler Inflator. Die einzige Besonderheit ist die Integration in einem Gehäuse.

Die Luftlieferleistung für die zweite Stufe und den Inflator kann mit einem normalen Inflatorschlauch nicht gewährleistet werden. Du findest die Inflatorautomaten daher immer mit einem überdimensionalen Schlauchanschluss.

Inflatorautomaten sind in manchen Gebieten beliebt. In einer „ohne Luft“ Situation gibt der Taucher seinen Hauptautomaten an den Taucher ohne Luft ab und atmet selbst aus dem Inflatorautomat. Da viele Einzelteile in einem Gehäuse integriert sind, sind sie anfällig für Schmutz. In Regionen, wo du Brandungseinstiege machen musst, findest du sie daher kaum.

Es gibt für Inflatoren drei Grundmechanismen. Alle haben einen federbelasteten Knopf, der eine Bohrung öffnet, durch

welche die Luft vom Mitteldruckschlauch in das Jacket strömt.

Der Mechanismus links hat nur einen O-Ring. Der Kolben blockiert durch seine konische Form die Luftpassage. Drückst du den Knopf, dichtet der Kolben nicht mehr und Luft strömt in dein Jacket. Die Feder zieht den Kolben wieder in seine Ausgangsposition, wenn du den Knopf los lässt. Die Abbildung in der Mitte zeigt den zweiten Grundtyp. Hier findest du zwei O-Ringe. Durch die konische Form des Gehäuses, verliert der untere O-Ring seine Dichtung, sobald du den Knopf drückst. Die dritte Möglichkeit ist ein upstream Ventil (das wir von den Pilot zweiten Stufen kennen). Das gleiche Ventil finden wir auch im Inflatorschlauch (und in Fahrradreifen).



Viele Jackets haben einen Schnellablass, dort wo der Faltenschlauch an das Jacket angebracht ist. Eine Schnur, die durch den Inflatorschlauch läuft, erlaubt es dem Taucher den Schnellablass zu aktivieren, indem er am Faltenschlauch zieht. Das Schnellablassventil dient auch als Überdruckventil.

Überdruckventile sind federbelastete downstream Ventile. Die Federkraft definiert den maximalen Druck in einem Behälter und schützt somit gegen Überdruck. Das Jacket hat oft mehrere solcher Ventile.

Die meisten Überdruckventile sind zusätzlich mit einer Schnur ausgestattet, wodurch sie der Taucher manuell bedienen kann, um Luft aus dem Jacket abzulassen. Die Pflege und Wartung von diesen Ventilen ist sehr einfach und benötigt kaum Zeit. Selten musst du Teile ersetzen, also genügt eine gründliche Reinigung und Überprüfung der korrekten Funktionsweise.

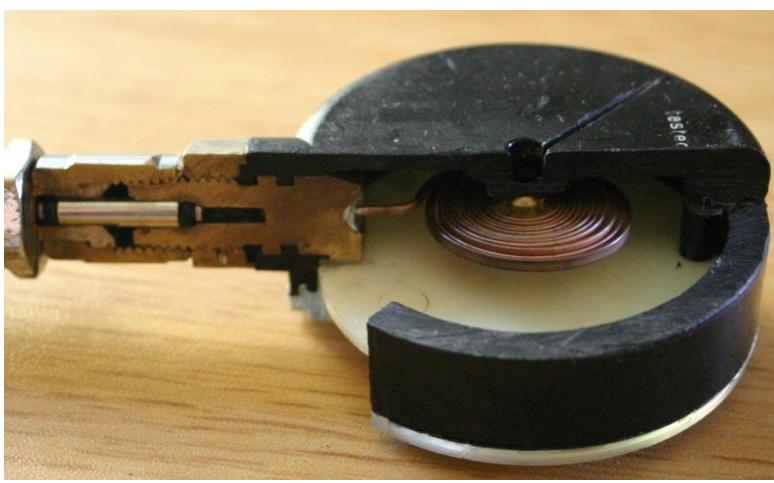
Einige neuere Schnellablässe sind mit pneumatischen Ventilen ausgestattet. Drückt der Taucher einen Knopf, strömt Mitteldruck in eine kleine Röhre, wodurch wiederum ein kleiner federbelasteter Kolben in die offene Position springt und das Schnellablassventil öffnet (die meisten solcher Systeme öffnen mehr als ein Ventil gleichzeitig, wodurch die Luft durch das am höchsten gelegene Ventil entweicht).

Drückt der Taucher den Knopf nicht mehr, sinkt der Druck in der flexiblen Röhre auf Umgebungsdruck. Die Feder ist nun stark genug, um den kleinen Kolben in die untere Position zu drücken und das Schnellablassventil schliesst. Der grosse Vorteil dieser Systeme ist, dass man den Faltenschlauch nicht mehr heben muss, um die Luft an den höchsten Punkt zu bringen und sie so ablassen zu können. Einige Taucher mögen das System aber ganz und gar nicht. Sie sehen ein Sicherheitsproblem darin, dass pneumatische Systeme für die korrekte Funktion Druck brauchen und daher in einer „ohne Luft“ Situation nicht bedienbar sind. Andere finden die Feinabstimmung ihrer Tarierung mit diesem System schwieriger.



Das herkömmliche Schnellablassventil (links) und das Inflatorsystem (Mitte) an einem Jacket mit pneumatischen Schnellablassventilen (rechts).

## Instrumente



Finimeter sind mit einem Hochdruckschlauch an der Hochdruckkammer der ersten Stufe angeschlossen. Die Hochdruckschläuche haben am Finimeter einen „Swivel“, wodurch der Taucher das Finimeter drehen und es in jeder Lage ablesen kann.

Swivel sind heikle Teile der Tauchausrüstung. Der Platz zwischen den O-Ringen steht mit Wasser in Kontakt (sowie mit Mineralien und Salz) und hinter den O-Ringen herrscht derselbe Druck, wie in der Tauchfläche. Dreht der Taucher den Finimeter, drehen sich auch die O-Ringe. Wir haben es also mit dynamischen O-Ringen zu tun und müssen sie entsprechend mit Sorgfalt behandeln. Ein undichter O-Ring macht sich durch einen kleinen Blasenstrom aus dem Knickschutz oder der Konsole bemerkbar.

Der Raum zwischen den O-Ringen füllt sich während des Tauchgangs mit Wasser und kann somit verschmutzen. Nachdem die Luft den Swivel passiert, tritt sie in eine spiralförmige Röhre ein. Die Röhre dehnt sich mit zunehmendem Druck, wodurch sich die Finimeteradel bewegt.



Ein Druckmesser funktioniert mit einer offenen Bourdonröhre. Druck aus der Tauchflasche (200 bar oder mehr) dringt in die kleine Röhre im Finimeter ein. Da der Außenradius der Röhre grösser als der Innenradius ist, resultiert daraus eine Kraft, welche die Röhre streckt. Streckt sich die Röhre, bewegt sich die Nadel mit und der Taucher kann den Druck auf dem Finimeter ablesen.

Normalerweise herrscht im Gehäuseinnern des Finimeters kein Druck. Das Gehäuse selbst ist also nicht konstruiert, Druck standzuhalten. Ist die Bourdonröhre beschädigt und der Druck findet den Weg ins Gehäuse, berstet es.

Um dies zu verhindern, sind Finimeter mit einem Überdruckventil ausgestattet. Der Druck kann sich durch dieses Ventil seinen Weg ins Freie suchen, ohne dass das Gehäuse berstet. Oft ist das Überdruckventil einfach ein Stück Plastik, das herausspringt, bevor das Plastikgehäuse des Finimeters explodiert. Eine Konsole oder ein Plastikschutz muss daher genau über dem Ventil ein Loch haben. Eine Konsole ohne ein solches Loch, oder mit dem Loch am falschen Platz verhindert, dass der Plastikstopfen herauspringt und der Druck baut sich weiter im Finimetergehäuse auf. Ab einem gewissen Druck hält das Gehäuse diesem nicht mehr Stand und explodiert. Vermeide es daher, Instrumente verschiedener Hersteller in einer Konsole zu integrieren.

Heutzutage findest du meist elektronische Tiefenmesser. Der Drucksensor verändert seinen elektronischen Widerstand abhängig vom äusseren Druck. Die Messung des Widerstandes wird in Tiefe umgerechnet, die du dann vom Display ablesen kannst. Ausser dem Spülen mit Süßwasser, der Reinigung der Konsole, der Vermeidung direkter Sonneneinstrahlung und dem Batteriewechsel (und manchmal nicht mal das), gibt es keine weiteren Pflege- und Wartungsmassnahmen für dieses Instrument.

Die meisten dieser Tiefenmesser (Tauchcomputer) erlauben es dir, bestimmte Tauchgangsdaten, wie verwendete Nitroxmischung, Höhe über dem Meer und die Anfälligkeit gegenüber Dekompressionskrankheit einzustellen. Sie zeichnen auch Tauchgangsdaten auf.



Die meisten traditionellen Tiefenmesser haben eine Bourdonröhre, die derjenigen im Finimeter sehr ähnlich ist. Tiefenmesser haben eine geschlossene Bourdonröhre, was bedeutet, dass kein Druck in die Röhre gelangt. Der Druck übt seine Kraft auf das Äussere der Röhre aus. Die Röhre krümmt sich nach innen und die Nadel bewegt sich mit. Somit kannst du die Tiefe ablesen.

Die Röhre wird während der Produktion mit einem Gas (und damit mit atmosphärischen Druck) gefüllt und verschlossen. Das Gehäuse ist mit einer Flüssigkeit gefüllt, die den Druck auf die Röhre überträgt. Die verschiedenen verwendeten Gas- und Flüssigkeiten haben zu ganz verschiedenen Namen geführt, wie zum Beispiel Heliumtiefenmesser oder ölfüllte Tiefenmesser, um

anzugeben, dass die Röhre mit Helium gefüllt ist oder in einem Ölbad liegt. Die unterschiedlichen Materialien versuchen die Anfälligkeit auf Temperatur zu vermindern. Extreme Temperaturunterschiede können die Tiefenangaben um mehrere Meter verfälschen.

Aufgrund von Höhenänderungen, Druckänderungen auf Meereshöhe oder Temperaturänderungen, zeigen die Tiefenmesser an der Oberfläche oft nicht Null Meter an. Zeigt die Nadel zwei Meter unter Null an der Oberfläche an, zeigt sie 18 Meter Tiefe in 20 Meter und 28 Meter in 30 Metern Tiefe an.



Membrantiefenmesser haben das gleiche Problem. Meistens findest du deswegen an solchen Tiefenmessern ein Kalibrierungsrad. Taucher, die den Tiefenmesser an der Oberfläche auf Null stellen, lesen in der Tiefe die tatsächliche Tiefe ab (mit einem Unterschied von etwa drei Prozent in Süß- oder Salzwasser). Ein Membrantiefenmesser ist mit Gas gefüllt. Mit zunehmendem Druck drückt die (Metall) Membran nach innen und auf einen Mechanismus, der den Volumenverlust durch eine Nadel als Tiefenangabe anzeigt.

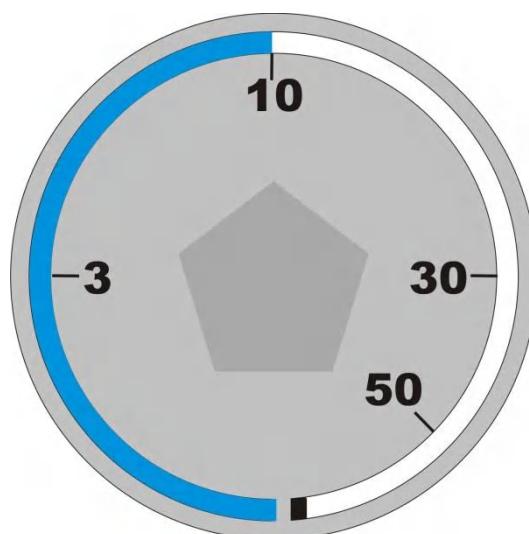
Bei beiden Typen dieser Tiefenmesser verhält sich die Bewegung der Membran oder Röhre mehr oder weniger

linear mit dem Druckanstieg. Das Ablesen des Tiefenmessers in grossen Tiefen ist oft genauer, als in den Tiefen für den Sicherheits- oder Dekompressionsstopp.

Diese Typen von Tiefenmesser waren in den Zeiten der Tauchtabellen sehr beliebt. Mit Tauchtabellen musst du den ganzen Tauchgang für die gesamte Zeit auf der Maximaltiefe berechnen. Dies ist der Grund, warum du eine zweite (rote) Nadel auf diesen Tiefenmessern findest. Die rote Nadel wird durch die schwarze Nadel mitgezogen und bleibt bei der maximalen Tiefe stehen, d.h. der Tiefe, die du für die Tauchgangsplanung brauchst. Ist die Nadel blockiert, kannst du das Problem mit einer Mischung aus warmen Wasser und weissem Essig lösen. Die Mischung löst die Salze auf.

Ein Kapillartiefenmesser hat nicht die Probleme, die Bourdon- und Membrantiefenmesser haben. Zum Beispiel Probleme wie Ablesegenauigkeit auf dem Dekompressionsstopp und der Anzeige von tatsächlichen statt theoretischen Tiefen. Der Kapillartiefenmesser ist eine Röhre mit sehr kleinem Durchmesser (daher der Name Kapillar). Der Radius ist so klein, dass kein Wasser aufgrund seiner Oberflächenspannung in die Röhre gelangen kann. Wasser kann also nicht ein- oder ausfliessen, ohne dass wir Kraft (Druckveränderung) anwenden.

Die Röhre kann mit einer luftgefüllten umgedrehten Flasche verglichen werden, die sich nach dem Gesetz von Boyle verhält. Der doppelte Druck reduziert das Volumen auf die Hälfte (in 10 Metern Tiefe auf Meereshöhe ist der Druck gleich 2 bar, das Doppelte von einem bar und die



10 Meter Tiefenmarke befindet sich auf der halben Röhrenlänge). Die Hälfte der Skala ist also für Tiefen von Null bis zehn Meter reserviert, weshalb dieser Typ von Tiefenmesser in geringen Tiefen sehr genau ist. Es ist allerdings nicht ganz einfach zu sehen, wo die Trennung zwischen Wasser und Luft verläuft.

Kapillartiefenmesser werden häufig beim Bergseetauchen verwendet, da sie die Tauchgangsberechnung des Tauchers vereinfachen. Da Kapillartiefenmesser nach dem Gesetz von Boyle arbeiten, werden Höhenänderungen (und damit Änderungen des atmosphärischen Drucks) berücksichtigt.

Befindet sich ein Bergsee auf einer Höhe mit 0,8 bar atmosphärischen Druck, hat die Luft in der Kapillare den gleichen Druck. Verdoppelt sich der Druck, halbiert sich das Volumen. Das Doppelte von 0,8 bar ist 1,6 bar. Der Tiefenmesser zeigt 10 Meter Tiefe an, obwohl der Taucher sich nur auf 8 Meter Wassertiefe befindet.

Kapillartiefenmesser geben also im Gegensatz zu anderen Tiefenmessern eine grössere Tiefe an, als die tatsächliche Tauchtiefe. Andere Tiefenmesser zeigen bei abnehmendem atmosphärischem Druck eine geringere Tiefe an. Kapillartiefenmesser zeigen nicht die tatsächliche (hier 8 Meter), sondern die theoretische Tiefe (hier 10 Meter) an. Die theoretische Tiefe ist gleich der Äquivalenztiefe auf Meereshöhe. Mit anderen Worten, der Taucher muss in unserem Beispiel seine maximale Grundzeit auf 10 Metern berechnen.

## Index

### -A-

Ansprechdruck.....	20
Atemkalk.....	30
Atemkomfort.....	15
Axiale Angriffsfläche .....	10

### -B-

Berstscheibe .....	7
Bohrung.....	24

### -C-

Carbon.....	26
-------------	----

### -D-

Downstream Override.....	23
Druckmesser .....	37

### -E-

Einstellung .....	16
Enriched Air.....	33

### -F-

Finimeter .....	36
Flaschenventil.....	7

### -G-

Gegenlunge.....	32
Gegenüberliegende Kräfte.....	10

### -H-

Hydrostatischen Test.....	5
---------------------------	---

### -I-

Inflator .....	34
Inflator/Lungenautomat-System .....	34

Isolation.....	25
----------------	----

### -K-

Kapillartiefenmesser .....	38
Kipphebel.....	22
Kolben .....	23
Kolbengesteuert.....	11
Kreislaufstauchgeräte .....	29

### -L-

Luftlieferleistung.....	19
-------------------------	----

### -M-

Membrangesteuert.....	15
Mitteldruckkammer .....	12
Mitteldrucksitz .....	20

### -N-

Nitroxflaschen .....	34
----------------------	----

### -P-

Pilot zweite Stufe.....	24
-------------------------	----

### -R-

Radiale Kräfte .....	10
Reserveschaltung.....	8

### -S-

Schnellablässe.....	36
Swivel .....	36

### -T-

Tauchflaschen.....	4
Tiefenmesser.....	37
Traditionellen zweiten Stufe .....	21

**-U-**

Umgebungsdruckkammer ..... 12

**-V-**

Vereisung ..... 25

Visuelle Inspektion ..... 5

**-Z-**

Zweite Stufen ..... 19