



Kompressoren und Nitrox Anlagen
Scuba Publications – Daniela Goldstein
Jan Oldenhuizing

Alle Rechte 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, 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 jedermann benutzt werden dürften.

Mit Dank an Lenhardt & Wagner GmbH für die zu Verfügung gestellte Bilder und an Aerotechnica Coltri S.p.A. für ein Kompressor Block für aufnahmen.

Inhaltsverzeichnis

Kompressoren	3
Zugehör & Auswahl	24
Nitrox Anlagen.....	37
Index	49

Einleitung

Alle Taucher auf einer höheren Ausbildungsstufe sollten Kenntnisse über Kompressor Handling und Nitrox Anlagen haben. Aber über dieses Thema gibt es so gut wie keine Publikationen. Mit diesem Buch werden alle wichtigen Konzepte und Prinzipien für Alle erklärt, die gerne mehr über diese Thematik wissen möchten oder müssen. Kompressoren (und die angeschlossenen Nitrox Anlagen) können als das „Herz“ eines Tauchcenters angesehen werden. Sollte der Kompressor nicht mehr funktionieren, dann hören alle Tauchaktivitäten auf.



Auch wenn du selber keinen Kompressor bedienst, dann kannst du mit dem Wissen darüber deine eigene Sicherheit während deinen Tauchaktivitäten verbessern. Reine Luft und das richtige Nitroxgemisch sind für die Sicherheit eines jeden Tauchgangs wichtig. Wenn du die Ausrüstung kennst, die zum Füllen der Tauchflaschen benutzt wird, dann kannst du besser die Zeichen eines eventuellen Problems während dem Füllvorgang erkennen. Neben den Sicherheitsaspekten ist dieses Thema auch interessant.

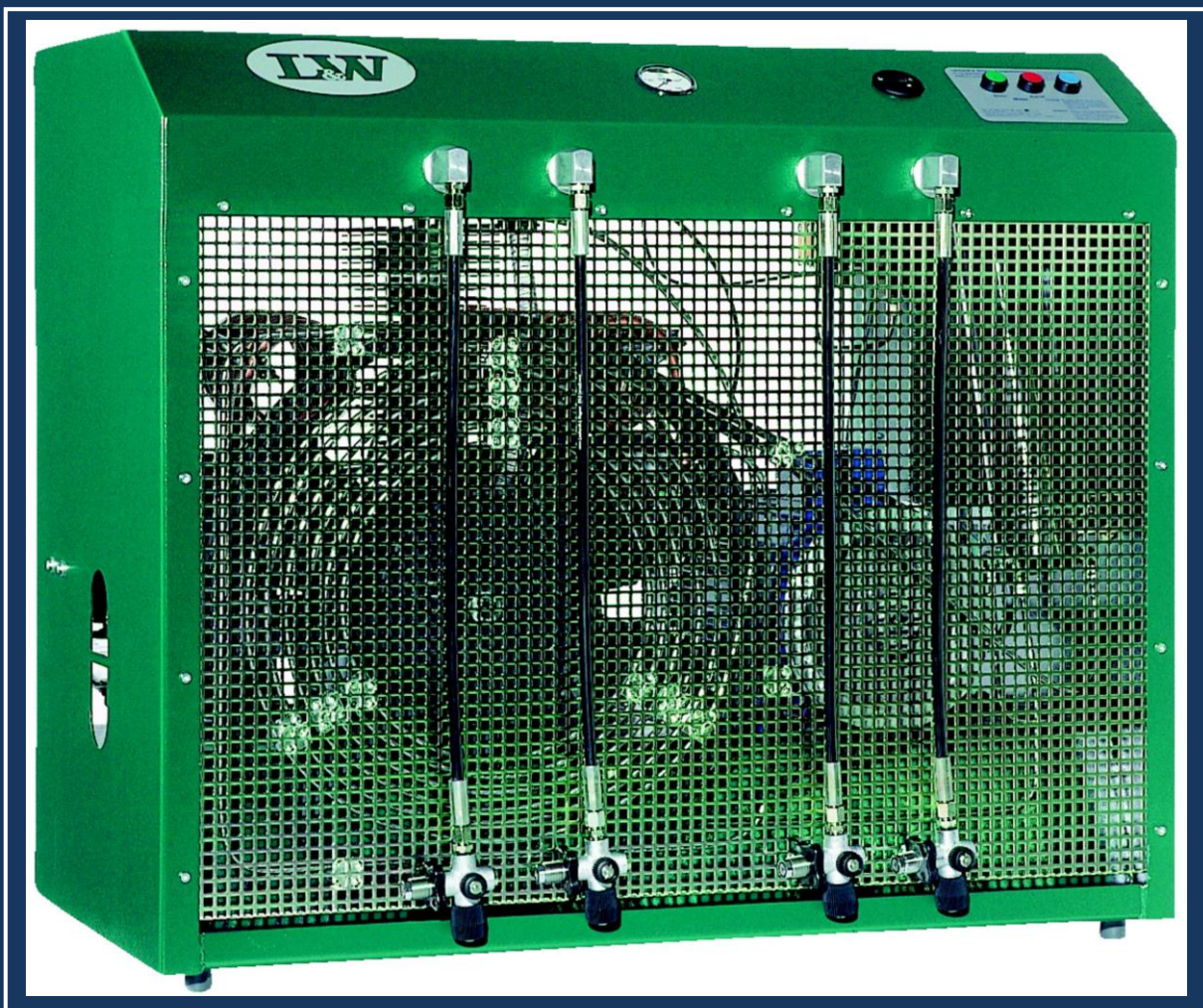
Um die Arbeitsprinzipien besser zu verstehen, werden im ganzen Buch immer wieder Reparaturverfahren und Einstellungsprozeduren für Kompressoren erklärt. Es ist NICHT die Absicht dich auszubilden, um Kompressoren zu reparieren oder Instandhaltungen durchzuführen. Alle Instandhaltungen und Wartungen müssen von einem ausgebildeten Reparaturtechniker des entsprechenden Herstellers durchgeführt werden. Nur diese Techniker haben die richtigen Werkzeuge und Ersatzteile, sind informiert über eventuelle Änderungen und Rückrufe und haben die Handbücher und Protokolle für die individuellen Komponenten des Systems. Die unberechtigte Manipulation an Kompressoren und Nitrox Anlagen führt zu dem Verlust der Garantie und verlagert die Verantwortung des Herstellers auf die Person, die die Anlage manipuliert hat.

Nur die Lektüre dieses Buches wird dir kein vollständiges Verständnis der Materie vermitteln. Dieses Buch wurde geschrieben, um in Verbindung mit einem Kurs über Kompressor und Nitrox Anlagen verwendet zu werden. Der Instruktor wird dir helfen alle in diesem Buch behandelten Aspekte zu verstehen und dir praktische Beispiele zeigen.

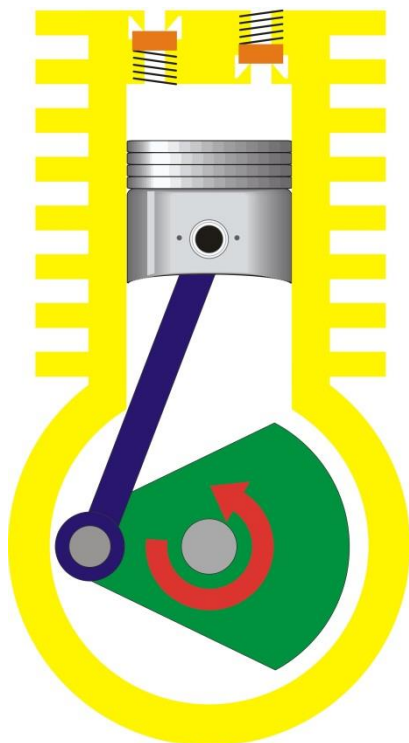
Kompressoren

Kompressoren sind Teil einer Füllanlage. Dieses Kapitel beschränkt sich auf den Kompressorblock und die damit direkt verbundenen Teile. Der Motor, die Füllkonsole, der Speicher und andere Teile werden im nächsten Kapitel behandelt.

Als erstes werden die am meisten verwendeten Typen von Kompressoren mit ihren wichtigsten Eigenschaften erklärt. Als nächstes werden die einzelnen Teile des Kompressors mit ihren Funktionen und Zweck behandelt. Es wird klar werden, dass es nicht möglich ist den Luftdruck auf 200 oder 300 bar zu erhöhen, ohne dass dies Konsequenzen für die Luftfeuchtigkeit und Temperatur hat. Viele Teile des Kompressorblocks sind notwendig, um Komplikationen mit Feuchtigkeit und Temperatur vorzubeugen.



Rotation und axiale Bewegung



In einem Verbrennungsmotor bewegt eine zeitlich festgelegte Explosion einen Kolben (der graue Teil in der Zeichnung) auf und ab. Die resultierende axiale Kraft wird über den Pleuel (der blaue Teil in der Zeichnung) auf die Pleuellagerstange (der grüne Teil in der Zeichnung) geleitet. Der Pleuel ist so angebracht (abseits des Zentrums der Rotation), dass die axiale Bewegung des Pleuels eine Rotation bewirkt. Diese Rotation wird durch mehrere Mechanismen weitergeleitet und dreht somit z.B. die Räder eines Autos.

Ein Kompressor hat dieselben Teile, aber letztendlich arbeitet er genau entgegengesetzt. Die Rotation wird durch einen Verbrennungs- oder Elektromotor geliefert. Die Rotation wird genutzt, um die Pleuellagerstange anzutreiben. Durch den Pleuel wird der Pleuel auf und ab bewegt und verändert somit immer wieder das Volumen im Zylinder. Wenn der Pleuel nach oben gedrückt wird, dann verkleinert sich das Volumen des Zylinders und der Druck steigt an. Dank Ventilen wird die komprimierte Luft in der richtigen Richtung aus dem Zylinder gepresst. Ein zweites Ventil ermöglicht neuer Luft für den nächsten Kompressionszyklus nachzuströmen.

Taucher wollen ihre Flaschen auf einen Druck von 200 oder 300 bar gefüllt haben. Um diesen Druck mit einem einzelnen Zylinder zu erreichen, müsste sich ein Pleuel zwischen der niedrigsten und der höchsten Position mit einem Faktor 200 bis 300 bewegen, um das Volumen im Zylinder zu verändern. Obwohl es theoretisch möglich wäre, funktioniert es normalerweise nicht so. Die meisten Kompressoren in Tauchcentern haben 3 oder 4 Zylinder, auch „Stufen“ genannt.

Luft gelangt durch die erste Stufe in den Kompressor und wird hier auf einen Mitteldruck komprimiert. Diese komprimierte Luft wird dann wiederum auf einen höheren Mitteldruck komprimiert. Nur bei der letzten Stufe des Kompressors wird ein Druck von 200 oder 300 bar erreicht. Das könnte den Eindruck erwecken, dass die Luft in bestimmten Schritten komprimiert wird. Das komprimierte Luft von einer zur nächsten Stufe weitergeleitet wird, nachdem sie auf einen neuen Mitteldruck komprimiert wurde. Das ist aber nicht der Fall. Du solltest es als einen kontinuierlichen Prozess betrachten. Ein Ventil ermöglicht der Luft in den Zylinder zu strömen während sich der Pleuel nach unten bewegt und schliesst wieder, wenn der Pleuel sich nach oben bewegt. In diesem Moment öffnet sich ein anderes Ventil und erlaubt der Luft in den nächsten Zylinder zu strömen. Das Ventil schliesst sich wieder, wenn der Pleuel beginnt sich nach unten zu bewegen.



T, W oder X

Die beim Tauchen am meisten verwendeten Kompressoren gehören zu den Typen T, W oder X. Es gibt auch noch andere Typen, die sind aber seltener. Wenn du einmal die Funktionsweise von den gängigsten Modellen verstanden hast, dann kannst du dieses Wissen auch auf andere Typen anwenden.

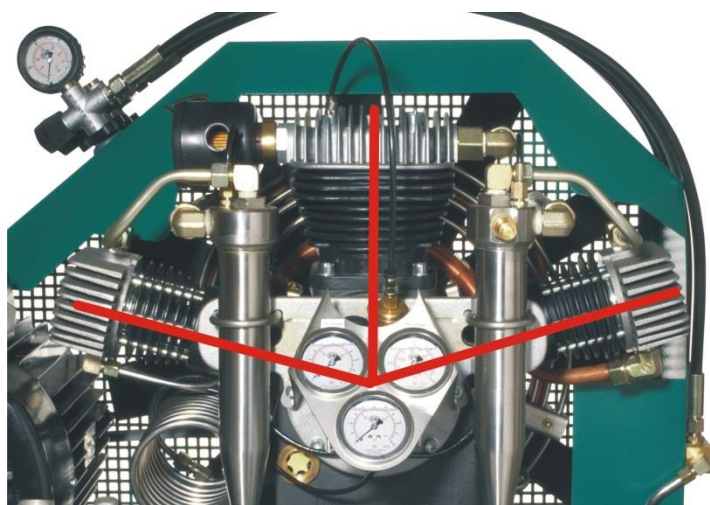
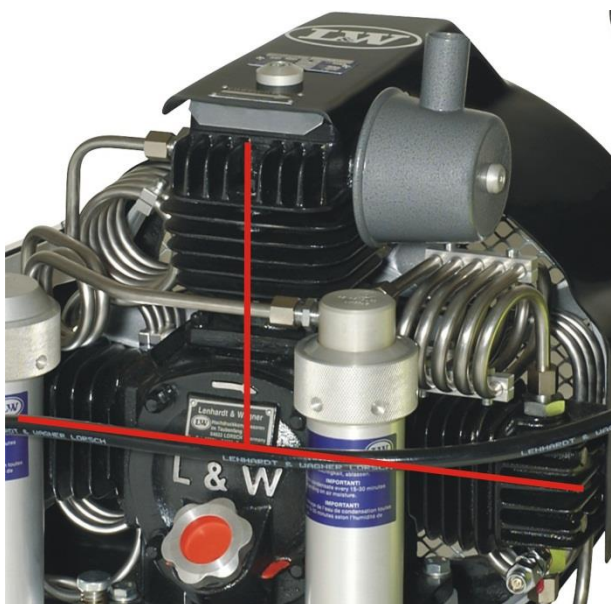
LWX

Der Name T, W oder X bezieht sich auf die Position der Zylinder. In einem T-Kompressor befindet sich die erste Stufe oben auf dem Kompressor und die zweite und die dritte Stufe horizontal an den Seiten. Ein W-Kompressor hat auch drei Stufen, mit dem einzigen Unterschied, dass hier die zweite und die dritte Stufe in einem leicht nach oben gerichteten Winkel angebracht sind. W-Kompressoren sind grösser als T-Kompressoren. X-Kompressoren haben vier Zylinder, die in Form eines X montiert sind.

T-Kompressoren haben einen 90° Winkel zwischen der ersten Stufe oben und den beiden horizontal angebrachten Zylindern an den Seiten. T-Kompressoren sind für den persönlichen Gebrauch gedacht. Sie sind klein und das Füllen einer Flasche kann bis zu 20 Minuten dauern. Taucher die in entlegenen Gebieten tauchen, benutzen diesen Kompressortyp, um ihre eigenen Flaschen zu füllen.

Das Hauptproblem mit diesen Kompressoren ist die Schmierung. Der Kompressor hat keine Ölpumpe oder einen anderen effizienten Mechanismus, um während dem Füllen das Öl zu verteilen. Die Schmierung wird durch einen „Schleuderstift“ erreicht, der an der Kurbelwelle montiert ist und der Öl aus der Ölwanne schöpft und dieses nach oben ins Innere des Kompressors schleudert.

Damit dieser primitive Schmierungsmechanismus funktioniert, muss die Kurbelwelle sehr schnell drehen. Es ist normal, dass diese Modelle bis zu 3.000 Umdrehungen pro Minute machen. Bei dieser Drehzahl heizt sich der Kompressor schnell auf. Aufgrund dieses Problems in Verbindung mit der schlechten Schmierung, sollten die meisten T-Kompressoren jede halbe Stunde zum Abkühlen ausgeschaltet werden, bevor eine weitere Flasche gefüllt wird.



W-Kompressoren haben auch drei Zylinder. Sie sind aber mit einem besseren System zur Ölverteilung ausgestattet. Sie drehen nur halb so schnell wie T-Kompressoren. Die Schmierung wird entweder durch eine Ölpumpe erreicht oder durch einen Mechanismus der mit der Kolbenbewegung die beweglichen Teile in der Maschine ölt.

Die meisten W-Kompressoren können den ganzen Tag laufen ohne eine Pause zur Kühlung. Somit können sie kommerziell eingesetzt werden. Ein durchschnittlicher Kompressor dieses Typs kann eine Flasche in 8 bis 10 Minuten füllen. T-

Kompressoren sind meistens tragbar mit einem Gewicht unterhalb von 50 kg. W- Kompressoren sind schwerer und wiegen mehr als 100 kg.



Der X- Typ eines Kompressors hat vier Zylinder, die in einer X Form angeordnet sind. Sie können mehr Luft in einer kürzeren Zeit komprimieren und werden in grösseren Tauchgeschäften verwendet. Die Luft gelangt durch die erste Stufe in den Kompressor, die man leicht am Luftfilter der daran montiert ist, erkennen kann. Die Grösse des Luftfilters ist eine Andeutung wie viel Luft von dem Kompressor komprimiert werden kann. Je grösser der Luftfilter, desto schneller kann der Kompressor Flaschen füllen. Die zweite Stufe befindet sich auf der gegenüberetzten Seite der ersten Stufe. Die dritte Stufe zeigt auf der anderen Seite des Kompressors nach unten und die vierte und letzte Stufe, ist entgegengesetzt zur dritten Stufe angebracht.

Vier Zylinder haben einige Vorteile. Die Kompression (vom Umgebungsdruck auf 200 oder 300 bar) verläuft jetzt in vier Schritten (im Gegensatz zu drei). In einem dreistufigen Kompressor sind typische Kompressionsschritte folgende:

1 bar → 7 bar → 48 bar → 220/330 bar

In einem vierstufigen Kompressor könnten die Schritte folgende sein:

1 bar → 3.5 bar → 17 bar → 67 bar → 220/330 bar

Die Druckbelastung zwischen zwei nebeneinander liegenden Stufen halbiert sich also bei einem vierstufigen Kompressor, im Vergleich zu einem dreistufigen Kompressor. Das führt zu einer wesentlich geringeren Lärmbelästigung und vermindert auch die Abnützung von Ventilen und anderen beweglichen Teilen. Ein anderer wichtiger Aspekt ist, dass das Druckverhältnis zwischen zwei nebeneinander liegenden Stufen zu einem geringeren Temperaturanstieg der Luft führt. Die Temperatur bei der Kompression der Luft in einem Kompressor ist ein wichtiger Aspekt, den wir später detailliert besprechen.

Bis zu welchem Druck die Flaschen gefüllt werden können, wird nicht vom Kompressor bestimmt. So gut wie alle Kompressoren können 200 oder 300 bar Flaschen füllen. Ein Kompressor kann Luft auf einen viel höheren Druck komprimieren und muss deswegen mit einem Sicherheitsventil (Enddrucksicherheitsventil) ausgestattet sein, um zu verhindern dass der Kompressor sich selbst „zerstört“. Es ist das angebrachte Enddrucksicherheitsventil das entscheidet, bis zu welchem Druck eine Tauchflasche gefüllt werden kann.

Aufgrund der wichtigen Funktion des Enddrucksicherheitsventils wird dieses vom Hersteller verplombt. Sollte dieses Ventil eine Fehlfunktion aufweisen, dann wird es nicht vor Ort repariert, sondern ausgetauscht. In vielen Fällen kann man das kaputte Ventil zum Umtausch an den Hersteller einsenden.



Ein Kompressor kann also beliebig für 200 oder 300 bar genutzt werden. Das ist nicht der Fall mit verschiedenen anderen Ausrüstungsteilen im System. Das Filtergehäuse, Leitungen, Füllkonsole, Speicherflaschen und Füllschläuche müssen alle dem Druck standhalten, auf welchem der Kompressor arbeitet. Obwohl es möglich wäre ein 300 bar Sicherheitsventil in einen 200 bar Kompressor einzubauen, solltest du dieses nicht ohne Rücksprache mit dem Hersteller machen.

Temperatur und Luftfeuchtigkeit

Du kannst den Druck eines Gases nicht ohne einen Temperaturanstieg erhöhen. Wie wir vorher schon gesehen haben, ist dieses Problem in einem dreistufigen Kompressor grösser, als in einem vierstufigen. Die Temperaturzunahme stellt aber eine wichtige Überlegung für alle Kompressoren dar, die Flaschen auf 200 oder 300 bar füllen. Andere Überlegungen werden wir später noch besprechen. Aber bevor wir mit den Funktionen von Kompressoren und deren Einzelteilen beginnen, müssen wir uns mit dem Einfluss von Temperatur auf die Luftfeuchtigkeit beschäftigen.

100% Luftfeuchtigkeit auf Meereshöhe	
Grad Celsius	Luftfeuchtigkeit in Gramm pro kg Luft für 100% Feuchtigkeit
50°	88.12 Gramm
40°	49.81 Gramm
30°	27.69 Gramm
20°	14.85 Gramm
10°	7.76 Gramm
0°	3.84 Gramm

Die Menge an Wasser in der Luft wird als Luftfeuchtigkeit in Prozenten ausgedrückt. 100% Luftfeuchtigkeit bedeutet, dass sich die maximale Menge an Wasser in der Luft befindet. Wenn die Wassermenge 100% übersteigt kondensiert der Überschuss und wird flüssig (Wasser). Wasser ist aber nicht komprimierbar. Wenn Wasser im Kompressor kondensiert, dann besteht ein Risiko für den Kompressor. Wenn die (aufwärts) Bewegung des Kolbens durch Wasser blockiert wird dann kann der Kolben selber, das angeschlossene Gestänge oder die Kurbelwelle beschädigt werden.

Es ist deswegen sehr wichtig, die Luftfeuchtigkeit im Kompressor unter 100% zu halten. Die Feuchtigkeit ist so gut wie überhaupt nicht von der Dichte der Luft abhängig, sondern von der Temperatur. Die Menge an Wasser in der Luft, die einem Wert von 100% Feuchtigkeit entspricht wird nicht durch die Dichte der Luft beeinflusst, wird sich aber extrem bei einem Temperaturwechsel verändern (siehe Tabelle).

Du solltest mit diesem Konzept schon vertraut sein. Wenn du ein kaltes Getränk an einem warmen Sommertag auf den Tisch stellst, dann beginnt das Wasser in der Luft an der Aussenseite des Glases zu kondensieren. Die Luft, die sich in der Nähe des Glases befindet wird durch das kalte Getränk gekühlt. Bei der geringeren Temperatur übersteigt jetzt die Feuchtigkeit in der Luft 100%. Das gleiche Konzept trifft auch auf Lungenautomaten zu. Viele Taucher entscheiden sich für eine Metall oder Carbon zweite Stufe, weil warme ausgeatmete Luft an der kälteren Innenseite der zweiten Stufe gekühlt wird, ein Teil der Feuchtigkeit kondensiert und mit dem nächsten Atemzug wieder eingeatmet wird. Taucher mit einer Metall oder Carbon zweiten Stufe (gute Wärmeleiter) sind deswegen weniger von einem trockenen Mund während dem Tauchgang betroffen.

In einem Kompressor spielen sich zwei entgegengesetzte Abläufe ab. Die Luft wird komprimiert. Die gleiche Menge an Feuchtigkeit befindet sich also jetzt in einem kleineren Volumen und somit steigt die Luftfeuchtigkeit an. Gleichzeitig steigt die Temperatur an, welches wiederum die Luftfeuchtigkeit verringert. Aus diesem Grund sollten keine Probleme mit der Feuchtigkeit in der ersten und zweiten Stufe des Kompressors erwartet werden. Gehen wir davon aus, dass wir einen dreistufigen Kompressor haben und Flaschen bei einer Umgebungstemperatur von 10°C und einer Luftfeuchtigkeit von 50% füllen möchten. Wie wir vorher gesehen haben, reduziert die erste Stufe in einem solchen Kompressor das Volumen mit einem Faktor 7. Somit würde die Feuchtigkeit auf 350% ansteigen und zur Kondensation führen.

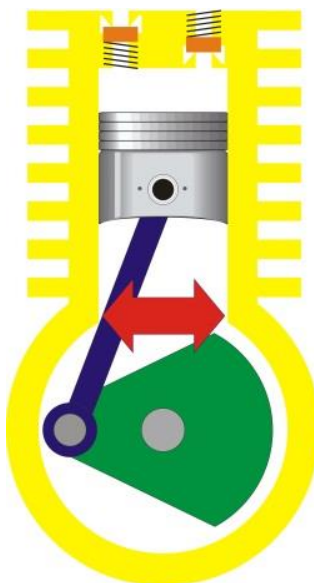
Gleichzeitig steigt die Temperatur an. Luft bei 10°C und einer Feuchtigkeit von 50% würde Wasser von 3,88 Gramm pro Kilogramm Luft (7,76 dividiert durch 2) entsprechen. Wenn die Lufttemperatur auf 50°C ansteigen würde, dann würden die 3,88 Gramm Wasser (bei dem gleichen Druck) jetzt die Feuchtigkeit unter 5% sinken lassen (siehe Tabelle). Dank des Temperaturanstieges sinkt die Feuchtigkeit ab (Luft mit weniger als 5% Feuchtigkeit die bei Faktor 7 komprimiert wird ergibt einen Wert der Feuchtigkeit von weniger als 35% und das wiederum ist niedriger als die Luftfeuchtigkeit in der Umgebungs-

luft). In der Realität ist der Temperaturanstieg wesentlich höher als in dem gegebenen Beispiel. Alle Berechnungen in diesem Kapitel sind vereinfacht, um dich auf das Problem aufmerksam zu machen. Die Werte und Berechnungen eignen sich nicht für „reelle“ Probleme.

Während die Luft die nächsten Stufen des Kompressors durchläuft, setzt sich die Volumenverringering fort, der Temperaturanstieg ist aber nur geringfügig. Der Vorteil des Temperaturanstiegs, welcher der Verringerung des Volumens entgegen wirkt, ist ein „Vorteil“ der nur auf die erste und zweite Stufe des Kompressors zutrifft. Bevor die Luft der zweiten Stufe in die nächsten Stufen weiter strömt, muss Wasser aus der Luft entfernt werden. Wenn das nicht gemacht wird, dann kann der Kompressor irreparabel beschädigt werden. In den nächsten Kapiteln erklären wir die verschiedenen Teile eines Kompressors im Detail. Temperatur, Sicherheit, aber vor allem Feuchtigkeit sind die Gründe warum ein Kompressor aus mehr Teilen besteht, die nötig sind, um die Luft auf einen höheren Druck zu komprimieren.

Abnehmendes Volumen und Kolbenform

In einem Automotor haben alle Zylinder und Kolben dieselbe Grösse und Form. Aber jetzt sollte es schon klar sein, dass das in einem Kompressor nicht möglich ist. Wenn die Luft von einer Stufe zur nächsten strömt, muss der für die Luft verfügbare Raum verringert werden. Wenn der nächste Zylinder dieselbe Grösse wie der vorherige hätte, dann würde sich die schon komprimierte Luft wieder auf Umgebungsdruck ausdehnen. Das maximale Volumen des nächsten Zylinders (Kolben in der untersten Position) sollte mehr oder weniger die Grösse des Minimum Volumens (Kolben in der obersten Position) des Zylinders entsprechen, von welchem es die komprimierte Luft auf einem Mitteldruck erhielt.



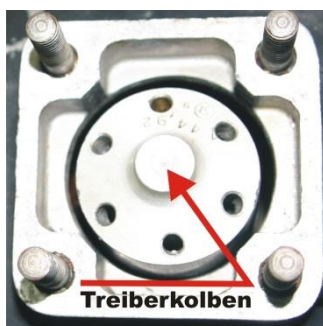
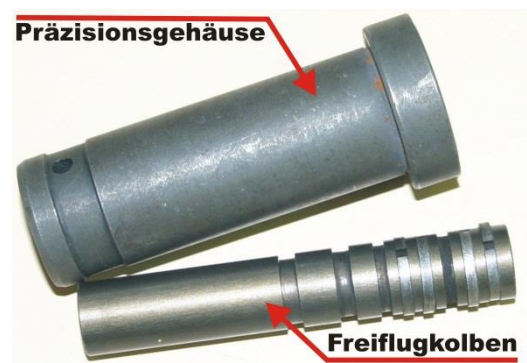
Die Grösse der Zylinder variiert sehr stark. Der Kolben der vierten Stufe (links) ist nur der helle Teil in der Mitte. Vergleiche diesen Durchmesser mit der ersten Stufe rechts im Bild.

Das jeweils geringere Volumen der weiteren Zylinder erfordert immer kleinere Durchmesser der Kolben. Das kreiert ein Problem in der Konstruktion des Kompressors. Die Rotation der Kurbelwelle resultiert in einer rechts – links Schwingung am Anschluss des Pleuels, während diese die Rotation in eine axiale Bewegung des Kolbens umsetzen muss. Der Durchmesser des Zylinders muss diese „Schwingung“ des Pleuels erlauben, was den Durchmesser auf ein Minimum begrenzt.

Mit abnehmendem Durchmesser des Kolbens wird es zunehmend schwieriger den benötigten Platz für die „Schwingung“ des Pleuels zu ermöglichen. Um dieses Problem zu lösen, ist der Kompressor mit unterschiedlich geformten Kolben ausgestattet. Einige dieser Kolben sind einzigartig für Kompressoren und findet man nicht in anderen Maschinen. Am Anfang erlaubt der Durchmesser einen normalen Kolben, wie man ihn in Autos und



Hierfür ist der „Freiflugkolben“ eine elegante Lösung. Du kannst dir einen Freiflugkolben als einen Stufenkolben vorstellen, der vom Hersteller absichtlich gebrochen wurde. Der Freiflugkolben wird von einem Treiberkolben nach oben befördert. Der Druck im Zylinder, oberhalb des Freiflugkolbens, veranlasst die Abwärtsbewegung. Obwohl der Treiberkolben und der Freiflugkolben nicht miteinander verbunden sind, sind sie während allen auf- und abwärts Bewegungen in Kontakt, unter der Voraussetzung, dass der Druck im Zylinder hoch genug ist, um den Kolben nach unten zu drücken.



Seite 9

oberhalb des Freiflugkolbens genügend Druck aufgebaut hat, um einen permanenten Kontakt mit dem Treiberkolben zu bewirken.

Die Dichtung zwischen dem Kolben und dem Zylinder wird mit Kolbenringen hergestellt. Drei oder mehr Kolbenringe um den Kolben herum halten einen Ölfilm am Platz. Die Kombination aus Kolbenringen und Ölfilm verhindert, dass Hochdruck aus dem Zylinder entweichen kann. Es können geringe Mengen an Luft (vielleicht 5 bis 10%) in Richtung Ölwanne entweichen, aber der grösste Teil der Luft verbleibt im Kreislauf und strömt von einer Stufe zur nächsten.

Nicht alle Freiflugkolben sind mit Kolbenringen ausgestattet (normale Kolben und Stufenkolben allerdings schon). Sollte ein Freiflugkolben keine Kolbenringe haben, dann muss ein anderes System dafür sorgen, dass das Öl (das zur Schmierung der beweglichen Teile benötigt wird) nicht in die Ölwanne gepresst wird. Eine gute Lösung hierfür ist eine Öldüse. Diese Düse erhält von der Ölpumpe das Öl und hält es solange zurück, bis der Öldruck ca. 60 bar erreicht. Jetzt ist der Druck hoch genug, um eine Feder wegzudrücken die eine Passage auf der Seite des Freiflugkolbens frei gibt (dieser Mechanismus erinnert an die erste Stufe eines kolbengesteuerten Lungenautomaten). Das eingespritzte Öl hat einen Druck der sich zwischen dem höchsten Druck in der letzten Stufe des Kompressors (200/300 bar) und einem Druck befindet, bei welchem die Luft in die Stufe strömt. Als Resultat bewegt sich das eingespritzte Öl wiederholt auf und ab, bevor es durch neues Öl ersetzt wird.

Ein- und Auslassventile

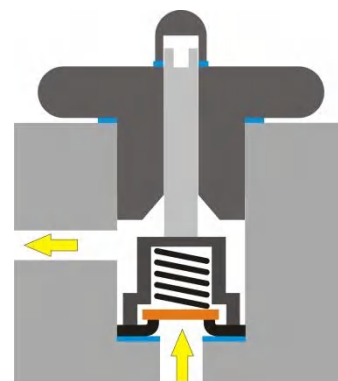


In dem Zylinderkopf befinden sich die Ventile die es der Luft ermöglichen in und aus dem Zylinder zu strömen. Das Einlassventil ist an der Innenseite und das Auslassventil an der Aussenseite (bei den meisten Kompressoren) angebracht. Einlass/innen und Auslass/aussen. Die Grösse der Ventile ist unterschiedlich, abhängig ob es sich um die erste Stufe des Kompressors oder eine spätere Stufe (und kleinere) handelt.

Eine schmale, schwache Feder drückt ein Metallventil gegen den Metallsitz. Schon die geringste Kolbenbewegung reicht aus, um die Federkraft zu überwinden. Wenn sich der Kolben nach unten bewegt,

dann öffnet sich das Einlassventil praktisch gleichzeitig. Das Gleiche passiert mit dem Auslassventil, wenn sich der Kolben nach oben bewegt. Es ist immer ein Ventil offen, während das andere geschlossen ist, abhängig ob sich der Kolben nach oben oder nach unten bewegt.

In der Zeichnung siehst du dieselben Teile wie auf dem Bild oben. Eine Feder drückt das Ventil (orange Teil) gegen den Sitz. Alle anderen Teile spielen eine Rolle in Bezug auf die Dichtung. Der Sitz wird durch die vier Arme des Federhalters gegen eine Kupfer Beilagscheibe (der blaue Teil) gedrückt. Der Federhalter wird durch eine Mutter am Platz gehalten, welche wiederum selber am Zylinderkopf durch eine Beilagscheibe abgedichtet wird. Eine Schraube durch den oberen Teil der Mutter erlaubt zusätzliche Spannung auf den Federhalter auszuüben, um den Sitz fest gegen die untere Beilagscheibe zu drücken. Wenn die Schraube angezogen ist, wird eine zusätzliche Beilagscheibe platziert und alles mit einer Mutter luftdicht verschlossen. Wenn sich der Kolben nach oben bewegt, dann drückt der zunehmende Druck das Ventil vom Sitz weg und Luft kann zur Seite entweichen und in den nächsten Zylinder strömen.





Sollte ein Auslassventil kaputt sein, dann hat sich in den meisten Fällen der Sitz durch das Ventil gefressen. Es muss sowohl das Ventil, als auch die Beilagscheibe (die beiden Teile rechts im Bild) ausgewechselt werden.

Nicht alle Marken haben Auslassventile die man in Einzelteile zerlegen kann. In manchen ist das Auslassventil ein Einzelstück, in welchem alle anderen Teile zusammengebaut und abgedichtet sind. Wenn ein Auslassventil nicht richtig funktioniert, dann hat sich in den meisten Fällen der Sitz durch das kleine Ventil gefressen. Das Bild links auf der Seite zeigt ein beschädigtes neben einem neuen Auslassventil. Wenn das Auslassventil zerlegt werden kann, dann reicht es normalerweise aus, das kleine Ventil und die Beilagscheibe zu wechseln und der Kompressor ist repariert. Sollte das Auslassventil ein Einzelstück sein, dann muss es vollständig ersetzt werden.

weise aus, das kleine Ventil und die Beilagscheibe zu wechseln und der Kompressor ist repariert. Sollte das Auslassventil ein Einzelstück sein, dann muss es vollständig ersetzt werden.

Die Kosten eines Auslassventils werden durch das einfache Auswechseln kompensiert. Du hast gesehen, dass die Zylinder bei einem Kompressor (und deswegen auch die Zylinderköpfe) in einem bestimmten Winkel angebracht sind. Um ein Auslassventil zu wechseln, muss sich der Zylinderkopf in einer horizontalen Position befinden. Deswegen musst du den Zylinderkopf vom Zylinder entfernen und wieder anbringen, wenn das Auslassventil repariert ist. Wenn das Auslassventil ein Einzelstück ist, dann kann es in jedem Winkel ausgewechselt werden, was das Verfahren einfacher und schneller macht. Bei den meisten Kompressoren sind die kleinen Ein- und Auslassventile der letzten Stufe (dem Zylinder mit dem Freiflugkolben) Einzelstücke (Bild rechts). Im Fall eines Defekts der letzten Stufe des Kompressors muss das ganze Ventil ausgewechselt werden.



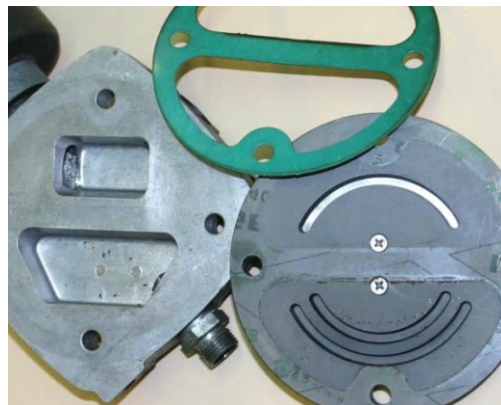
Die Konstruktion des Einlassventils ist wesentlich einfacher. Der Grund hierfür ist seine Position im Zylinderkopf. Der Druck im Zylinder presst den Sitz gegen seine Kupferbeilagscheibe. Ein komplexer Mechanismus ist für diesen Zweck also nicht nötig. Auf dem Bild siehst du die Teile eines Einlassventils einer zweiten Stufe mit dem Spezialwerkzeug zur Montage.

Die Beilagscheibe wird zuerst platziert, gefolgt von dem Sitz der mit der scharfen Kante in die Richtung des kleinen Ventils zeigt, das als nächstes kommt. Die Feder wird in das Gehäuse gelegt und mit der

Schraube im Zylinderkopf angeschraubt, um alle Teile in ihrer Position zu fixieren. Die Schraube muss plan in das Gehäuse des Zylinderkopfs eingeschraubt werden, ansonsten hat sich das Ventil bewegt und der Vorgang muss wiederholt werden. Das spezielle Werkzeug auf der linken Seite wird benötigt, um das Einlassventil zu entfernen und wieder zu montieren. Die Grösse der verschiedenen Zylinder und deswegen auch der Zylinderköpfe variiert. Aus diesem Grund ist auch der verfügbare Platz für die Ventile unterschiedlich.

Oben hast du ein kleines Ventil der letzten Stufe eines Kompressors gesehen. Die erste Stufe hat grössere Ventile. In älteren Kompressoren wäre das einfach nur eine vergrösserte Version der Ventile die wir vorher gesehen haben. Neuere Kompressoren sind mit einer anderen Technik ausgestattet. Eine laminierte Platte enthält 2 Passagen, eine wo die Luft einströmt und eine wo die Luft ausströmt. Die Ventile

sind identisch, aber in entgegengesetzte Richtungen montiert. Die laminierte Platte mit den Ventilen ist zwischen dem Zylinder und dem Zylinderkopf angebracht. Auf dem Bild siehst du eine laminierte Platte (rechts) eines modernen Kompressors mit Ein- und Auslassventil der ersten Stufe. Sie wird zwischen dem Zylinderkopf (links) und dem Zylinder montiert. Die Dichtung wird mit einer Zylinderkopfdichtung erreicht.



Ältere Kompressoren haben ein Auslassventil an der letzten



Stufe, das in den Zylinderkopf eingeschraubt ist. Der

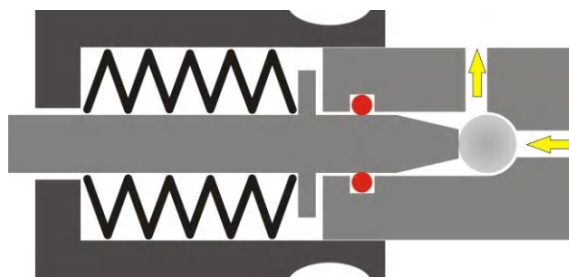
Druck, der durch das Ventil strömt ist sehr hoch und es hat schon mehrere Störungen mit diesem Ventiltyp gegeben. Heute haben die meisten Kompressoren für die letzte Stufe einen doppelten Zylinderkopf. Der erste enthält die Ventile und der zweite (mit demselben Durchmesser) ist darauf montiert, um das Auslassventil am Platz zu halten. Eine Schraube durch den 2. Zylinderkopf übt zusätzlichen Druck auf das Ventil aus, um die Dichtung zu gewährleisten. Es ist grundsätzlich dieselbe Funktion, die wir schon beim Auslassventil der 2. Stufe gesehen haben.

Druckhalteventil



Das Druckhalteventil ist essentiell für eine korrekte Funktion des Kompressors. Wie schon besprochen, hängt der Freiflugkolben von dem Druck in der letzten Stufe ab, um mit dem Treiberkolben in Kontakt zu bleiben. Wir haben auch besprochen, dass das Auslassventil sich in dem Moment öffnet, in dem der Kolben sich aufwärts bewegt. Wenn eine leere Flasche am Kompressor angeschlossen wäre, dann könnte die letzte Stufe nicht den Druck aufbauen der benötigt wird, um den Kolben wieder nach unten zu drücken, da alle komprimierte Luft sofort in die leere Flasche strömen würde. Der Kompressor würde jetzt nach dem Starten immer wieder an den Freiflugkolben schlagen (es würde weiterhin das typische tak - a - tak - a -tak Geräusch machen).

Druckhalteventile verhindern das. Ein federbelastetes Ventil erfordert einen Druck der die Federkraft überwinden kann, bevor die Luft aus dem Kompressor in die zu füllenden Flaschen strömen kann. Die Federkraft kann z.B. 120 bar sein. Die Luft im Kompressor muss einen Druck erreichen, der hoch genug ist, um die kleine Kugel gegen die Federkraft weg zu drücken, bevor die Luftpassage zu den Flaschen offen ist und diese gefüllt werden können (in der Zeichnung der gelbe Pfeil).



Das Druckhalteventil übt noch zwei andere gewünschte Funktionen aus. Nach dem Gebrauch hält es den Druck im Kompressor und verhindert das Feuchtigkeit in den Kompressor eindringen kann. Somit wird wiederum Korrosion im Kompressor verhindert. Manche Benutzer entlüften den Kompressor nach Gebrauch, das ist aber nicht empfohlen.

Die Bestückung mit einem Druckhalteventil hat noch eine andere wichtige Funktion. Das Ventil ist nicht sofort nach der letzten Stufe angebracht, sondern nach dem chemischen Filter. Wenn eine gefüllte Flasche von dem Füllschlauch abgeschraubt wird, dann muss der Füllschlauch entlüftet werden. Mit dem Entlüften sinkt der Druck wieder auf Umgebungsdruck und das entlüftete Volumen wird Teil der Arbeitsleistung beim nächsten Füllvorgang. Bringt man ein Druckhalteventil nach dem chemischen Filter an, verhindert es, dass der chemische Filter zusammen mit dem Füllschlauch entlüftet wird. Somit wird das Volumen verringert, das bei dem nächsten Zyklus unter Druck gebracht werden muss. Das oben besprochene trifft aber nicht zu, wenn Füllschläuche mit einem Entlüftungsventil versehen sind, welches eine teilweise Entlüftung des Füllschlauches ermöglicht, der an der Flasche angeschlossen ist (bei grösseren Kompressoren ist das fast immer so).

Auch in diesem Fall ist es wichtig, dass sich das Druckhalteventil nach dem Filter befindet. Somit ist sichergestellt, dass nur ein geringes Luftvolumen durch den Filter strömt (Luft bei 100 bar nimmt nur 1/100 des Raums ein, als die gleiche Menge Luft von 1 bar. Das kleinere Volumen strömt langsamer durch den Filter, welches in einem längeren und besseren Kontakt zwischen dem Filtermaterial (Inhalt) und der Luft resultiert (und deswegen in einer besseren Filterung).

Zwischenkühler und Abscheider (Feuchtigkeit)



Die Rotation des Kompressors wird benutzt, Luft auf Umgebungstemperatur über den Kompressor zu blasen. Selbst im wärmsten Klima ist die Umgebungsluft um einiges kühler als die Temperatur eines drehenden Kompressors. Für einen Kompressor ist die Umgebungstemperatur „kühl“, auch wenn es für dich heiss ist. Kompressoren haben aber trotzdem eine maximale Arbeitstemperatur (z.B. 40°C). Die Luftzirkulation hilft der Konvektionskühlung von Metallteilen. Konvektion bedeutet, dass Luft in Kontakt mit einer warmen Oberfläche abströmt wenn sie sich erwärmt und kältere Luft nachströmt. Konvektion geschieht „natürlich“, da warme Luft leichter als kalte Luft ist. Dies wird aber beschleunigt, wenn Luft über den Kompressor geblasen wird. Kühlung ist notwendig, um zu verhindern dass die Temperatur im Kompressor während den Kompressionsschritten zu hoch wird und auch, um angemessene Abscheidung von Feuchtigkeit in der komprimierten Luft zu gewährleisten.

Wenn die Luft von einem zum nächsten Zylinder strömt, wird sie durch eine Kühlspirale geleitet, um die Temperatur vor dem nächsten Kompressionsschritt zu verringern. Der Durchmesser der Kühlspirale ist zwischen der zweiten und der dritten Stufe gross, wird aber in den nachfolgenden Stufen kleiner, da die Luft stärker komprimiert ist und somit ein geringeres Volumen beansprucht. Die benötigte Länge der Kühlspirale wird mit dem Design der Maschine festgelegt. Sie sollte lang genug sein, um eine Temperatur unter 100° C zu erreichen, damit eine gute Funktion der Abscheider gewährleistet ist (besprechen wir später). In den Abscheidern muss die Luftfeuchtigkeit kondensieren, aber Wasser mit einer höheren Temperatur als 100°C wird gasförmig (Dampf) bleiben.



Es gibt keinen Abscheider zwischen der ersten und zweiten Stufe des Kompressors. Den Grund hierfür findest du in dem Abschnitt „Temperatur und Feuchtigkeit“. Ein dreistufiger Kompressor hat zwei Ab-

scheider. Einen zwischen der zweiten und dritten Stufe und einen nach der dritten Stufe. Ein vierstufiger Kompressor hat drei Abscheider. Abscheider befinden sich immer direkt nach der Kühlspirale. Die Luft muss jetzt soweit gekühlt werden das sie ca.100°C erreicht, damit die Abscheider richtig funktionieren können.



Es gibt drei Typen von Abscheider. Der erste wird Düsen oder Spray Abscheider genannt. Die Luft dringt durch ein Röhrchen in den Abscheider und wird gegen die Wände gesprüht. Das Wasser kondensiert an den kalten Wänden und tropft runter, während die trockene Luft durch ein Röhrchen das oben im Abscheider steckt, in die nächste Stufe des Kompressors strömt. Ein Loch am Boden des Abscheiders ist mit einem Ventil ausgestattet, dass periodisch geöffnet werden kann, um das kondensierte Wasser ablaufen zu lassen. Das Wasser wird durch das Loch im Boden gepresst. Dieser Abscheidertyp hat einen Nachteil. Die Luft wird immer an die gleiche Stelle geblasen. Obwohl Metall ein guter Wärmeleiter ist, dauert es ein wenig, bis sich die Wärme gleichmässig verteilt.

Der zweite Typ eines Abscheiders ist der Vortex. Grundsätzlich funktioniert er genauso wie der Düsen Abscheider, nur jetzt wird die Luft überall herumgesprüht und nicht nur auf eine bestimmte Stelle. Somit wird eine kühlere Temperatur der Abscheiderwand ermöglicht. Manchmal kann die Kühlung der Abscheiderwände nicht mit der Hitze im Inneren standhalten. In diesem Fall muss eine Lösung gefunden werden, die unabhängig von der Effektivität der Kühlung der Aussenseite (Wände) des Abscheiders ist.



Wenn ein Druckanstieg die Temperatur erhöht, dann trifft das Gegenteil auch zu. Wenn ein Druckabfall provoziert wird, dann kann ein Kühleffekt eintreten und deswegen auch eine Abscheidung von Wasser. Das wird mittels eines Sinterfilters erreicht, der die durchströmende Luft drosselt. Die Luft muss sich durch den Filter pressen, was wiederum zu einem höheren Druck führt. Wenn die Luft die Aussenseite des Filters erreicht, fällt der Druck stark ab. Mit dem Druckabfall verringert sich auch die Temperatur und die Abscheidung von Feuchtigkeit kann einsetzen.

Die Feuchtigkeit sammelt sich in dem unteren Teil des Abscheiders und muss regelmässig entleert werden. Das Benutzerhandbuch des Kompressors wird die genauen Intervalle angeben, wie z. B. jede halbe Stunde. Sollte das Entlüften vergessen werden und der Abscheider sich vollständig füllen, dann kann das Wasser in den nächsten Zylinder gesaugt werden, wo es den Kompressor irreparabel beschädigen kann. Dieselbe Beschädigung könnte auch eintreten, wenn das Ansaugrohr das die Umgebungsluft zu dem Kompressor bringt ins Wasser fällt, während der Kompressor läuft.



Wasser kann nicht komprimiert werden und sollte Flüssigkeit in den Zylinder eindringen, dann kann sich der Kolben nicht vollständig nach oben bewegen. Der Pleuel wird entweder die Kurbelwelle mit Gewalt nach unten oder den Zylinderkopf nach oben drücken. In beiden Fällen ist die Beschädigung des Kompressors erheblich. Aus diesem Grund sind viele Kompressoren mit einer

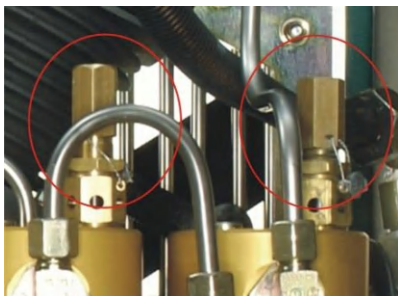
Installation ausgestattet, die die Abscheider automatisch entlüften. Die automatische Entlüftung der Abscheider wird mittels eines elektronischen Magnetventils erreicht. Ein Timer öffnet das Ventil in festgelegten Intervallen. In einigen Fällen hat jeder Abscheider seinen eigenen Timer, in anderen wiederum, wird die Entlüftung aller nachfolgenden Abscheider durch den Druckabfall des vorherigen Abscheiders eingeleitet.

Wenn das erste Magnetventil von dem elektronischen Timer geöffnet wird, wird die Flüssigkeit durch den Boden des Abscheiders entleert (genauso wie du deine Maske ausbläst). Während diesem Vorgang fällt der Druck im Abscheider ab. Die mechanische Lösung, um diesen Druckabfall zu nutzen (wenn nicht alle Abscheider mit einem eigenen Magnetventil ausgestattet sind) funktioniert mit kleinen Kolben, die den Abfluss so lange der Druck hoch genug ist verschliessen, um den Kolben in der geschlossenen Position zu halten.

Der Druck des ersten Abscheiders wirkt auf den Kolben der den Abfluss des zweiten Abscheiders verschliesst. Wenn der Druck abfällt, bewegt sich der Kolben nach oben und öffnet den Weg zum Entleeren des zweiten Abscheiders. Sollte es einen dritten Abscheider geben (wie es bei einem vierstufigen Kompressor ist), dann wird der Druckabfall im zweiten Abscheider in derselben Weise genutzt, um den Vorgang im dritten Abscheider einzuleiten.

Es ist nicht notwendig den Filter periodisch zu entleeren (da er keine Feuchtigkeit ansammelt). Das Ventil am Filter dient zum Entlüften wenn das Filtermaterial gewechselt wird. Beachte allerdings, dass in manchen Fällen ein Abscheider und der Filter in einem Gehäuse kombiniert sind.

Sicherheitsventile



Ein Kompressor ist mit Sicherheitsventilen für jede Stufe ausgestattet, in welcher der Druck zunimmt. Diese Ventile dienen nicht nur der Sicherheit, sondern sind auch ein wichtiger Hinweis für den Kompressor Techniker. Zum Beispiel: Nach der ersten Stufe in einem dreistufigen Kompressor, ist ein Sicherheitsventil angebracht, dass bei einem Druck von 8 bar aktiviert (geöffnet) wird. Dieses Ventil bläst ab. Die erste Stufe erhöht den Umgebungsdruck auf 7 bar, was nicht ausreicht, um das Sicherheitsventil anspringen zu lassen. Somit besteht die Wahrscheinlichkeit, dass die Luft des zweiten Kompressionsschrittes seinen Weg zurück, in Richtung der ersten Stufe findet. Der Techniker würde dann (als erstes) das Einlassventil der zweiten Stufe auf seine Dichtung prüfen.

Obwohl keine Anforderungen für die Platzierung von Sicherheitsventilen bestehen, befinden sie sich bei vielen Modellen an derselben Stelle. Am Zylinderkopf der zweiten Stufe kann man oft das Sicherheitsventil der ersten Stufe finden (an der Seite, wo die Luft der ersten Stufe in die zweite Stufe gelangt). Das Sicherheitsventil für die zweite Stufe befindet sich am Abscheider zwischen der zweiten und dritten Stufe. In einem vierstufigen Kompressor trifft dasselbe für das Sicherheitsventil der dritten Stufe zu (am Abscheider zwischen der dritten und vierten Stufe). Das Enddrucksicherheitsventil hat keinen standardisierten Platz, ist aber oft mit dem Endabscheider kombiniert.

Optisch können die Sicherheitsventile sehr unterschiedlich sein (vergleiche das Model auf der rechten Seite im Bild mit dem Enddrucksicherheitsventil auf Seite 4). Die obigen Beschreibungen werden dir helfen die Sicherheitsventile eines Kompressors zu finden.



Schmierung

Die Ölwanne (der Teil, in dem sich die Kurbelwelle dreht) ist teilweise mit Öl gefüllt. Dieses Öl muss an die beweglichen Teile des Kompressors verteilt werden, um die Reibung zu verringern und bei der Kühlung zu helfen. Es gibt verschiedene Wege dieses zu erreichen. Sehr kleine Kompressoren (T- Form) benutzen einen „Schleuderstift“ der an der Kurbelwelle montiert ist. Wir haben schon erklärt, dass diese Option eine hohe Drehzahl der Kurbelwelle erfordert und somit der Kompressor nur für kurze Zeit benutzt werden kann. Andere Optionen müssen sowohl eine geringere Drehzahl, als auch eine zuverlässige Verteilung des Öls zu den wichtigsten Teilen des Kompressors gewährleisten.



Die erste Stufe eines Kompressors wird geschmiert, indem die Umgebungsluft die in die erste Stufe strömt absichtlich mit Öl verunreinigt wird. Dies wird erreicht, indem teils mit Öldunst versetzte Luft aus der Ölwanne angesaugt wird. Eine Flüssigkeit, wie Öl kann nur von hohem zu niedrigem Druck wandern. Da der Druck in den Zylindern höher ist, als der Druck in der Ölwanne, kannst du nicht erwarten, dass das Öl zwischen dem Zylinder und dem Kolben hinauf wandert. Es muss von oben kommen oder unter Druck eingespritzt werden, der höher als der Druck im Zylinder ist, wenn sich der Kolben unten befindet.

Die Schmierung von oben ist am einfachsten, bringt aber Unannehmlichkeit mit sich. Um die Atemluftqualität zu garantieren, nachdem die Luft komprimiert wurde, muss eine vollständige Entfernung (Filterprozeduren werden wir später besprechen) der Ölrückstände gewährleistet sein. Zweitackter benutzen eine ähnliche Technik. Öl wird dem Benzin zugegeben und schmiert somit den Kolben von oben. Wir haben schon früher angesprochen, dass es einen gewissen Druckverlust aufgrund von Luftdurchlässigkeit am Kolbenring in die Ölwanne gibt. Das würde den Druck in der Ölwanne ansteigen lassen. Luft mit Öl würden aus der Wanne herausgedrückt werden und die Aussenseite des Kompressors mit Öl verschmieren. Der Einlass der Ölwanne leitet die mit Öl angereicherte Luft zur ersten Stufe. Die Schmierung und das Sauberhalten der Aussenseite des Kompressors gehen also Hand in Hand.

Wie schon gesagt, zwischen der ersten und zweiten Stufe gibt es keinen Abscheider. Ein Teil des Öldunstes wird ungehindert in die zweite Stufe gelangen und diese, genauso wie die erste Stufe, von oben schmieren. Der Abscheider nach der zweiten Stufe wird einiges Öl aus der Luft entfernen, die durch den Kompressor strömt. Die Ölsuren mischen sich mit dem Wasser im Abscheider, was die milchig-weiße Farbe beim Entleeren erklärt. Die weiße, trübe Farbe des ausgeschiedenen Wassers zeigt an, dass der Kompressor einwandfrei arbeitet. Sollte das Wasser braun sein, dann ist das ein Indikator, dass der Kompressor zu viel Öl braucht und sollte das Wasser klar sein, dass der Kompressor „trocken“ läuft (ohne Schmierung). Beachte, dass die Farbe des abgelassenen Wassers, wenn es steht, sich mit der Zeit verändert. Die Farbe sollte in dem Moment überprüft werden, wenn man die Abscheider entleert.

Die Abscheidung von Feuchtigkeit und Öldunst ist nur partiell. Abscheider sind nicht gedacht, um eine vollständig trockene und ölfreie Luft zu bewirken. Somit gelangt auch Öldunst in die dritte Stufe und für manche Modelle könnte es für die Schmierung ausreichen. In den meisten Fällen ist dies aber nicht der Fall und eine zusätzliche Schmierung der späteren Stufen ist notwendig. Manchmal wird die Bewegung des Kolbens genutzt, um Öl durch einen Schlauch der die Ölwanne mit dem Zylinder verbindet, zu transportieren. Das wäre dann keine Schmierung von oben (das Öl könnte nicht gegen den hohen Druck im Zylinder transportiert werden). Das Maximale, was erreicht werden könnte, ist dass das Öl im Zylinder

der hoch genug transportiert würde, damit es von den Kolbenringen aufgenommen werden kann. Der Hauptzweck einer solchen Schmierung ist also nicht die Verringerung der Reibung zwischen Zylinder und Kolben, sondern der beweglichen Teile unterhalb des Kolbens.



Einige Kompressoren benutzen eine Ölpumpe. Das Öl wird zur letzten Stufe des Kompressors gepumpt, wo es an den Öldruckregulator abgegeben wird. So ein Öldruckregulator ähnelt der ersten Stufe eines Lungenautomaten. Die Passage des Öls in den Zylinder wird von einem Kolben blockiert, der mittels einer starken Feder am Platz gehalten wird. Die Ölpumpe

pumpt immer weiter Öl zum Öldruckregulator, was wiederum den Druck ansteigen lässt. Wenn der Druck hoch genug ist, um die Feder im Öldruckregulator zusammen zu drücken, wird der Kolben nach oben bewegt und das Öl kann zwischen dem (Freiflug) Kolben und dem Zylinder eingespritzt werden. Wenn sich der Öldruck zwischen dem Maximum (Kolben in der oberen Position) und dem Minimum (Kolben in der unteren Position) Druck in der letzten Stufe befindet, wird das meiste Öl für eine effektive Schmierung der letzten Stufe des Kompressors am Platz bleiben. Der Öldruckregulator ist auf so einen Druck eingestellt.

Die Ölpumpe wird durch die Kurbelwelle aktiviert (angetrieben). Bei einem dreistufigen Kompressor könnte dies ein rundes Teil sein, das an einer Seite der Kurbelwelle hervorsteht. Die Ölpumpe ist mit einem kleinen Rädchen ausgestattet, das jedes Mal wenn die Kurbelwelle darüber rollt herunter gedrückt wird. Da die Ölpumpe unter dem Niveau des Öls angebracht ist, wird somit Öl zum Öldruckregulator gepumpt. Ein Einwegventil verhindert, dass das Öl wieder in die Ölwanne zurück fließt wenn die Feder in der Ölpumpe das kleine Rädchen wieder in ihre Ausgangstellung zurückdrückt und sie somit für den nächsten Pumpvorgang bereit ist.



**Einstellknopf vom
Öldruckregulator**

Die Konstruktion bei einem X-Kompressor erfordert, dass die Bewegung der Kurbelwelle indirekt benutzt wird. Die Ölpumpe muss sich vollständig unter Öl befinden. Manchmal überträgt eine Kette die rotierende Bewegung der Kurbelwelle auf eine andere Achse. Diese ist nur da, um die Ölpumpe zu aktivieren. Der Freiflugkolben bei Kompressoren mit einer Ölpumpe und einem eingebauten Öldruckregulator verfügen in den meisten Fällen nicht über Kolbenringe. Der Kolben ist Präzisionsarbeit und erlaubt einen minimalen Durchgang für das Hochdrucköl, damit es langsam auf und ab wandern kann.

Du solltest dich bei der Schmierung eines Kompressors immer an die wichtigste Konsequenz erinnern. Die Luft wird absichtlich verunreinigt, um eine Schmierung von oben zu ermöglichen. Da die Abscheider nur einen Teil der Feuchtigkeit und des Öls entfernen, muss die Luft gefiltert werden, bevor sie die Anforderungen für Atemluftqualität erfüllt. Des Weiteren bedeutet das, dass Kompressoren effektiv gekühlt werden müssen. In einigen Ländern bestehen Anforderungen, dass die Konstruktion eines Kompressors gewährleisten muss, dass die Luft in den Zylindern nicht wärmer als 160°C wird. Wenn die Luft (mit Öldunst) zu heiss werden würde, dann könnte diese Mischung sich selbst entzünden und würde somit Kohlenmonoxid und Kohlendioxid bilden. Das würde nicht nur ein Problem für die Anforder-

derungen der Atemluftqualität darstellen, sondern wäre auch für die Taucher riskant, da Kohlenmonoxid ein giftiges Gas ist.

Norm für die Luftqualität

Um die Anerkennung als Atemluftqualität zu erhalten, muss Luft strikte Normen erfüllen. Diese Anforderungen können von Land zu Land verschieden sein. Sie geben aber normalerweise einen Mindestgehalt an Sauerstoff und einen maximalen Gehalt an Öl (Kohlenwasserstoffe), Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Feuchtigkeit an. Die Anforderungen für den Wassergehalt erfahren alle Taucher. Als Folge bekommt man beim Tauchen einen trockenen Mund. Das Trocknen der Luft ist aber notwendig, um Korrosion in den Tauchflaschen zu vermeiden. Länder in denen meist Stahlflaschen verwendet werden, erfordern einen geringeren Feuchtigkeitsgehalt, als Länder in denen Aluminiumflaschen verwendet werden. Es gibt auch unterschiedliche Anforderungen bezüglich des Ölgehalts (Kohlenwasserstoffe) in der Luft. Zum Atmen wäre ein relativ hoher Ölgehalt vielleicht akzeptabel. Wenn die Luft allerdings mit reinem Sauerstoff gemischt wird, könnte der höhere Ölgehalt das Risiko einer Selbstentzündung darstellen (und damit auch der Entstehung von Kohlenmonoxid). Diese Überlegungen haben (in einigen Ländern) zu unterschiedlichen Anforderungen für Atemluft und sauerstoffkompatibler Luft geführt.

Normen	% O ₂	CO ₂ ml/m ³	CO ml/m ³	H ₂ O mg/m ³	Öl mg/m ³
DIN 3188	20.0 % - 21.0 %	800	30	25	0,3
EN 12021	21% - +/- 2%	500	15	25	0,5
CGA E-Grade	20.0 % - 22.0 %	500	10	67 Abhängig vom Gebrauch	5
Modified CGA E-Grade Tec 93	20.0 % - 22.0 %	500	2	67 Abhängig vom Gebrauch	0,1

Für europäische Kompressoren wurde früher die DIN (Deutsche Industrie Norm) 3188 als Referenz benutzt. In Handbüchern von älteren Kompressoren kannst du diese Norm noch finden, z.B. als Grundlage für die Frequenz der Filterwechsel. Andere europäische Länder hatten keine eigenen Normen und übernahmen die deutschen Anforderungen. Das änderte sich mit der Einführung der europäischen Norm für Luft – der EN 12021.

Führende europäische Hersteller erachten Luft sauerstoffkompatibel, wenn sie der Norm EN 12021 entspricht. Somit gibt es nur eine Norm, um sowohl Tauchflaschen mit Luft zu füllen, als auch für Nitrox Anlagen. In den USA ist die Situation anders. Die Norm für Atemluftqualität erlaubt einen relativ hohen Ölgehalt (10 Mal mehr als die europäische Norm). Das hat Bedenken bezüglich der Benutzung von Luft für das Füllen von Nitrox aufgeworfen. Diese Bedenken wurden 1993 während der Tec Konferenz besprochen. Die teilnehmenden Organisationen waren sich einig, dass die Norm für Luft modifiziert werden müsste, die in Nitrox Anlagen benutzt wird. Das Ergebnis dieser Einigung war ein „modifizierter E-grade“ (E-grade ist die CGA „Compressed Gas Association“ Ausdruck für Atemluftqualität).

Die Analyse der Luftqualität kann einigen Aufschluss über den technischen Zustand des Kompressors liefern. Ein geringerer Sauerstoffgehalt in Verbindung mit einem erhöhten Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidgehalt deutet auf eine Selbstentzündung im Kompressor hin – er „dieselt“ (obwohl der Sauerstoffverlust durch die Verbrennung zu gering sein kann, um entdeckt zu werden). Ein hoher Gehalt an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid kann auch bedeuten, dass der Ansaugstutzen sich zu nah an dem

Auslass eines Verbrennungsmotors befindet. Es könnte sogar der Motor sein, der für die Rotation des Kompressors benutzt wird.

Ein hoher Gehalt an Feuchtigkeit und Öl bedeutet, dass der Filter des Kompressors nicht richtig arbeitet. Das kann aufgrund des Filtermaterials sein, dass nicht rechtzeitig gewechselt wurde, aber auch andeuten, dass die Luft zu schnell durch den Filter strömt (bei zu geringem Druck) aufgrund eines Problems mit dem Druckhalteventil.

Filter



Das Filtern beginnt bereits vor dem Einlass der Luft in die erste Stufe des Kompressors. Angeschlossen an die erste Stufe findest du einen Luftfilter, ähnlich dem Luftfilter am Auto. Je grösser der Filter ist, desto mehr Luft kann durchströmen (und gefiltert werden). Meistens haben Kompressoren mit grossen Filtern eine hohe Füllgeschwindigkeit.

Oft wird die Luft vor dem Luftfilter bereits gefiltert. Ein Faltenschlauch wird an den Luftfilter angeschlossen, der Luft von einer „sauberen und/oder kühleren“ Umgebung zum Einlass des Kompressors leitet. In so einem Fall wird ein Vorfilter angebracht, um Fliegen, Moskitos, Blätter und andere Verunreinigungen abzufangen, damit diese nicht in

den Luftfilter gelangen.

Der Faltenschlauch, der Luft von einem anderen Ort zum Einlass des Kompressors befördert, sollte nicht zu lang sein. Sollte ein längerer Schlauch angeschlossen werden, ein anderer, als der mit dem Kompressor geliefert wurde, dann sollte er einen angemessen grossen Durchmesser haben, um den Luftwiderstand gering zu halten.

Die Anbringung von Vorfiltern, Faltenschläuchen und Luftfiltern benötigt einige Aufmerksamkeit des Benutzers. Sollte eines der Teile zu viel Luftwiderstand für die durchströmende Luft erzeugen, dann wird der Kompressor versuchen von anders woher Luft anzusaugen, wo der Widerstand geringer ist. Das könnte sehr gut durch die Ölwanne geschehen (und deswegen eine zu grosse Verunreinigung der Luft mit Öldunst). Wie wir vorher besprochen haben, wird absichtlich ein gewisser Teil Luft der Ölwanne entnommen. Zum Grossteil ist das die Luft, die an den Kolbenringen vorbei gesickert ist (z.B. 5 % – 10% des gesamten Luftvolumens).



Sollte ein beträchtlich grösserer Anteil an Luft aus der Ölwanne entnommen werden, dann wird das zu einer grösseren Menge Öl im Kompressor führen. Das wiederum erhöht das Risiko einer Selbstentzündung (und deswegen der Entstehung von Kohlenmonoxid) und die Filter werden wesentlich schneller gesättigt, als das normalerweise der Fall wäre (vor dem normalen Wechsel). Ein guter Anhaltspunkt für ein Problem mit dem Luftwiderstand des Einlasses ist die Farbe des Wassers, das durch die Abscheider austritt.

Auf dem Bild siehst du das Gehäuse eines Luftfilters. Die Luft strömt immer am gleichen Platz durch den Filter. Viele Kompressor Benutzer haben die Gewohnheit entwickelt denselben Filter viermal zu benutzen. Wenn ein neuer Filter eingesetzt wird, markieren sie auf welcher Seite der Lufteinlass ist und das Datum. Nach der Angabe im Handbuch des Kompressors drehen sie den Filter um 90°, damit die Luft

jetzt durch einen unbenutzten Teil des Filters strömen kann. Diese Prozedur wird solange durchgeführt, bis der Filter wieder seine Ausgangsposition erreicht hat und somit viermal benutzt wurde. Der Gebrauch des Einlassfilters auf diese Art verhindert eine Zunahme des Luftwiderstands. Die Reinigung des Vorfilters und die Kontrolle, dass der Faltenschlauch frei von Knicken und anderen Blockierungen ist, werden den Rest machen. Später werden wir Überlegungen bezüglich Nitrox Anlagen behandeln und die Position des Vorfilters. Es sind ähnliche Überlegungen anzustellen, um den Widerstand des Lufteinlasses am Kompressor zu verhindern.



Zwischen den Stufen und sofort nach der letzten Stufe des Kompressors wird die Luft auf mechanische Weise mittels Einsatz der Abscheider verbessert (wie schon besprochen). Nach dem letzten Abscheider verbessern chemische Filter die Luftqualität so weit, dass die Normen für Atemluft erfüllt werden. Wenn der Kompressor in Übereinstimmung mit der Gebrauchsanweisung benutzt wird, dann garantiert der Hersteller die Luftqualität. Die Abstände der Filterwechsel sind so festgelegt, dass der Hersteller sicher sein kann, dass eine ausreichende Filterung der Luft gewährleistet ist. Um nachzuweisen, dass die Empfehlungen des Herstellers eingehalten wurden, führen Kompressor Benutzer ein Logbuch. In diesem werden Instandhaltungen, wie z.B. Filterwechsel aufgezeichnet. Das ist auch der Grund, warum Kompressoren mit einem elektronischen Zähler ausgestattet sind, damit man die Betriebsstunden des Kompressors weiss.

Es werden drei Substanzen in einem Filter verwendet: Molekularsieb, Aktivkohle und Hopcalite. Das Molekularsieb bindet nur die Feuchtigkeit. Die kleinen Kügelchen haben eine Struktur in der sich die Wassermoleküle binden. Die Luft wird hauptsächlich aus dem Grund getrocknet, um die Tauchflaschen vor Korrosion zu schützen, aber auch um sicherzustellen, dass die Aktivkohle richtig arbeitet. Aktivkohle entfernt die Kohlenwasserstoffe. Das beinhaltet sowohl Öl, als auch andere brennbare Materialien, aber auch aromatische Kohlenwasserstoffe, die eine ringförmige Struktur aufweisen. Der Name „aromatische Kohlenwasserstoffe“ kommt aus der Vielfalt an Gerüchen die diese produzieren können. Die Aktivkohle entfernt also nicht nur Öl, sondern neutralisiert auch Gerüche. Das Hopcalite funktioniert als Katalysator und macht ein zusätzliches „O“ (Sauerstoffatom) frei, womit Kohlenmonoxid (CO) sich binden kann und somit wird aus CO das CO₂ (Kohlendioxid). Obwohl hohe Konzentrationen an Kohlendioxid ein Problem darstellen, ist es nicht so giftig wie Kohlenmonoxid. Hopcalite wird nicht systematisch in jeden Filter eingefügt. Die Benutzung von Hopcalite ist nicht weit verbreitet. Aktivkohle und Molekularsieb werden allerdings in fast allen Kompressoren verwendet.



Das Filtergehäuse muss dem Enddruck des Kompressors standhalten können (200 oder 300 bar) und kann deswegen mit einer Tauchflasche verglichen werden. Das Filtermaterial wird in eine Kartusche gefüllt und dann in ein Filtergehäuse platziert. Einmalfilter werden aus Plastik oder Aluminium hergestellt. Filterkartuschen die vom Benutzer selber gefüllt werden, sind meistens aus Stahl. Jeder Hersteller hat seine eigenen Philosophie, was die Filterkartuschen betrifft. Einige erfordern die Benutzung von bereits vorgefertigten Kartuschen und andere empfehlen dem Benutzer die Filter selber mit Filtermaterial zu füllen.

Es gibt verschiedene Arten, um die Kartusche in das Filtergehäuse einzusetzen. Eine Methode stellt eine zusätzliche Sicherheit dar weil keine Flaschen gefüllt werden können, wenn keine Filterkartusche montiert ist. Um dieses zu gewährleisten, befinden sich am Ende des Filters zwei O-Ringe (in der Zeichnung



rot) die den Weg zur normalen Luftpassage sicherstellen. Wenn der Filter eingesetzt ist, dann verhindert ein O-Ring oben und unten, dass die Luft durch den Sicherheitsablass entweichen kann. Sollte aber kein Filter montiert sein, dann nimmt die Luft den Weg des geringsten Widerstands und alle komprimierte Luft wird entweichen.

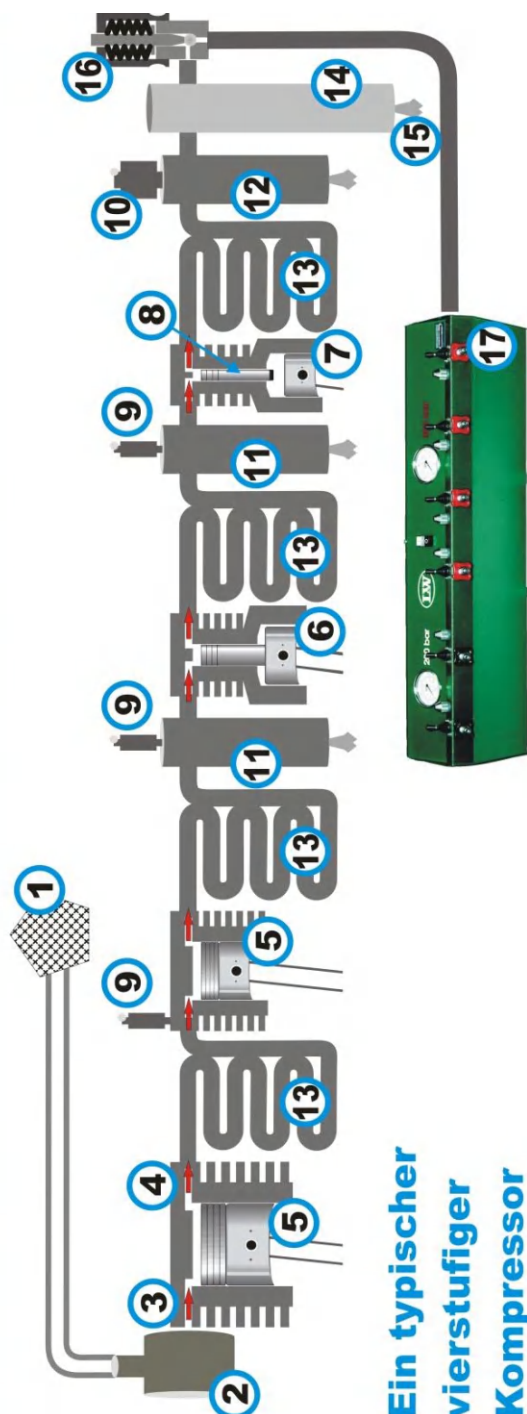
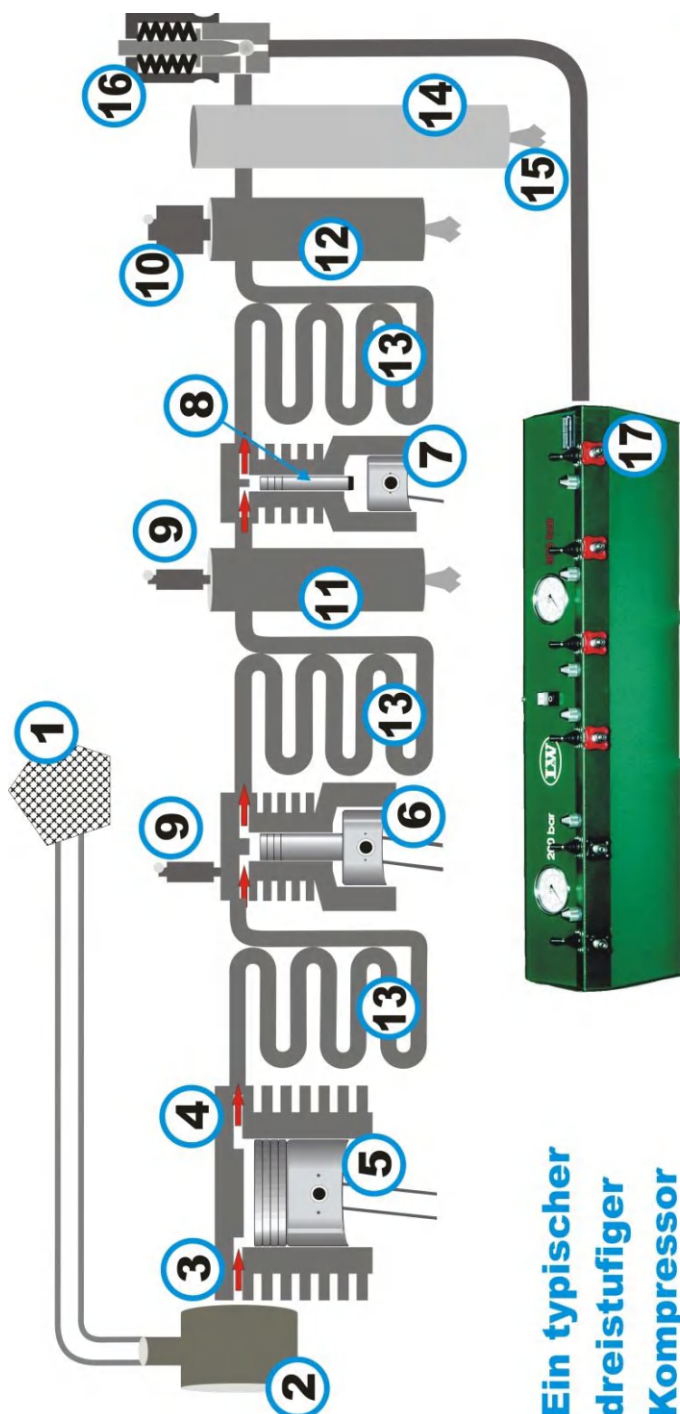
Viele andere Filter haben Gewinde, mit welchen sie in den Deckel des Filtergehäuses eingeschraubt werden. Somit kann der gebrauchte Filter einfach entfernt werden. Das ist bei Kartuschen die mit O-Ringen am Boden des Gehäuses abgedichtet sind, nicht immer der Fall. Der Typ von Kartuschen die im Deckel eingeschraubt sind haben keinen Sicherheitsablass. Unabhängig des Typs, muss das Filtergehäuse entlüftet werden, bevor es geöffnet und eine neue Kartusche eingesetzt werden kann. Aufgrund seiner Platzierung zwischen dem Kompressor und dem Druckhalteventil steht der Filter immer unter Druck. Um den Filter zu entlüften und die Entlüftung zu überprüfen hat der Filter ein eigenes Entlüftungsventil und Manometer.

Auf jeden Fall haben Filterkartuschen Filzscheiben zwischen den verschiedenen Filtermaterialien und auch an anderen Stellen. Ein Grund für den Einsatz der Filzscheiben ist zu verhindern, dass Filtermaterial durch die Lochbleche verloren geht und ein weiterer, dass sich die verschiedenen Filtermaterialien nicht vermischen. Der Hauptgrund ist aber eine Kanalbildung zu vermeiden. Kanalbildung bedeutet, dass die durch den Filter strömende Luft eine Rinne mit dem geringsten Widerstand formt. Die gesamte nachströmende Luft nimmt denselben Weg und nur ein Teil des Filtermaterials kommt in Kontakt mit der Luft, um sie zu reinigen. Da die Berechnung der Arbeitszeit eines Filters sich auf das gesamte Filtermaterial begründet, würde eine Kanalbildung nach den Normen für Atemluftqualität zu einer reduzierten Luftqualität führen.



Die Teile im Zusammenhang

Mit der Besprechung der Filter, haben wir alle „Standardteile“ eines Kompressors behandelt. Später werden wir noch einige (optionale) Zusätze besprechen, aber jetzt ist es an der Zeit alle individuellen Teile in Beziehung zu bringen. Alle Teile sind in der Reihenfolge, in welcher sie in einem Kompressor gefunden werden, in den folgenden Abbildungen zu sehen.



Die Kompressorteile auf der vorhergehenden Seite		
Nummer	Name	Funktion
1	Vorfilter	Ein Vorfilter wird benutzt, wenn ein Faltenschlauch weiter weg vom Kompressor Luft ansaugt. Es ist nur gedacht, um Blätter, Moskitos und anderes abzuhalten, damit dies nicht in den Luftfilter des Kompressors gelangt.
2	Luftfilter	Der Luftfilter verhindert, dass Staub und andere Partikel in die erste Stufe des Kompressors gelangen. Der Filter erfordert einige Aufmerksamkeit. Wenn der Filter verstopft sein sollte, dann kann der Kompressor nicht mehr richtig funktionieren.
3	Einlassventil	Alle Zylinder haben ein Einlassventil. Um die Luft einströmen zu lassen, muss das Ventil offen sein wenn sich der Kolben nach unten bewegt. Das Einlassventil muss sich wieder schliessen, wenn sich der Kolben nach oben bewegt.
4	Auslassventil	Das Auslassventil (an allen Zylindern) muss geöffnet sein während sich der Kolben nach oben bewegt, damit die Luft zur nächsten Stufe strömen kann. Das Auslassventil muss sich schliessen, wenn sich der Kolben nach unten bewegt, um zu verhindern, dass die Luft in den vorherigen Zylinder zurückströmt.
5	Normaler Kolben	Derselbe Kolbentyp wie in Verbrennungsmotoren.
6	Stufenkolben	Ein Kolben mit unterschiedlichem Durchmesser, um genügend Raum für die schwingende Bewegung des Pleuels wegen dem kleinen Durchmesser des Zylinders zu bieten.
7	Treiberkolben	Der Kolben, der den Freiflugkolben nach oben drückt. Die abwärts Bewegung erzeugt den Druck in der letzten Stufe und ist abhängig von der richtigen Funktion des Druckhalteventils.
8	Freiflugkolben	Der Freiflugkolben verursacht das typische Geräusch des Kompressors beim Starten.
9	Mitteldrucksicherheitsventil	Jede Stufe im Kompressor hat ihr eigenes Sicherheitsventil. Jedes Ventil hat seinen "spezifischen Platz" und ist dem Druck angepasst, auf welchem der Zylinder arbeitet.
10	Enddrucksicherheitsventil	Das Enddrucksicherheitsventil entscheidet, ob ein Kompressor 200 oder 300 bar Flaschen füllen kann. Sein Platz kann variieren, aber meistens ist es auf dem Endabscheider angebracht.
11	Zwischenabscheider	Zwischen der ersten und zweiten Stufe gibt es meistens keinen Abscheider. Nach jeder weiteren Stufe wird ein Abscheider benötigt, um die Kondensation von Wasser in den Zylindern zu verhindern.
12	Endabscheider	Der Abscheider nach der letzten Stufe ist nicht gedacht, um die Kondensation zu verhindern, sondern die Arbeit des chemischen Filters zu erleichtern, indem er bereits Feuchtigkeit und Öldunst aus der Luft entfernt.
13	Kühlspiralen	Nach jedem Kompressionsschritt muss die Luft gekühlt werden. Abscheider können nur bis 100° C richtig arbeiten, das ist auch der Grund, warum sich die Kühlspiralen vor dem Abscheider befinden.
14	Chemischer Filter	Es gibt Normen für reine Luft. Abscheider entfernen aber nur einen Teil der Feuchtigkeit und des Öldunstes. Der chemische Filter ist ein notwendiger Zusatz für Kompressoren die Tauchflaschen füllen.
15	Entlüftung des chemischen Filters	Der chemische Filter ist „gefangen“ zwischen dem Auslassventil der letzten Stufe und dem Druckhalteventil. Nach dem Füllen kann der verbleibende Druck im Filter nicht entweichen. Um den Filter wechseln zu können, muss er vorher entlüftet werden und deswegen hat er eine eigene Entlüftung.
16	Druckhalteventil	Das Ventil, das die Luft solange zurückhält, bis genügend Druck aufgebaut wurde damit der Freiflugkolben richtig funktionieren kann und um zu gewährleisten, dass die Luft langsam genug durch den Filter strömt.
17	Füllkonsole	Noch nicht behandelt.

Zubehör & Auswahl

Dieses Kapitel ist die logische Weiterführung der erworbenen Kenntnisse über den Kompressorblock. Hauptsächlich handelt es sich um Teile wie Speicher, Füllkonsolen und andere die überhaupt noch nicht angesprochen wurden. Zum Teil werden aber auch Zusätze erklärt (wie z.B. automatisch Filterüberwachung), die oft eingesetzt werden, aber nicht zur „Standardausstattung“ eines Kompressors gehören.

Das Kapitel wird mit den Prozeduren für das Füllen von Tauchflaschen und den Überlegungen den richtigen Kompressor für ein Geschäft oder den persönlichen Bedarf zu wählen, abgeschlossen.



Elektronische Filterüberwachung



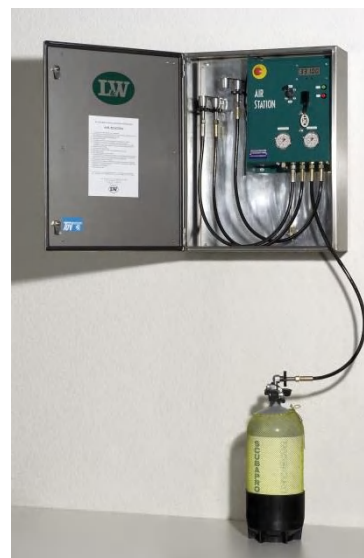
Die Aktivkohle und das Molekularsieb in einem Filter müssen in vorgegebenen Intervallen gewechselt werden. Die Einsatzdauer eines Filters kann durch die Betriebsstunden des Kompressors oder anhand der gefüllten Flaschen definiert sein. Der Kompressor kann unter verschiedenen Bedingungen laufen. Damit die Luft aus dem Kompressor die Normen für Atemluftqualität erfüllt, müssen Intervallen die sich „auf dem schlimmsten Fall“ beziehen, eingehalten werden.

Elektronische Filterkontrolle erlaubt die realen Umstände zu berücksichtigen, unter denen ein Kompressor läuft. In vielen Fällen, bedeutet das, dass der Filter länger benutzt werden kann, da die Bedingungen „günstig“ sind. Die Investition einer elektronischen Filterüberwachung macht sich relativ schnell bezahlt. Des Weiteren liefert sie eine Absicherung für eine gute

Luftqualität, weil das Gegenteil auch zutrifft. Sollte der Kompressor unter sehr ungünstigen Bedingungen drehen, dann wird die elektronische Filterüberwachung schneller als gewöhnlich angeben, das Filtermaterial zu wechseln.

In einigen Fällen kann die elektronische Filterkontrolle an den Motor des Kompressors angeschlossen werden. Wenn ein Filterwechsel gemacht werden muss, dann kann das System einen Start des Motors verhindern. Das ist besonders dann von Vorteil, wenn an einem anderen Ort gefüllt wird, als der Kompressor steht und/oder wenn viele verschiedene Personen den Kompressor betätigen. Aufgrund der Lärmbelästigung durch den Kompressor wählen manche Besitzer einen weiter entfernten Standort, wo keine Kunden bedient werden. Eine Entfernung von 30 Metern zwischen dem Kompressor und der Füllkonsole ist keine Seltenheit. Elektronische Funktionen die den Kompressor abschalten, wenn er nicht richtig arbeitet, können bei solchen Konfigurationen helfen Probleme zu vermeiden.

Ein typischer Fall, wo eine grössere Entfernung zwischen dem Kompressor und der Füllkonsole gefunden wird, sind Aussenfüllstationen. In einigen Ländern sind diese sehr beliebt. Es ermöglicht den Tauchern ihre Flaschen zu füllen, wann immer sie möchten. Es gibt Systeme, bei welchen der Taucher einen Schlüssel zu dem Kasten hat und andere wiederum haben ein System mit Münzen oder Kredit Karte. Diese Möglichkeiten wirst du nicht in allen Ländern finden. In einigen Ländern müssen Kompressor-Benutzer eine spezielle Ausbildung haben, welche bei Aussenfüllstationen nicht überprüft werden kann.



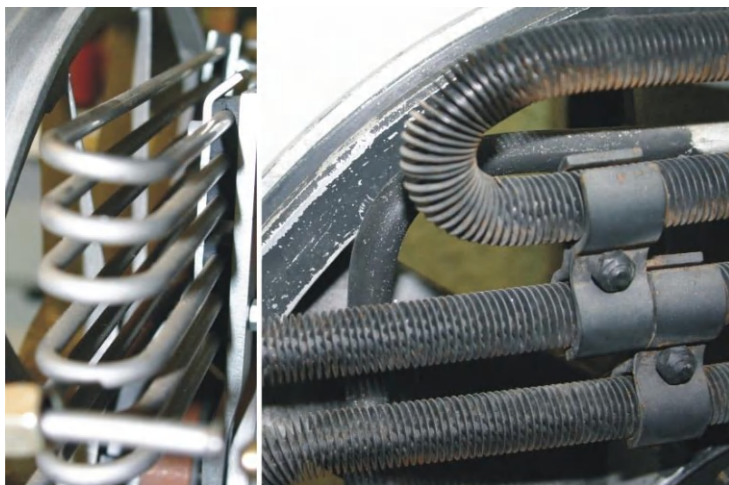
Kompressor Kühlung

Damit die Zwischenkühler und die Abscheider richtig funktionieren können, darf der Kompressor nicht zu heiss werden. Es ist eine gängige Norm, dass die Luft im Kompressor unter 160°C bleibt, damit Probleme mit Öldunst in den Zylindern vermieden werden. Um das zu erreichen ist eine relativ niedrige Umgebungstemperatur notwendig und das führt zu einer modellspezifischen „maximalen Betriebstem-

peratur“. Oberhalb dieser Aussentemperatur ist der Hersteller nicht sicher, ob die Temperatur im Inneren des Kompressors im Normbereich bleibt.

Die Umgebungstemperatur ist nicht der einzige Faktor. Der Kompressor muss an einem Ort stehen, wo ausreichend kühle Luft zugeführt wird – oder noch besser – ein ausreichender Abtransport der vom Kompressor erwärmten Luft gewährleistet ist. Der Raum, in welchem der Kompressor dreht, muss ausreichend gross sein und er sollte nicht zu nah an der Wand stehen. Da warme Luft nach oben steigt und kalte Luft unten bleibt, wäre es am besten, kalte Luft nahe vom Boden anzusaugen.

Die Luft die sich während dem Kühlprozesses des Kompressors erwärmt kann dann nach oben entweichen. Jegliche Vermischung von kühlerer Luft zum Kompressor und wärmerer Luft die entweichen soll, sollte vermieden werden. In manchen Kompressorräumen findet man ein Loch in der Wand, wo kühlerer Luft von aussen kommt, während ein Ventilationssystem sicherstellt, dass die erwärmte Luft nach oben entweichen kann und sich die beiden Luftströme nicht mischen. Tauchcenter in kälteren Gebieten leiten oft die erwärmte Luft des Kompressors in den Ausrüstungsraum und trocknen damit die Leihausrüstung.



Manchmal ist die letzte Kühlspirale des Kompressors mit Lamellen ausgestattet. Somit wird die Oberfläche der Kühlspiralen die in Kontakt mit der kalten Luft kommt vergrössert und ist die Kühlung effizienter. Die Länge der Kühlspirale kann somit um das zwei oder dreifache verringert werden, und trotzdem ist die richtige Kühlung gewährleistet.

Die Lammellenkühlspiralen benötigen einige Beachtung. Die Lamellen vergrössern die Oberfläche die in Kontakt mit der Luft ist. Sollten diese durch Staub, Dreck oder Öl bedeckt sein, dann pas-

siert genau das Gegenteil. Belegte Lamellen isolieren die Kühlspirale anstatt die Kühlung effizienter zu machen. Wenn ein Kompressor mit dieser Art von Kühllamellen ausgestattet ist, dann müssen die Lamellen immer wieder abgebürstet werden. Eine alte Zahnbürste eignet sich hierfür.

Der Motor



Ein Kompressor benötigt eine externe Quelle der Rotation. Das kann ein Motor sein, der bereits dreht und an welchen der Kompressor angeschlossen wird, wie z.B. das Aggregat auf einem Boot. Aber in den meisten Fällen hat ein Kompressor einen eigenen Motor. Das ist entweder ein Elektromotor oder ein Verbrennungsmotor. Die Wahl des Motors hängt von Überlegungen wie Anfälligkeit für Feuchtigkeit, das Vorhandensein einer zuverlässigen Stromquelle, Verringerung der Lärmbelästigung und Mobilität ab.

Sollte keine Einschränkung vorhanden sein, dann ist ein Elektromotor die beste Wahl. Diese Motoren machen weniger Lärm als Verbrennungsmotoren, benötigen weniger Instandhaltung und produzieren auch keine giftigen Abgase (Kohlenmonoxid) die in den Einlass des Kompressors gelangen könnten. Es gibt einige Einschränkungen, die

die Nachteile eines Verbrennungsmotors aufwiegen könnten. Die meisten Kompressoren (mit Ausnahme der kleineren Modelle) benötigen Starkstrom. Das macht es sehr schwierig den Kompressor an verschiedenen Orten zu betreiben, da 380 Volt nicht immer verfügbar sind. Ein Verbrennungsmotor ist überall und jederzeit einsetzbar.



Die Zuverlässigkeit des Stromnetzes ist eine andere Überlegung. Wenn Stromausfälle regelmässig vorkommen, dann kann ein Elektromotor nicht eingesetzt werden. Das Generieren deines eigenen Stroms (mit einem Aggregat) und dann den Kompressor mit diesem erzeugten Strom zu betreiben, ist keine ökonomische Lösung. Ein Aggregat hat einen grossen Energieverlust bei der Umwandlung von Energie in Elektrizität durch einen Verbrennungsmotor. Das ist auch bei Kraftwerken der Fall, aber nicht zu demselben Ausmass. Wenn Benzin benutzt wird, dann sollte der Kompressor vom Verbrennungsmotor direkt angetrieben werden.

Ein weiterer Nachteil von Elektromotoren ist ihre Anfälligkeit für Feuchtigkeit und Wasser. Für Kompressoren die auf Booten oder an Plätzen installiert sind, die häufig mit Wasser in Kontakt oder sogar überschwemmt sind, kann dies eine weitere Überlegung sein. Verbrennungsmotoren sind unempfindlich für Wasser. Solange sich der Lufteinlass- und der Auspuff über dem Wasser befinden, kann ein Verbrennungsmotor arbeiten. Allerdings hast du eine grosse Lärmbelästigung, mehr Instandhaltung und musst auch die Windrichtung beachten, dass keine Abgase in den Einlass des Kompressors gelangen.

Starkstrommotoren haben einen Nachteil. Wenn eine Maschine kalt gestartet wird, benötigt sie sechs bis zwölf Mal so viel Strom als wenn sie schon dreht. Damit würden die Sicherungen durchbrennen die das elektrische System des Kompressors absichern. Um einen „sanften“ Start zu gewährleisten, wird eine Stern Dreieck-Schaltung benutzt. Die Schaltung benutzt am Anfang nur zwei Phasen. Wenn der Motor dann anfängt zu laufen, stellt sich diese Schaltung ab und simultan wird eine andere Versorgung (die jetzt alle drei Phasen versorgt) aktiviert. Dieser Prozess (der nur ein paar Sekunden dauert) benötigt viele Leitungen, um Magnetschalter ein- und wieder auszuschalten und noch anderes. Da der elektrische Kasten am Kompressorrahmen angebracht ist, vibriert er ständig. Viele Kompressorbenutzer haben es sich angewöhnt, denn Kasten in regelmässigen Abständen (alle paar Monate) zu öffnen (ohne Stromversorgung) und die Kabel und Verbindungen mit einem Schraubenzieher zu überprüfen. Die Absicht ist es eher Fehlkontakte zu vermeiden, als nach dem einen Kabel zu suchen, das ein Problem beim Starten des Kompressors verursacht.

Bei den meisten Kompressoren wird die Rotation der Maschine zur Kurbelwelle vom Keilriemen übertragen. Eine Keilriemenscheibe am Motor bewegt den Keilriemen. Diese Bewegung wird mittels einer (grösseren) Keilriemenscheibe an den Kompressor übertragen. Derselbe Keilriemen bewegt auch den Ventilator. Die Geschwindigkeit, in welcher der Motor dreht, muss mit der erforderlichen Rotationsgeschwindigkeit des Kompressors in Gleichklang gebracht werden. Dieses wird mit den richtigen Durchmessern der Keilriemenscheiben erreicht. Der Keilriemen muss unter Spannung stehen und dieses muss immer wieder vom Benutzer überprüft werden. Bei Kompressoren, bei denen der Motor neben dem Kompressor steht, kann die Spannung angepasst werden, indem man den Motor ein wenig verschiebt (er steht auf Schienen). Bei Systemen, in welchem sich der Motor unterhalb des Kompressors befindet, wird normalerweise das Gewicht des Elektromotors benutzt, um die Spannung des Keilriemens zu gewährleisten. Sollte die Spannung nicht ausreichend sein, dann wird der Keilriemen von den Keilriemenscheiben rutschen und erzeugt somit keine Rotation mehr und macht ein hohes, quietschendes Geräusch.



Oft gibt es von einem Kompressormodell verschiedene Versionen, jedes mit einer anderen Füllkapazität. In vielen Fällen ist es nur eine Anpassung der Geschwindigkeit, bei welcher der Kompressor dreht. Als Faustregel könntest du sagen, dass Kompressoren die auf einer langsameren Drehzahl laufen weniger Flaschen pro Stunde füllen können, dafür aber eine längere Lebensdauer haben. Die meisten Tauchcenter entscheiden sich für den Kompressor mit der niedrigsten Drehzahl (RPM – Rotation per minute), wenn verschiedene Versionen eines Modells angeboten werden. Normalerweise wird der Kompressor vom Benutzer gestartet und auch wieder ausgeschaltet, aber ein Elektromotor kann auch durch einen Druckschalter aktiviert werden. Dies wird bei vielen Kompressoren nur gemacht, um den Kompressor

beim Erreichen des Enddrucks auszuschalten. Erinnere dich daran, dass das Enddrucksicherheitsventil ein mechanischer Teil ist der bei zu hohem Druck Luft aus dem System ablässt, der aber dem Motor nicht „sagt“ er soll zu drehen aufhören. Sollte ein Kompressor in Kombination mit Speicherflaschen benutzt werden, kann ein Druckschalter sehr hilfreich sein, da er den Motor startet, wenn der Druck in den Speicherflaschen zu niedrig wird. Im Besonderen, wenn die Speicherflaschen mit Nachtstrom (billiger Tarif) gefüllt werden.

Speicherbank und Kaskadensysteme

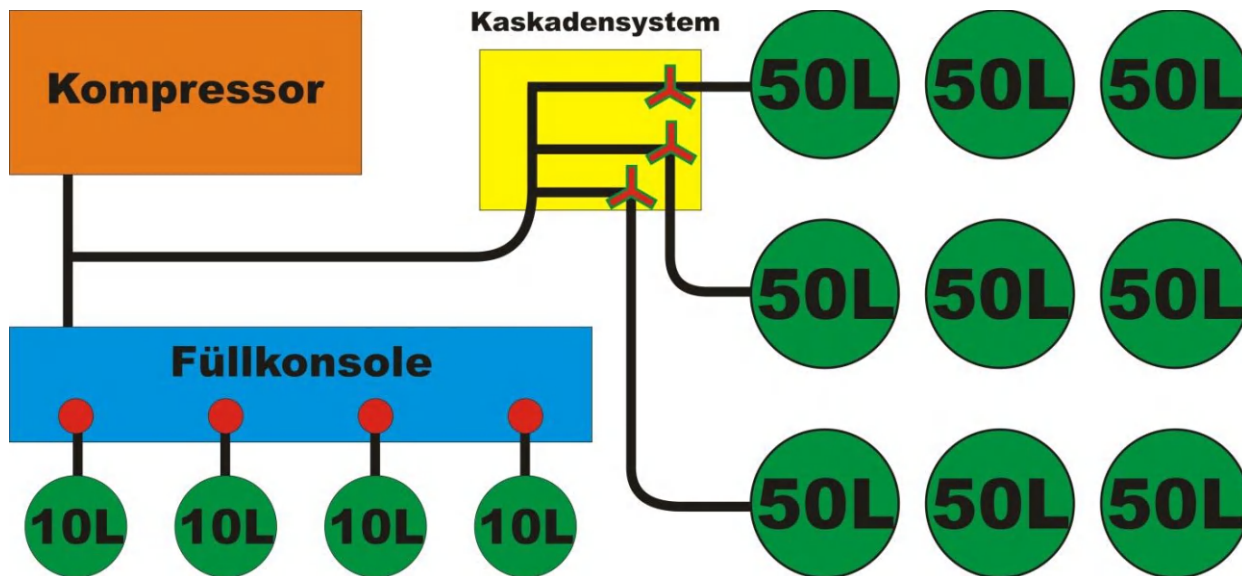


Beim Tauchen sind wir oft kurzfristig mit einer grossen Nachfrage an Füllungen konfrontiert. Eine Gruppe von Tauchern, die mit demselben Boot ausfahren, kommt zur gleichen Zeit mit leeren Flaschen zurück. Oft müssen die Flaschen rechtzeitig für die nächste Ausfahrt wieder gefüllt sein. Wenn das Füllen der Tauchflaschen von der Füllgeschwindigkeit des Kompressors abhängig ist, dann muss das Tauchcenter über eine grosse Anlage verfügen. Es wäre wirtschaftlicher die Grösse eines Kompressors anhand des täglichen Bedarfs an Füllungen zu berechnen. Was das bedeutet, entweder genügend Flaschen für zwei oder drei Umwälzungen zu haben, oder die Möglichkeit die Luft zu speichern, um eine grosse Nachfrage an Füllungen abdecken zu können.

Eine Speicherbank besteht aus einer oder mehreren grossen Flasche(n). Die durchschnittliche Grösse einer Flasche beträgt 40 oder 50 Liter und sie sind auf einen Druck von 200 oder 300 bar ausgelegt. Wenn eine Speicherbank mit 300 bar eingesetzt wird, um 200 bar Flaschen zu füllen, dann muss die Speicherbank mit einem Druckminderer und einem Sicherheitsventil ausgestattet sein, um einen zu hohen Fülldruck zu verhindern.



Speicherbänke werden nicht nur bei einem hohen Aufkommen an Füllungen eingesetzt, sondern erlauben auch einen durchgehenden Service, wenn der Kompressor zur Instandhaltung ausgeschaltet ist. Die Speicherflaschen können mit günstigem Nachtstrom gefüllt werden.



Es muss entschieden werden, wie die Speicherbank an das System angeschlossen wird. Alle Flaschen der Speicherbank können zu einem einzigen Hochdruckvolumen (9 Flaschen mit jeweils 50 Liter ergeben ein Gesamtvolumen von 450 Liter) verbunden werden. Sie können auch zu kleineren Flaschengruppen zusammengeschlossen werden. Die letzte Option wird Kaskadensystem genannt. Die oben genannten 9 Flaschen würden in 3 Gruppen zu jeweils 3 Flaschen zusammengeschlossen werden (drei Gruppen von jeweils 150 Litern).

In den meisten Fällen werden die Speicherbänke und Kaskaden an die Hauptleitung angeschlossen, die vom Kompressor zur Füllkonsole führt. Die Druckleitung von und zu den grossen Flaschen kann mit einem Ventil geschlossen werden. Wenn das Ventil offen ist, dann kann Luft in und auch aus den Speicherbänken strömen.



Kaskadensystem

Dieselbe Leitung wird benutzt, um die Speicherbank zu füllen und um Luft von der Speicherbank zur Füllkonsole strömen zu lassen. Sollte kein Einwegventil (behandeln wir später) an das System angebracht sein und die drei Ventile, die zur Speicherbank führen geöffnet sein, werden alle Flaschen (9 Mal 50 und 4 Mal 10 Liter = 490 Liter) zu einem einzigen Volumen und gleicht sich der Druck in allen Flaschen aus.

Die Idee einer Speicherbank (und Kaskade) ist zwei Druckbehälter mit unterschiedlichem Druck zu verbinden, damit der Druck sich ausgleicht. Um den Druck nach dem Verbinden der beiden Druckbehälter berechnen zu können, muss die Menge an verfügbarer Luft durch das Gesamtvolumen dividiert werden. Die Luftmenge wird in barliter angegeben. Die Multiplikation des Drucks und Volumens des einzelnen (isolierten) Druckbehälters. Den Enddruck berechnet man indem die Luftmenge (barliter) durch das entstandene Volumen (Liter) dividiert, nachdem man das Ventil zwischen den Behältern geöffnet hat. Zum Beispiel: An eine 50 Liter Speicherbank auf 200 bar wird eine 10 Liter Tauchflasche auf 50 bar angeschlossen. Die Luftmenge ist dann $(200 \text{ bar} \times 50 \text{ l}) + (50 \text{ bar} \times 10 \text{ l}) = 10.000$

barliter + 500 barliter = 10.500 barliter. Das kombinierte Volumen der Behälter ist 50 Liter + 10 Liter = 60 Liter. 10.500 barliter dividiert durch 60 Liter ergibt 175 bar. Nach der Angleichung, hat sowohl die Tauchflasche, als auch die Speicherbank den gleichen Druck. In diesem Fall 175 bar. Die relativ kleine Speicherbank hat einen ziemlich grossen Druckabfall nachdem nur eine Flasche gefüllt wurde. Das ist auch der Grund, warum die meisten Tauchcenter ein Kaskadensystem bevorzugen.

In den folgenden Berechnungen wird der Unterschied zwischen einer Speicherbank (eine Pufferkapazität zusammengefasst in einem grossen Volumen) und einem Kaskadensystem (die Pufferkapazität aufgeteilt in kleinere Volumen) gezeigt. Die Anlage ist nur ein Rechenbeispiel. Vor dem Füllen einer Reihe von Tauchflaschen sind alle Speicherflaschen auf 200 bar gefüllt. Die Tauchflaschen sind 10 Liter Flaschen, alle mit einem Restdruck von 20 bar. Wie in der Illustration gezeigt, werden 4 Tauchflaschen gleichzeitig gefüllt.

Das Füllen mit einer Speicherbank auf 200 bar, bestehend aus 9 Flaschen mit jeweils 50 Liter, verbunden in einem Gesamtvolumen von 450 Litern. Alle Tauchflaschen sind 10 Liter Flaschen mit einem Restdruck von 20 bar.				
Serie von 4 Flaschen	Anfangsdruck Flaschen	Anfangsdruck Speicherbank	Berechnung Beachte: Die 40 Liter entsprechen 4 Flaschen von 10 Liter wie in der Darstellung.	Enddruck Speicherbank & Flaschen
1 ^{te}	20 bar	200 bar	$((450 \text{ Liter} \times 200 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 490 \text{ Liter} =$	185.3 bar
2 ^{te}	20 bar	185.3 bar	$((450 \text{ Liter} \times 185.3 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 490 \text{ Liter} =$	171.8 bar
3 ^{te}	20 bar	171.8 bar	$((450 \text{ Liter} \times 171.8 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 490 \text{ Liter} =$	159.4 bar
4 ^{te}	20 bar	159.4 bar	$((450 \text{ Liter} \times 159.4 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 490 \text{ Liter} =$	148.0 bar
5 ^{te}	20 bar	148.0 bar	$((450 \text{ Liter} \times 148.0 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 490 \text{ Liter} =$	137.5 bar

Das Beispiel zeigt, dass der Druck in der Speicherbank relativ schnell abfällt, wenn 4 Flaschen auf einmal gefüllt werden. Mit der vierten Serie wird nicht einmal ein Druck von 150 bar erreicht. In der Praxis bedeutet das, dass der Kompressor den fehlenden Druck ergänzen muss (top-off). Die dafür benötigte Zeit kann aus der fehlenden Luftmenge errechnet werden (in diesem Fall wäre es die vierte Serie – 200 bar Minus 148 bar = 52 bar, welche mit dem Volumen von 40 Liter multipliziert wird, um 2.080 barliter zu finden). Ein Kompressor mit einer Leistung von 250 Litern pro Minute würde dann etwa 8 Minuten benötigen, um den fehlenden Druck der vierten Serie zu ergänzen. Eine grössere Speicherbank würde weniger schnell an Druck verlieren, aber es gibt noch einen anderen Weg die gespeicherte Luft „wirtschaftlich“ zu nutzen. Mit einem Kaskadensystem. Die Idee eines Kaskadensystems liegt in der Benutzung der Ventile (rot und grün) in der Zeichnung. In einer Kaskade wird immer nur eine Puffergruppe geöffnet. Die Reihenfolge wird bei dem gesamten Füllvorgang eingehalten. In der Illustration sehen wir drei Füllschritte (oder vier, wenn du die Ergänzung durch den Kompressor nach den Kaskadenschritten zählst). Es gibt keine festgelegte Anzahl von Kaskadengruppen. Du kannst auch ein Kaskadensystem mit vier oder fünf Puffergruppen haben.

Eine Kaskade funktioniert folgendermassen: Nach dem Anschliessen der Tauchflaschen (in diesem Fall vier 10 Liter Flaschen mit einem Restdruck von 20 bar), wird die erste Kaskadengruppe geöffnet und die Tauchflaschen gleichen sich mit dem Druck der ersten Gruppe aus. Dann wird das Ventil der ersten Gruppe geschlossen und das Ventil der zweiten Gruppe geöffnet. Die zweite Gruppe gleicht sich mit den Tauchflaschen aus, die bereits einiges der benötigten Luft aus der ersten Gruppe erhielten. Dieselbe Prozedur wird fortgesetzt. Das Ventil der zweiten Gruppe wird geschlossen und die dritte Gruppe (in diesem Fall die letzte Gruppe) wird geöffnet. Nachdem der Ausgleich mit dieser Gruppe abgeschlossen ist, wird die letzte Gruppe geschlossen und der Rest zum Erreichen des Enddrucks wird vom Kompressor geliefert.

Das Füllen mit einer Kaskade auf 200 bar, bestehend aus 9 Flaschen zu jeweils 50 Liter, zusammengeschlossen in drei Gruppen mit einem Volumen von 150 Liter je Gruppe. Die 10 Liter Tauchflaschen haben einen Restdruck von 20 bar.

Füllschritt	Anfangsdruck Flaschen	Anfangsdruck Speicherbank	Berechnung: Beachte: C1, C2 und C3 sind die Kaskadengruppen (1., 2. und 3.). Der Enddruck (rechts) in den Flaschen ist derselbe wie in der Kaskadengruppe.	Enddruck Kaskade & Flaschen
Die erste Serie von 4 Flaschen (10 Liter mit einem Restdruck von 20 bar) zu füllen.				
Schritt 1	20 bar	C1 - 200 bar	$((150 \text{ Liter} \times 200 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C1 - 162.1 bar
Schritt 2	162.1 bar	C2 - 200 bar	$((150 \text{ Liter} \times 200 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 162.1 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C2 - 192.0 bar
Schritt 3	192.0 bar	C3 - 200 bar	$((150 \text{ Liter} \times 200 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 192.0 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C3 - 198.3 bar
Die zweite Serie von 4 Flaschen (10 Liter mit einem Restdruck von 20 bar) zu füllen.				
Schritt 1	20 bar	C1 - 162.1 bar	$((150 \text{ Liter} \times 162.1 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C1 - 132.2 bar
Schritt 2	132.2 bar	C2 - 192.0 bar	$((150 \text{ Liter} \times 192.0 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 132.2 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C2 - 179.4 bar
Schritt 3	179.4 bar	C3 - 198.3 bar	$((150 \text{ Liter} \times 198.3 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 179.4 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C3 - 194.3 bar
Die dritte Serie von 4 Flaschen (10 Liter mit einem Restdruck von 20 bar) zu füllen.				
Schritt 1	20 bar	C1 - 132.2 bar	$((150 \text{ Liter} \times 132.2 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C1 - 108.6 bar
Schritt 2	108.6 bar	C2 - 179.4 bar	$((150 \text{ Liter} \times 179.4 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 108.6 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C2 - 164.5 bar
Schritt 3	164.5 bar	C3 - 194.3 bar	$((150 \text{ Liter} \times 194.3 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 164.5 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C3 - 188.0 bar
Die vierte Serie von 4 Flaschen (10 Liter mit einem Restdruck von 20 bar) zu füllen.				
Schritt 1	20 bar	C1 - 108.6 bar	$((150 \text{ Liter} \times 108.6 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C1 - 89.9 bar
Schritt 2	89.9 bar	C2 - 164.5 bar	$((150 \text{ Liter} \times 164.5 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 89.9 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C2 - 148.8 bar
Schritt 3	148.8 bar	C3 - 188.0 bar	$((150 \text{ Liter} \times 188.0 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 148.8 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C3 - 179.7 bar
Die fünfte Serie von 4 Flaschen (10 Liter mit einem Restdruck von 20 bar) zu füllen.				
Schritt 1	20 bar	C1 - 89.9 bar	$((150 \text{ Liter} \times 89.9 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 20 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C1 - 75.2 bar
Schritt 2	75.2 bar	C2 - 148.8 bar	$((150 \text{ Liter} \times 148.8 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 75.2 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C2 - 133.3 bar
Schritt 3	133.3 bar	C3 - 179.7 bar	$((150 \text{ Liter} \times 179.7 \text{ bar}) + (40 \text{ Liter} \times 133.3 \text{ bar})) / 190 \text{ Liter} =$	C3 - 170 bar

Bei einer Kaskade ist der Druck der fünften Serie von 4 Flaschen fast genauso hoch wie bei einer Speicherbank bei der zweiten Serie mit demselben Gesamtvolumen. Somit ist die Zeit, um den fehlenden Restdruck mit dem Kompressor zu ergänzen kürzer und ermöglicht deswegen ein schnelleres Füllen bei grosser Nachfrage. Die Anzahl der Drehstunden des Kompressors (das Füllen der Flaschen und die Zeit, um die Speicherbank oder Kaskade zu füllen) bleiben gleich. Die Luftmenge, die in die Flaschen gedrückt werden muss, hängt nicht von der Organisation ab. Der Vorteil eines Kaskadensystems ist die geringe Zeit, die der Kompressor für den Restdruck der Flaschen benötigt.



Um den Luftfluss in unerwünschte Richtungen zu vermeiden, kann ein Einwegventil an bestimmten Stellen angebracht werden. Zum Beispiel am Anschluss der Füllkonsole, um zu verhindern, dass Luft von den Tauchflaschen wieder in den Kompressor zurückströmt.

Füllkonsolen

An der Füllkonsole werden die Tauchflaschen gefüllt. Die Konsole kann entweder ein Bestandteil des Gehäuses des Kompressors sein oder kann sich weiter weg befinden, getrennt von dem Ort, wo der tatsächliche Füllprozess stattfindet. Sollte die Konsole weiter weg angebracht sein, dann muss sie eine elektronische Verbindung mit dem Kompressor haben und auch über eine Leitung verfügen, durch welche die komprimierte Luft zur Konsole strömen kann. Einige Hersteller liefern den Kompressor mit einer Konsole, die am Gehäuse angebracht ist, aber leicht entfernt und an einer anderen Stelle montiert werden kann.



Sollten Tauchflaschen dort gefüllt werden, wo auch der Kunde Zugang hat, dann sind die Sicherheit und die Lärmbelästigung eine Überlegung. Oft ist eine entfernte Füllkonsole vorzuziehen.

Sicherheitsmassnahmen müssen für die Person eingehalten werden, die die Flaschen füllt. Es müssen eine Reihe an Prozeduren (besprechen wir später) und auch einige technische Vorkehrungen eingehalten werden. Ein Füllschlauch der nicht an einer Tauchflasche angeschlossen ist, steht nicht unter Druck. Bei vielen Konsolen ist der Hebel, um den Schlauch unter Druck zu bringen an der Konsole angebracht. Derselbe Hebel wird auch verwendet, um den Schlauch zu entlüften, bevor dieser wieder von der Flasche abgeschraubt wird. Man könnte sich vorstellen, dass jemand eine Flasche an den linken Abgang anschraubt und versehentlich den zweiten Hebel umlegt. Besonders, wenn eine Speicherbank an das System angeschlossen ist (aber ein Kompressor wäre schon ausreichend), dann würde der zweite Schlauch herumschlagen und stellt eine potentielle Verletzungsgefahr für jeden in der Nähe dar.



Sollten alle Flaschen mit einem DIN Ventil ausgestattet sein, gibt es einen Sicherheitsanschluss auf dem Markt der den Füllschlauch abdichtet, bis er fest in das Ventil eingeschraubt ist. Ein Pin in dem Anschluss verschliesst den Schlauch solange, bis der Anschluss fest genug eingeschraubt ist, um den Pin herunter zu drücken. Sollte aus Versehen der Füllschlauch geöffnet werden an dem keine Flasche angeschlossen ist, dann wird durch den Füllschlauch nur eine geringe Luftmenge ausströmen und deswegen der Schlauch auch nicht herumschlagen. Leider funktioniert dieses System nicht mit (allen) Adaptern für Bügelanschlüsse. Sollte ein Tauchcenter Flaschen mit unter-

schiedlichen Anschlüssen füllen, dann bietet diese Sicherheitsvorkehrung nicht den gewünschten Schutz.

Eine andere Möglichkeit, um ein gewisses Mass an Sicherheit für den Benutzer zu gewährleisten, ist die Benutzung eines Ventils am Ende des Schlauchs, um die Luftpassage zu öffnen und zu schliessen (und auch um den Schlauch zu entlüften), dort wo die Flaschen angeschraubt werden. Bei diesem Konzept hat der Benutzer den Schlauch der geöffnet wird in der Hand und betätigt gleichzeitig das Ventil. Somit sollte schon das Herumschlagen des Schlauches verhindert werden und auch das Risiko eines Fehlers ist sehr begrenzt. Du solltest auf jeden Fall bemerken, dass an dem Füllschlauch den du öffnest keine Flasche angeschraubt ist.

Bei einer anderen Methode wird der Füllschlauch durch einen an der Wand angebrachten Metallring geführt. Der Füllschlauch der von der Konsole kommt, wird durch einen Metallring geführt der ein wenig höher als die Flasche angebracht ist, die an den Füllschlauch angeschraubt wird. Somit hat man ge-

nügend Spiel verschiedene Flaschengrößen anzuschrauben, der Füllschlauch hat aber nicht genügend Spiel zum Herumzuschlagen. Wenn von einem Füllschlauch mit 1.50 m Länge sich nur die letzten 50 cm bewegen können, dann ist es unwahrscheinlich, dass der Benutzer von dem Schlauch getroffen wird, da er normalerweise hinter der Flasche steht.

Kompressor Logbuch

Ein Kompressor Logbuch wird zur Kontrolle und Dokumentation verwendet, was der Benutzer vor der Inbetriebnahme des Kompressors durchführen soll. Die meisten Kompressor Logbücher sind selbst gemacht, da bei verschiedenen Kompressoren andere Punkte wichtig sind und auch andere zusätzliche Ausrüstungen des Kompressors beachtet werden müssen. Das unten aufgeführte Beispiel ist für einen dreistufigen Kompressor ohne zusätzliche Ausrüstung, ohne elektronische Filterkontrolle und ohne Ölpumpe (ansonsten wäre der Ölfilterwechsel aufgeführt).

Der Eigentümer des Kompressors legt die Stunden fest, zu welchen eine bestimmte Instandhaltung durchgeführt werden muss und listet die einzuhaltenden Schritte auf, bevor der Kompressor gestartet werden kann (z.B. den Ölstand überprüfen). Der erste Benutzer des Tages überprüft die Checkliste und vergleicht die Angaben der Stunden im Kompressor Logbuch mit der nächsten fälligen Instandhaltung.

Logbuch Kompressor XYZ Tauchcenter ABC		Nächster Öl- wechsel		1300		Nächster Wechsel Ein- lassfilter		1000		Nächster Fil- terwechsel		730	
												940	
		Nächster vollständiger Service mit Ventilen						2000		Öl Typ		Rarus 829	
Datum	Stunden	Name	Ölstand	Nächster Ölwechsel	Einlassfilter Nächster Wechsel	Nächster Wechsel Filter	Nächster Wechsel Ventil	Start- geräusch	Allgemein Zustand	Unterschrift			
15/03/10	722.4	John	100ml	ok	ok	ok	ok	ok	ok	J. Da			
16/03/10	728.1	Bill	V	V	V	V	V	V	V	B. Xyz			
18/03/10	731.6	John	ok	ok	ok	Gemacht	ok	ok	ok	J. Da			
19/03/10	732.4	John	ok	ok	ok	ok	ok	ok	ok	J. Da			

Wenn eine Instandhaltung durchgeführt wurde, sollte diese eindeutig im Kompressor Logbuch zu erkennen sein. Entweder indem man eine andere Farbe verwendet (wie in dem Beispiel gezeigt), indem der Teil eingekreist wird oder durch eine andere Methode. Die eingetragenen Stunden für den nächsten Wechsel wird durchgestrichen und durch die Stunden ersetzt, bei welchen diese Prozedur wieder durchgeführt werden muss (in Übereinstimmung mit dem Handbuch des Herstellers).

Füllverfahren

Das Füllen beginnt mit der Inspektion der zu füllenden Flaschen. Das Datum des letzten hydrostatischen Tests und der visuellen Inspektion müssen mit den lokalen Gesetzen übereinstimmen. Des Weiteren ist es wichtig zu prüfen, auf welchen Druck die Flasche gefüllt werden darf. Obwohl sie mittlerweile

selten geworden sind, könntest du auch mit Flaschen mit Reserveschaltung konfrontiert sein. In diesem Fall musst du die Reserve vor dem Füllen in die untere Position stellen, ansonsten kann die Luft vom Kompressor nicht ungehindert in die Flasche strömen. Somit erreicht das Volumen innerhalb des Ven-



tils sehr schnell seinen Enddruck, obwohl die Flasche immer noch mehr oder weniger leer ist, wenn sich der Kompressor abstellt.

Jedes Flaschenventil sollte kurz geöffnet werden, um eventuelle Feuchtigkeit zu entfernen. Jegliche Feuchtigkeit in dem Ventil wird mit dem Füllvorgang in die Flasche gedrückt. Im Filter des Kompressors trocknet das Molekularsieb die Luft. Sollte der Benutzer die Feuchtig-

keit die sich nach dem Filter gesammelt hat nicht entfernen, dann wird trotzdem Feuchtigkeit in die Flasche gelangen und beginnen die Flaschenwände innen zu rosten. Der Kompressor selber kann auch Probleme mit Feuchtigkeit verursachen (genauso wie Kohlendioxid). Wenn der Kompressor nicht läuft (und nicht an eine Flasche angeschlossen ist), dann gelangt feuchte Luft in den Füllschlauch. Da der Füllschlauch sich nach dem Filter befindet, wird das Molekularsieb die Feuchtigkeit nicht entfernen. Man behebt dieses Problem, indem man vor dem Füllen ohne eine Flasche anzuschliessen, kurz Luft abströmen lässt. Des Weiteren wird auch der Kohlendioxidgehalt im ersten Füllvorgang hoch sein. Während dem Füllvorgang adsorbiert (an der Oberfläche haftend) das Filtermaterial Kohlendioxid. Wenn der Kompressor nicht im Einsatz ist, wird das adsorbierte Kohlendioxid wieder freigesetzt. Deswegen ist die erste zu füllende Flasche reicher an Kohlendioxid als die restlichen Flaschen. Ein kurzes Entlüften des Kompressors vor dem Anschliessen der ersten Flasche löst auch dieses Problem.

Der tatsächliche Füllvorgang beginnt mit dem Anschliessen der Flaschen an die Füllschläuche. In diesem Moment ist die Schlauchentlüftung geöffnet (das ist bei den meisten Füllschläuchen so, es gibt aber auch Ausnahmen). Würdest du jetzt das Flaschenventil öffnen, dann würde der verbleibende Druck der Flasche durch das Entlüftungsventil ausströmen (und verloren gehen). Als erstes muss der Füllschlauch unter Druck gebracht werden. In den meisten Fällen wird dasselbe Ventil, das das Entlüftungsventil schliesst, gleichzeitig den Zugang zum Kompressor öffnen (die oben angesprochene Ausnahme tritt ein, wenn keine Kombination des Ventils zum Öffnen und zum Entlüften besteht). Wenn der Füllschlauch unter Druck steht, kann die Tauchflasche zum Füllen geöffnet werden.

Wenn Luft komprimiert wird, steigt die Temperatur an. Es gibt einige Techniken, um den Temperaturanstieg zu begrenzen. Je mehr Flaschen bei einem Füllvorgang angeschlossen sind, desto langsamer wird der Füllvorgang sein. Somit wird auch der Temperaturanstieg begrenzt. Eine Konsole mit 6 Flaschen wird einen geringeren Temperaturanstieg haben, als eine Konsole mit 4 Flaschen. Eine andere Möglichkeit ist, die Flaschen während dem Füllvorgang in einem Wasserbad zu kühlen. Die Begrenzung des Temperaturanstiegs während dem Füllen wird auch den Druckverlust verringern, wenn die Flaschen wieder auf Umgebungstemperatur fallen. Wenn du eine Flasche mit 200 (oder 300) bar dem Kunden füllen willst, dann muss der Fülldruck höher sein, um den Druckverlust nach dem Füllen auszugleichen. Je geringer der Temperaturanstieg während dem Füllvorgang ist, desto weniger zusätzlichen Druck benötigst du.

Wenn der Enddruck erreicht ist, kann der Kompressor ausgeschaltet oder umgeleitet werden, um die Speicherbank zu füllen. Damit man auf die Speicherbank umstellen kann, ohne Druck in den gerade gefüllten Tauchflaschen zu verlieren, muss die Füllkonsole mit einem Einwegventil ausgestattet sein. Damit kann Luft nicht aus den gefüllten Flaschen wieder in den Kompressor und in die Speicherbank strömen. Als erstes müssen die Flaschenventile geschlossen und der Füllschlauch entlüftet werden. In den meisten Fällen können diese beiden Manipulationen in einem einzigen Vorgang gemacht werden. Aber wie schon vorher angesprochen, gibt es Ausnahmen. In diesen Fällen müssen beide Manipulationen getrennt durchgeführt werden. Wenn der Füllschlauch entlüftet und die Flaschen abgeschraubt sind, ist das System für den nächsten Füllvorgang von Tauchflaschen bereit.

Im Gegensatz zu der Annahme vieler Taucher, sind nicht alle DIN Anschlüsse für 300 bar ausgelegt. Es gibt zwei verschiedene DIN Anschlüsse und der Unterschied besteht in der Länge der Gewinde (Länge der Anschlüsse). Der 300 bar Anschluss ist länger (im Foto auf der nächsten Seite rechts). Das Konzept ist, dass nur ein 300 bar Anschluss lang genug ist, um ihn soweit in ein 300 bar Ventil einschrauben zu können, dass der O-Ring abdichtet. Ein 200 bar Ventil ist kürzer. Ein 300 bar Lungenautomat kann an eine 200 bar Flasche ohne Probleme angeschlossen werden. Aber ein 200 bar Lungenautomaten kann nicht an eine 300 bar Flasche angeschlossen werden, da der O-Ring nicht den Boden des Ventils erreicht und deswegen nicht dichtet. Für das Füllen trifft das Gegenteil zu. Die unterschiedlichen Anschlüsse funktionieren sehr gut, um die Taucher zu schützen einen Lungenautomaten zu benutzen, der für den Druck nicht konzipiert ist. Sie sind aber mit Risiken für die Person verbunden, die die Flaschen füllt. Ein 300 bar Füllschlauch kann problemlos an eine 200 bar Tauchflasche angeschlossen werden. Es könnte zu einem Überfüllen der Flasche kommen. Eine Anmerkung die sich nicht auf die Sicherheit bezieht. Der Eigentümer einer 300 bar Tauchflasche könnte Probleme haben seine Flasche zu füllen. Die meisten Kompressoren sind für 200 bar ausgelegt. Selbst wenn ein Besitzer einer 300 bar Flasche eine Füllung von 200 bar akzeptieren würde, wäre es nicht möglich. Ein Füllschlauch einer 200 bar Füllstation kann nicht an eine 300 bar Flasche angeschraubt werden, da er nicht dichtet.

Auswahl des Kompressors

Die Auswahl eines Kompressors für ein Tauchcenter ist keine einfache Aufgabe. Man kauft ja nicht jeden Tag einen Kompressor, sondern eher alle 10 Jahre. Die Wahl eines zu grossen Kompressors hat wirtschaftliche Nachteile. Grössere Kompressoren sind teurer und die Ersatzteile sind oft auch kostspieliger. Zu kleine Kompressoren führen zu einem grösseren Arbeitsaufwand für die Belegschaft. Nach den Geschäftszeiten muss noch gefüllt werden, damit die Flaschen für den nächsten Tag einsatzbereit sind. Eine weitere Überlegung ist die Marke.

Die Auswahl einer Kompressormarke sollte hauptsächlich vom verfügbaren Service in dem Gebiet abhängig gemacht werden, wo der Kompressor genutzt wird. Die Verfügbarkeit von Ersatzteilen und Service kann die Wahl zwischen verschiedenen Marken entscheiden. Einige Marken haben den Ruf zuverlässiger, als andere zu sein. Du solltest dir aber bewusst sein, dass sich solche Meinungen auf Informationen aus der Vergangenheit begründen. Heute sind Unterschiede in der Betriebssicherheit eher gering. Ein Schwachpunkt bei Kompressoren könnte der elektrische Teil des Systems sein, das trifft aber bei allen Marken zu.

Es ist am besten die Wahl der Grösse eines Kompressors an einem Beispiel zu zeigen. Stell dir vor, das Boot einer Tauchbasis bietet für 15 Taucher Platz. Zweimal am Tag werden Bootsausfahrten durchgeführt (die zweite 1,5 Stunden nachdem das Boot vom ersten Tauchgang zurückgekommen ist). Zusätzlich werden noch 2 – 3 Flaschen für Schnuppertauchgänge benötigt. Die Tauchbasis hat jeden Tag acht Stunden geöffnet. Um auch unerwartete Füllungen zu berechnen, gehen wir von 34 Flaschen pro Tag aus, die in maximal 6 Stunden gefüllt werden müssen.

Angenommen das Center hat 12 L Flaschen mit einem durchschnittlichen Restdruck von 35 bar. Somit muss das Center 34 Mal am Tag 2.000 barliter füllen. Das Füllvolumen (wenn das Boot für beide Ausfahrten voll besetzt ist) ist 34 Mal 2.000 barliter = 68.000 barliter. Das ist 11.334 barliter pro Stunde (basierend auf maximal 6 Stunden Füllzeit) was wiederum 189 barliter pro Minute entspricht. Mit dieser Angabe können wir jetzt die Broschüren der Hersteller anschauen. In der Broschüre finden wir einen dreistufigen Kompressor der 190 Liter pro Minute füllen kann. Des Weiteren bemerken wir auch eine relativ hohe Drehzahl. Ein solcher Kompressor könnte laut sein und auch der Temperaturanstieg ist zu beachten. In derselben Broschüre wird ein vierstufiger Kompressor mit einer geringen Drehzahl und einem Füllvolumen von 210 Liter pro Minute angeboten.

Ein vierstufiger (X-Typ) Kompressor hält wahrscheinlich länger als das (mehr oder weniger) äquivalente dreistufige Model, besonders wenn seine Drehzahl nur 950 RPM beträgt, wie bei dem Model in der Broschüre. Die Wahl einen teureren Kompressor zu kaufen wird wahrscheinlich durch die längere Lebensdauer des vierstufigen Models kompensiert. Es resultiert in geringeren jährlichen Kosten. Für die hier folgenden Berechnungen gehen wir davon aus, dass wir uns für den X-Typ Kompressor entschieden haben.

Wenn 15 Flaschen zu füllen sind, dann ist das ein Volumen von 30.000 Liter. Mit einem Kompressor der 210 Liter pro Minute liefert, wären das zweiundeinhalb Stunden Füllzeit. Da das Boot eineinhalb Stunden (wie oben angegeben) nach der ersten Ankunft wieder startklar sein muss, kann die Anforderung nicht erfüllt werden. Eine Entscheidung muss getroffen werden. Entweder benötigt das Center mehr Tauchflaschen, um zwei Ausfahrten zu machen, oder der Füllvorgang muss durch den Einsatz einer Speicherbank oder Kaskade beschleunigt werden.

Schauen wir uns gemeinsam an, ob eine 200 Liter Speicherbank (4 Flaschen je 50 Liter) genügend zusätzliche Kapazität bringen würde, um den Zeitrahmen von eineinhalb Stunden einzuhalten.

Füllen mit einer Speicherbank auf 200 bar, bestehend aus 4 Flaschen zu je 50 Liter kombiniert in einem Gesamtvolumen von 200 Liter. Alle Tauchflaschen sind 12 Liter Flaschen mit einem Restdruck von 35 bar.				
Serie von 4 Flaschen	Anfangsdruck Flaschen	Anfangsdruck Speicherbank	Berechnung Beachte: Die 48 Liter entsprechen vier 12 Liter Flaschen in der Tabelle	Enddruck Speicherbank & Flaschen
1 ^{ste}	35 bar	200 bar	$((200 \text{ Liter} \times 200 \text{ bar}) + (48 \text{ Liter} \times 35 \text{ bar})) / 248 \text{ Liter} =$	168.1 bar
2 ^{te}	35 bar	168.1 bar	$((200 \text{ Liter} \times 168.1 \text{ bar}) + (48 \text{ Liter} \times 35 \text{ bar})) / 248 \text{ Liter} =$	142.3 bar
3 ^{te}	35 bar	142.3 bar	$((200 \text{ Liter} \times 142.3 \text{ bar}) + (48 \text{ Liter} \times 35 \text{ bar})) / 248 \text{ Liter} =$	121.5 bar
4 ^{te}	35 bar	121.5 bar	$((200 \text{ Liter} \times 121.5 \text{ bar}) + (48 \text{ Liter} \times 35 \text{ bar})) / 248 \text{ Liter} =$	104.7 bar

Erforderliche Füllzeit für einen Kompressor mit einer Füllgeschwindigkeit von 210 Litern pro Minute und für das Nachfüllen (toppen) der Flaschen, wie in der Berechnung der Speicherbank oben angegeben.				
Serie von 4 Flaschen	Anfangsdruck Flaschen	Enddruck	Berechnung Beachte: Der angegebene Druck in der Berechnung ist der fehlende Druck in den Flaschen $200 - 168.1 = 31.9 \text{ bar}$.	Benötigte Zeit zum Nachfüllen
1 ^{ste}	168.1 bar	200 bar	$(31.9 \text{ bar} \times 48 \text{ Liter}) / 210 \text{ Liter pro Minute}$	7½ Minuten
2 ^{te}	142.3 bar	200 bar	$(57.7 \text{ bar} \times 48 \text{ Liter}) / 210 \text{ Liter pro Minute}$	13½ Minuten
3 ^{te}	121.5 bar	200 bar	$(78.5 \text{ bar} \times 48 \text{ Liter}) / 210 \text{ Liter pro Minute}$	18 Minuten
4 ^{te}	104.7 bar	200 bar	$(95.3 \text{ bar} \times 48 \text{ Liter}) / 210 \text{ Liter pro Minute}$	22 Minuten

Wie man an der Berechnung sieht, ist die Füllzeit bei einem grossen Bedarf mit einer Speicherbank (keine Kaskade) von 200 Litern auf 200 bar in etwas über einer Stunde möglich. Im Idealfall würde der Besitzer eines Tauchcenters verschiedene Szenarios berechnen, bevor er sich für einen Kompressor und ein System der Speicherbank entscheidet. Es ist nicht schwierig solche Berechnungen in eine Kalkulationstabelle einzugeben mit der Option verschiedene Volumen der Speicherbank und der Anzahl der Kaskadengruppen zu berechnen. Es ist immer besser ein wenig Zeit in die Berechnung der Anforderungen an das System zu investieren, als später mit einer falschen Entscheidung konfrontiert zu sein. Du wirst bemerkt haben, dass der Enddruck in den Berechnungen immer 200 bar ist, obwohl die Flaschen normalerweise auf einen Druck von 210 und 220 bar gefüllt werden, um den Druckverlust zu kompensieren, wenn die Flaschen auf Umgebungsdruck abkühlen. Das ist aufgrund der Annahme, dass die Hersteller von Kompressoren die Lieferleistung ihrer Kompressoren auf Umgebungsdruck angeben.

Nitrox Anlagen

Nitrox hat sich ab den neunziger Jahren als zweites Atemgas für Taucher etabliert. Obwohl nach wie vor die meisten Tauchgänge mit Luft gemacht werden, ist ein Buch über Kompressoren ohne Informationen über das Füllen von Nitroxflaschen nicht vollständig.

Als Vorbereitung auf den technischen Teil des Kapitels werden erst die möglichen Konsequenzen von hohen Sauerstoffpartialdrücken erklärt. Anschliessend werden die verfügbaren Arten von Sauerstoff behandelt. Der technische Teil beginnt mit dem Füllen von Nitrox unter hohem Druck und danach werden Beimisch- und Membrananlagen erklärt.



Sauerstoffpartialdruck

Das Tauchen mit Nitrox ist sehr populär geworden. Taucher müssen eine zusätzliche Ausbildung absolvieren, bevor sie mit Nitrox tauchen können, um mit dem erhöhten Sauerstoffanteil in ihrem Atemgas richtig umgehen zu können. Diese Überlegungen werden hier nicht besprochen. Anstelle davon besprechen wir die Überlegungen für das Füllen von Nitrox.



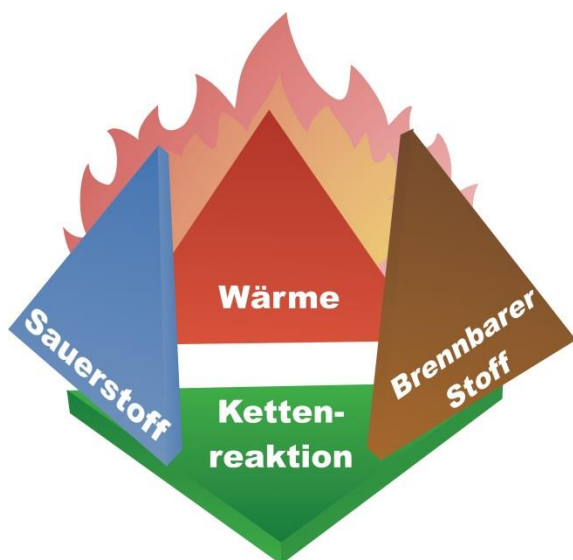
Du kannst Sauerstoff weder sehen, noch riechen oder schmecken, aber Sauerstoff reagiert (oxidiert) mit anderen Substanzen. Eine solche Reaktion kann schnell oder langsam geschehen. Eine schnelle Oxidation könnte ein Feuer oder eine Explosion sein und eine langsame Oxidation ist z.B. die Korrosion (Rost). Im Gegensatz, was du in Publikationen über den Gebrauch von Nitrox liest, stellt die Explosion nicht das Hauptproblem dar. Es besteht ein fundamentaler Unterschied zwischen einem Feuer und einer Explosion. Feuer wird initiiert aus der Entzündung einer Substanz. Wenn das Feuer genügend Hitze erzeugt um eine fortwährende Reaktion zu gewährleisten, dann brennt die Substanz. Ein

Feuer ist abhängig vom Sauerstoff aus der Umgebung. Die Oberfläche der brennenden Substanz (z.B. Öl) ist in Berührung mit der Atmosphäre die Sauerstoff enthält. Die unteren Schichten werden deswegen solange nicht brennen, bis sie die Oberfläche erreichen.

Mit Gasen kann eine explosive Mischung entstehen, wenn ein brennbares Gas und Luft (enthält Sauerstoff) genügend Zeit haben, um ein Mischverhältnis zu erreichen, in welchem die brennbaren Moleküle sich nahe genug an die Sauerstoffmoleküle bewegen können. Der Unterschied zwischen einem Feuer und einer Explosion besteht also in der Anwesenheit von Sauerstoff „in der Mischung“. Explosives Material ist eine Mischung aus brennbarem Material und Sauerstoff in einem „optimalen Verhältnis“, während ein brennbares Material von dem Sauerstoff in seiner Umgebung abhängt. Eine Explosion ist eine Situation, in welcher alle brennbaren Materialien gleichzeitig „brennen“ und zwar unabhängig ob sie Sauerstoff aus der Umgebung erhalten oder nicht.

Ein erhöhter Sauerstoffanteil wird ein Feuer intensivieren. Das kann entweder durch Luftbewegung ausgelöst werden (z.B. in ein Barbecue hineinblasen) oder indem man den Sauerstoffanteil des Gases erhöht (wie bei Nitrox). Wenn ein Feuer stärker brennt, dann könnte es heiss genug werden, um die Wand eines Behälter zu schmelzen (oder verbrennen). Sollte dieser Behälter unter Druck stehen, dann würde dieses Loch einen plötzlichen Druckverlust verursachen.

Bei Kompressoren stellen Fett oder Öl bei der zusätzlichen Ausrüstung und den Tauchflaschen ein Problem dar. Die Chancen einer tatsächlichen Explosion sind eher gering. Es ist wahrscheinlicher, dass sich ein geringer Teil von Öldunst entzündet (Selbstentzündung) oder das Öl oder Fett zu brennen beginnt. Sollte sich dieser Vorgang im Inneren des Kompressors abspielen, dann merken wir dieses nicht einmal. Sollte das allerdings in einem Schlauch passieren, dann könnte der Schlauch schmelzen und zu einem schlagartigen Druckverlust führen. Die Hauptprobleme sind deswegen (sehr) kleine Feuer und Entzündungen (Funken). Diese Ereignisse verbrennen Sauerstoff und produzieren als Abfallprodukte Kohlendioxid und Kohlenmonoxid. Kohlenmonoxid ist giftig. Die Entstehung von Kohlenmonoxid und damit die Sicherheit des Tauchers ist die grösste Sorge beim Füllen von Nitrox. Wesentlich wichtiger als eine „Explosion“ sind die kleinen Feuer die keinen schlagartigen Druckverlust erzeugen und unerkannt für den Benutzer des Kompressors ablaufen.



Das Risiko eines Feuers oder einer Explosion ist von drei Faktoren abhängig. Der Anwesenheit eines brennbaren Materials (Brennstoff), einer Quelle für die Entzündung (Energie) und einem Oxydationsmittel (Sauerstoff). In einem Kompressor sind alle drei Faktoren vorhanden. Die Temperatur in einem Kompressor ist erhöht, die Luft ist komprimiert, welches den Partialdruck von Sauerstoff erhöht und der Kompressor muss geschmiert werden, womit auch Öl vorhanden ist. Sollte einer dieser drei Faktoren fehlen, dann kann kein Feuer entstehen. Sollte einer der drei Faktoren erhöht sein, dann kann das Risiko eines Feuers verringert werden, indem man einen der beiden anderen Faktoren reduziert.

Wie vorher besprochen, ist der Temperaturanstieg in einem Kompressor auf 160°C begrenzt (obwohl dies in den meisten Ländern nicht offiziell ist). Die ver-

schiedenen Öltypen entzündeten sich bei unterschiedlichen Temperaturen. Um das Risiko einer Selbstentzündung zu verringern, empfehlen einige den Gebrauch von synthetischen Ölen (im Gegensatz zu Mineralölen). Die Verfügbarkeit von Sauerstoff ist begrenzt durch den Sauerstoffprozentanteil in der Luft und durch den Maximum Druck des Kompressors. Beim Füllen von Nitrox erhöhen wir die obere Grenze des Sauerstoffanteils in der Luft. Der Partialdruck von Sauerstoff ist „höher als normal“ und somit erhöht sich auch das Risiko eines Feuers und einer Selbstentzündung. Wenn Nitrox gefüllt wird, muss dieser Faktor berücksichtigt werden.

Obwohl es ein zusätzliches Risiko gibt, bedeutet das nicht, dass man dieses nicht kontrollieren kann. Wie schon angesprochen, derselbe Kompressor kann benutzt werden, um 200 oder 300 bar Flaschen zu füllen. Ein Kompressor der Luft auf 300 bar füllt, hat einen Sauerstoffpartialdruck von 63 bar ($0,21 \times 200$) in der letzten Stufe und der nachfolgenden Ausrüstung. Beim Füllen von Nitrox 32 auf 200 bar, wäre das 64 bar ($0,32 \times 200$), also fast das gleiche. Der Vergleich zwischen Luft auf 300 bar und Nitrox 32 auf 200 bar zeigt, dass die obere Begrenzung für Sauerstoff die durch den Kompressor strömt nicht 21% beträgt. Die Frage wie hoch eine akzeptable obere Begrenzung sein sollte, ist nicht einfach zu beantworten. Das Risiko, dass sich eine Substanz selbst entzündet, ist abhängig von den Eigenschaften der Substanz, der Temperatur und dem Sauerstoffpartialdruck. Entgegengesetzt ist der Partialdruck von Sauerstoff wiederum abhängig von dem Enddruck und dem Prozentanteil in der Mischung. Um das Risiko zu verringern, sollte als erstes der Maximum Druck, auf welchen sauerstoffreiche Mischungen durch den Kompressor strömen, auf 200 bar begrenzt werden.

Der höchste Prozentanteil, der durch einen ölgeschmierten Kompressor strömen darf, wurde durch eine Vereinbarung festgelegt. Es wird die 40% Regel genannt und bezieht sich nicht nur auf Kompressoren sondern auch auf andere Teile, wie z.B. Tauchflaschen. Im Allgemeinen sagt diese Regel aus, dass alle Mischungen bis zu 40% Sauerstoffanteil wie Luft, und höhere Mischungen, wie reiner Sauerstoff zu behandeln sind. Beachte allerdings die lokalen Gesetze und Regeln, die den Einsatz der 40% Regel eventuell beschränken. Letztendlich ist es nicht der Prozentanteil der zählt, sondern der Sauerstoffpartialdruck in Verbindung mit der Temperatur und dem Flammpunkt der Substanz, die mit Sauerstoff in Kontakt kommt. Eine Regel, die sich auf Prozentanteile bezieht, sollte mit Vorsicht gehandhabt werden.

Verschiedene Arten von Sauerstoff

Die meisten Verfahren zur Herstellung von Nitroxgemischen erfordern reinen Sauerstoff. Sauerstoff ist ganz einfach O_2 . Das bedeutet es gibt nur einen Typ von Sauerstoff, aber in unterschiedlichen Qualitä-

ten. Es gibt einige Überlegungen, welchen Sauerstoff man für die Mischung verwendet. Medizinischer Sauerstoff erfüllt die Anforderungen als „reiner Sauerstoff“, ist aber in vielen Ländern ein Medikament und verschreibungspflichtig. Somit kann er in diesem Fall nicht verwendet werden. Meistens schreiben die Normen für medizinischen Sauerstoff eine Reinheit von 99,5% des Sauerstoffs vor und die restlichen 0,5% werden auf die Abwesenheit von Kohlenmonoxid geprüft (obwohl diese Normen je Land variieren können).

Verschreibungspflichtige Medikamente können nur von einem Arzt verschrieben werden, was wiederum ihren Einsatz für das Mischen beschränkt. In den meisten Ländern gibt es einen Verbrauchssauerstoff der dieselben Normen einhält, der aber ohne gesetzliche Beschränkungen verkauft werden darf. Im Gegensatz zu medizinischem Sauerstoff kann Atemqualitätssauerstoff zum Mischen verwendet werden. Eine andere Möglichkeit ist der „Aviation grade“ Sauerstoff (Sauerstoff für Flugzeuge). Das ist Atemqualitätssauerstoff, der während dem Füllen durch Molekularsieb strömt und damit die Feuchtigkeit aus dem Sauerstoff entfernt wird, um zu verhindern, dass die Sauerstoffausrüstung in Flugzeugen einfriert.

Alle drei Sauerstoffarten werden so gefüllt, dass keine Verunreinigung in die Flaschen gelangt, oder dort bleibt. Die Flaschen werden vollständig geleert, bevor sie wieder gefüllt werden. Theoretisch gesehen durchläuft der technische Sauerstoff oder der Sauerstoff zum Schweißen nicht diese Prozeduren und könnte deswegen mit anderen Gasen verunreinigt sein. Um Probleme mit der Qualität des Sauerstoffs zu vermeiden, sollten Mischer deswegen nur Atemqualitätssauerstoff oder Aviation grade Sauerstoff verwenden. Aber keinen technischen- oder Schweissersauerstoff. Wie vorher schon angesprochen, eine Abklärung der lokalen Gesetze und Verfügbarkeit ist notwendig, bevor man entscheiden kann, welcher Sauerstoff zum Mischen verwendet werden kann.

Mischen bei hohem Druck

Als Erstes muss man beim Mischen von Nitrox entscheiden, ob man bei Umgebungsdruck mischen will (und danach das Nitrox durch den Kompressor strömen lassen möchte) oder zuerst die Luft komprimiert und sie dann mit Sauerstoff auf hohem Druck mischt. Beide Methoden haben Vor- und Nachteile. Beim Mischen auf hohem Druck, strömt die sauerstoffreiche Mischung nicht durch den ölgeschmierten Kompressor und deswegen trifft hier die 40% Regel nicht zu. Beim Mischen unter Hochdruck kann jede Mischung bis zu 99% Sauerstoff zubereitet werden. Das ist von Vorteil wenn man für Tec Taucher (und Rebreather Taucher) mischt, weil diese Taucher oft sauerstoffreiche Gemische benötigen.

Mischen auf Umgebungsdruck beschränkt das Gemisch auf einen Sauerstoffgehalt von 40%. Es wäre möglich höhere Gemische zu machen, aber der Kompressor ist hierbei der begrenzende Faktor. Ein Vorteil ist die Geschwindigkeit mit welcher gefüllt werden kann und bis zu welchem Mass die Tauchflaschen gereinigt werden müssen (die Flaschen kommen nur mit dem bereits gemischten Nitrox und nicht mit reinem Sauerstoff in Kontakt).

Das Füllen unter hohem Druck wird Partialdruckverfahren genannt. Als erstes wird reiner Sauerstoff in die Flaschen gefüllt und danach wird der Restdruck mit dem Kompressor gefüllt. Hier ist es aus zwei Gründen wichtig, dass die Temperatur nicht stark ansteigt. Wenn sich der Sauerstoff aufgrund der Temperaturerhöhung ausdehnt, dann ist der Anteil an Sauerstoff nicht mehr derselbe wie er berechnet wurde (der Manometer zeigt zu viel an). Somit entsteht ein anderes Gemisch als vorgesehen. Der zweite Grund betrifft die Sicherheit. Wenn 100% Sauerstoff gefüllt werden, dann sollte die Temperatur so niedrig als möglich gehalten werden. Die Füllgeschwindigkeit sollte 5 bar pro Minute nicht übersteigen.

Bedient man Taucher die Nitroxgemische tauchen, dann ist die langsame Füllgeschwindigkeit von Nachteil. Einige Tauchcenter lösen dieses Problem, indem sie eine Speicherbank mit Nitrox 40 füllen

und dieses Gemisch dann beim Füllen in die Tauchflasche des Kunden „verdünnen“. Nitrox 40 kann wie Luft behandelt werden und deswegen kann es mit normaler Füllgeschwindigkeit gefüllt werden.

Jedes Ausrüstungsteil, das mit einem hohen Sauerstoffanteil in Kontakt kommt, muss hierfür gereinigt sein. Wenn die Tauchflasche zum Mischen verwendet wird dann muss die Flasche und das Ventil sauerstoffrein sein. Es ist schwierig die Flasche eines Kunden auf seine Reinheit zu überprüfen. Deswegen füllen die meisten Blender die Gemische nur in eigene Flaschen vom Tauchcenter. Aufgrund der angesprochenen Nachteile wird das Partialdruckverfahren nur sehr selten für Gemische unter 40% angewendet.

Die primitivste Art, um mit Partialdruckverfahren zu mischen, ist ein Transferschlauch. Als erstes wird die Flasche an die Sauerstoffflasche angeschlossen und bis zu dem berechneten Druck mit Sauerstoff gefüllt. Danach wird die Flasche an den Kompressor angeschlossen und bis zum Enddruck aufgefüllt. Um den Arbeitsaufwand des mehrfachen Anschliessens zu verhindern, kann eine Nitrox Füllkonsole verwendet werden.

Obwohl der Sauerstoff zuerst gefüllt wird, muss die Sauerstoffflasche genügend Druck haben, um den gewünschten Druck in der Tauchflasche zu erreichen (ausser es wird ein Booster benutzt). Das bedeutet, dass etwa die letzten 50 bar nicht benutzt werden können. Das Problem mit „verlorenem Sauerstoff“ kann beschränkt werden, indem man mit mehreren Flaschen ein Kaskadensystem einsetzt (deswegen siehst du auf der Nitroxkonsole auch mehrere Sauerstoffquellen).



Es ist auch schwierig mehre Flaschen gleichzeitig zu füllen. Jede Flasche hat einen anderen Restdruck und eine andere Mischung. Beim Partialdruckverfahren wird meistens eine Flasche nach der anderen gefüllt. Um dieses zu vermeiden, könnte man entweder die Flaschen vollständig entlüften (was schade wäre) oder das Tauchcenter könnte sich entscheiden immer nur ein Nitroxgemisch zu füllen. Deswegen wirst du viele Tauchcenter finden die nur Nitrox 32 anbieten.

Das Mischen auf Umgebungsdruck ist deswegen von Vorteil. Es kann schneller gefüllt werden, die Notwendigkeit von sauerstofffreier Ausrüstung ist begrenzt und die Ausbildung der Person die mischt und den Kompressor bedient, ist einfacher (jeder, der Partialdruckverfahren mischt, muss als Gasblender ausgebildet sein). Das bestehende Problem (wenn mehrere Gemische angeboten werden) ist das Gemisch in der Tauchflasche von dem vorherigen Tauchgang. Die Berechnung hierfür ist allerdings einfacher. Es gibt nur eine Sauerstoffquelle, somit ist es ausreichend nur das Gemisch zu berechnen, auf welches die Anlage eingestellt werden muss. Beim Partialdruckverfahren müssen zwei Berechnungsschritte durchgeführt werden. Der erste Schritt ist die Berechnung des Sauerstoffprozentanteils in dem Gemisch das gefüllt werden muss und der zweite Schritt ist die Aufteilung des Sauerstoffanteils. Der Teil des Sauerstoffs der schon in der Luft enthalten ist und der Anteil des reinen Sauerstoffs.

Schritt 1: Finde den % der dem Gemisch zugefügt werden muss. Muss für alle Systeme berechnet werden.

Ich möchte	⑤	bar	auf (multipliziere) %	0._____	=	bar
Ich habe	⑥	bar	auf (multipliziere) %	0._____	=	bar
Ziehe Zeile 2 von Zeile 1 ab, um zu finden:						
Druck zufügen	①	bar	Sauerstoff zufügen	②		bar
Sauerstoff zufügen	②					
Dividiert durch Druck zu zufügen	①					
Prozentanteil hinzuzufügen	③					

Schritt 2: Finde wie viel Sauerstoff in die Flasche hinzugefügt werden muss – nur für Partialdruckverfahren.

Prozentanteil hinzuzufügen	Minus O ₂ Prozentanteil in der Luft	Mal Druck hinzuzufügen	Ergibt, wie viel Sauerstoff in bar hinzugefügt werden muss	
③	-/- 0.21			
0.79		x ①	= ④	bar
Dividiert durch den % N ₂ in der Luft				
Restdruck in der Flasche	⑥	bar		
Plus Sauerstoff hinzuzufügen	④	bar		
Füllen mit O ₂ auf einen Druck von		bar	Auffüllen mit Luft bis zum Zieldruck ⑤	

Das Beispiel unten zeigt eine Berechnung für eine Tauchflasche mit einem Restdruck von 55 bar und einem Gemisch von EANx36. Die Flasche soll mit einem Gemisch von EANx32 und um den Temperaturanstieg mit zu berechnen auf einen Enddruck von 210 bar (um sicher zu sein, dass 200 bar in der Flasche sind, wenn sie auf Umgebungstemperatur abkühlt) gefüllt werden. Wenn auf Umgebungsdruck gemischt wird, dann haben wir mit dem Berechnungsschritt 1 alle notwendigen Informationen. Sollte mit Partialdruckverfahren gemischt werden, müssen sowohl Schritt 1, als auch Schritt 2 ausgeführt werden. Die Werte werden in das Kästchen mit der gleichen Nummer eingetragen.

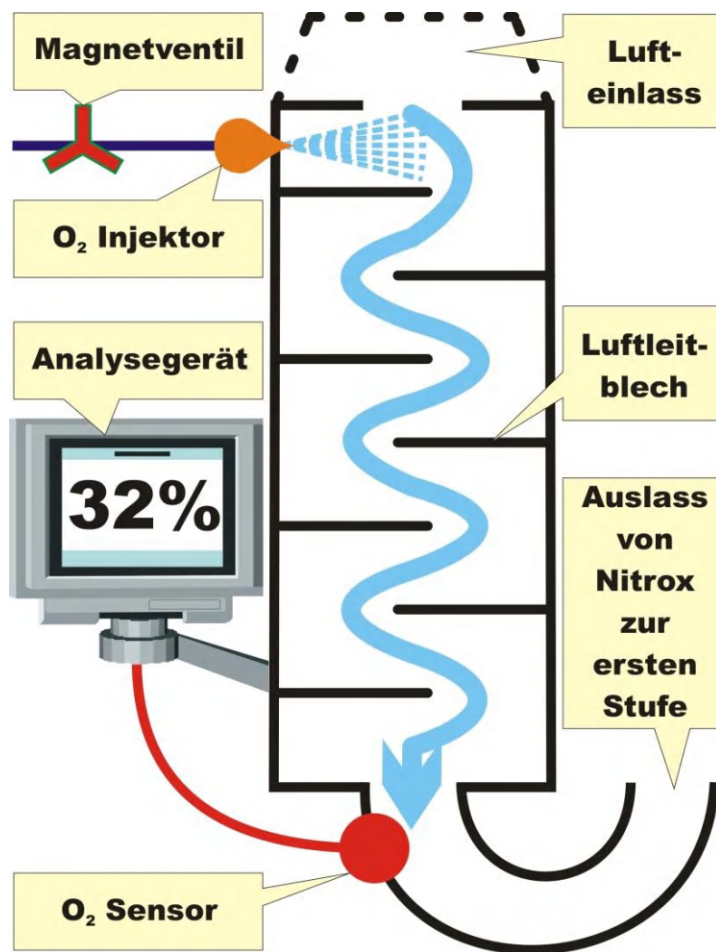
Schritt 1: Finde den % der dem Gemisch zugefügt werden muss. Muss für alle Systeme berechnet werden.

Ich möchte	⑤	210 bar	auf (multipliziere) %	0.32	=	67.2 bar
Ich habe	⑥	55 bar	auf (multipliziere) %	0.36	=	19.8 bar
Ziehe Zeile 2 von Zeile 1 ab, um zu finden:						
Druck zufügen	①	155 bar	Sauerstoff zufügen	②	47.4	bar
Sauerstoff zufügen	②	47.4				
Dividiert durch Druck zu zufügen	①	155				
Prozentanteil hinzuzufügen	③	0,306 ≈ 31%				

Schritt 2: Finde wie viel Sauerstoff in die Flasche hinzugefügt werden muss – nur für Partialdruckverfahren.

Prozentanteil hinzuzufügen	Minus O ₂ Prozentanteil in der Luft	Mal Druck hinzuzufügen	Ergibt, wie viel O ₂ in bar hinzugefügt werden muss	
③ 0,306	-/- 0.21			
0.79		x ① 155	= ④	18.8 bar
Dividiert durch den % N ₂ in der Luft				
Restdruck in der Flasche	⑥	55 bar		
Plus Sauerstoff hinzuzufügen	④	18.8 bar		
Füllen mit O ₂ auf einen Druck von		73.8 bar	Auffüllen mit Luft bis zum Zieldruck	

Mischen auf Umgebungsdruck



Wenn Sauerstoff mit Luft auf Umgebungsdruck gemischt wird, dann ist kein Mindestdruck in der Sauerstoffflasche für die Nitroxfüllung erforderlich. Das bedeutet es geht auch kein Sauerstoff verloren. Die gesamte Sauerstoffflasche kann benutzt werden. Ein Fluss von Sauerstoff wird in die Luft eingespritzt die zum Kompressor strömt, um ein homogenes Nitroxgemisch zu erreichen. Diese Mischung strömt dann zum Kompressoreinlass. Das Beimischgerät könnte theoretisch hohe Gemische machen, aber wie schon vorher erwähnt, alle Gemische höher als 40% müssen mit dem Partialdruckverfahren gemischt werden.

Die Zufuhr von Sauerstoff ist einstellbar, womit verschiedene Gemische möglich sind. Am Ende des Mischgerätes ist ein Sauerstoffsensor angebracht, um die tatsächliche Analyse vorzunehmen. Der Blender kann jetzt den Injektor (meistens ein kleines Nadelventil) einstellen, bis das Analysegerät das richtige Gemisch anzeigt z. B. EANx 32. Um dieses Gemisch während dem ganzen Füllvorgang zu halten, muss die Luftdichtigkeit von diesem Punkt an durch den ganzen Kompressoreinlass (inklusive dem Luftfilter) gewährleistet sein.

Sollte irgendwo Umgebungsluft nach dem Mischen in den Kompressor gelangen, wird sich der Sauerstoffanteil verringern und deswegen auch das Nitroxgemisch.

Um die 40% Regel einzuhalten, ist der Prozentanteil in der Flasche am Ende des Füllvorgangs nicht der entscheidende Faktor. Es wäre nicht akzeptabel wenn beim Füllen der Sauerstoff zwischen 50% und 30% schwankt, obwohl das Endresultat sehr wohl ein Gemisch von 40% sein könnte. Die Bauweise des Geräts muss gewährleisten, dass zu keinem Zeitpunkt das Gemisch höher als 40% ist. Es ist notwendig, dass die Mischung ausreichend bewegt wird, um am Ende ein homogenes Gemisch zu erhalten. Zu diesem Zweck sind die Mischgeräte mit Luftleitblechen ausgestattet.

Des Weiteren muss der Zufluss von Sauerstoff in dem Moment aufhören, wenn der Kompressor stoppt. Wenn das nicht der Fall wäre, würde sich Sauerstoff ansammeln während der Kompressor keinen Durchfluss erzeugt und somit ein sehr hohes Gemisch erzeugen, wenn der Kompressor das nächste Mal gestartet wird.

Die Synchronisierung der Sauerstoffinjektion mit dem Starten und Stoppen des Kompressors kann mittels eines Magnetventils erreicht werden, das am elektrischen System des Kompressors angeschlossen wird. Das Ventil sollte sich mit dem Starten des Kompressors öffnen und wieder schliessen wenn der Kompressor abschaltet (unabhängig ob der Kompressor automatisch oder manuell abgeschaltet wird). Magnetventile arbeiten auf 220 Volt, während der elektrische Motor des Kompressors auf 380 Volt

dreht. Ein guter Platz ist der Zähler, um das Ventil am elektrischen System des Kompressors anzubringen. Der Zähler arbeitet mit 220 Volt und beginnt und stoppt simultan mit dem Motor des Kompressors.

Damit der Injektor eine konstante Sauerstoffzufuhr gewährleisten kann, muss er mit einem gleichbleibenden Druck versorgt werden. Zu diesem Zweck befindet sich ein Druckminderer am Sauerstoffvorrat der auf einen Mitteldruck eingestellt ist, der wiederum dem Nadelventil angepasst ist. Meistens ist der Druck zwischen 3 und 6 bar. Sollte der Flaschendruck unter den Mitteldruck fallen, dann verringert sich die Sauerstoffzufuhr und das Gemisch wird niedriger, als es eingestellt war.

Ein Mischgerät beim Beimischverfahren muss an die Grösse des Kompressors angepasst sein. Sollte der Durchmesser des Durchlasses für das benötigte Volumen des Kompressors zu klein sein, dann könnte der Kompressor Luft aus der Ölwanne ansaugen. Damit wird nicht nur das Gemisch verändert (einen geringeren Sauerstoffanteil als eingestellt) aber es wird auch mehr Öldunst in die erste Stufe angesaugt. Geräte für das Beimischverfahren gibt es in verschiedenen Grössen und die Gebrauchsanweisung sollte den maximalen Fluss in Litern pro Minute angeben, bis zu welchem das Gerät benutzt werden kann.

Es gibt keine Methode, um Nitrox in einer umweltfreundlichen Art zu füllen. Unabhängig von der Methode wird wesentlich mehr Energie benötigt, als wenn man eine Tauschflasche mit Luft füllt. Von den verfügbaren Methoden (Partialdruckverfahren, Beimischverfahren und Membran Anlagen) schneidet das Beimischverfahren beim Energieverbrauch am besten ab. Der Energieaufwand für Flaschenfüllungen ist genauso wie bei Luft und der Sauerstoffspeicher kann bis zum letzten bar benutzt werden (der Energieaufwand für die Herstellung von Sauerstoff und dem Transport ist aber hoch). Beim Partialdruckverfahren geht aufgrund der Druckanforderungen ein Teil des Sauerstoffs verloren. Man könnte zwar mit einer Boosterpumpe den Sauerstoffverlust (oder Helium) verhindern, aber dafür müsste man Energie einsetzen. Wie wir später noch sehen werden, ist das Füllen mit einer Membrananlage noch umweltfreundlicher.

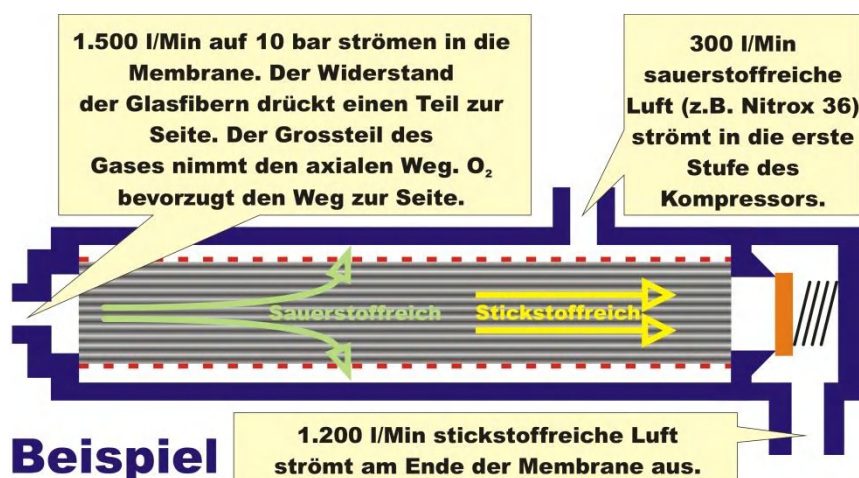
Das Beimischverfahren ist wirtschaftlich die interessanteste Methode. Die Ausrüstung kostet nur geringfügig mehr (wenn überhaupt) als die Ausrüstung für das Partialdruckverfahren, wobei der gesamte Sauerstoff aus dem Sauerstoffspeicher benutzt werden kann. Die Kosten für die Nitroxfüllungen hängen nur vom Preis für Sauerstoff in der Gegend ab, in welcher das Tauchcenter arbeitet. Die örtlichen Bestimmungen müssen allerdings eingehalten werden. Es könnten Beschränkungen im Transport und in der Manipulation von reinem Sauerstoff bestehen. Eine andere Überlegung könnten die technischen Anforderungen sein, die erfüllt werden müssen, um eine Kompressoranlage kommerziell zu benutzen. Solche Regelungen variieren von Land zu Land (teilweise sehr stark) und können nicht in einem Text zusammengefasst werden, der über die ganze Welt benutzt wird.

Die Beschränkung der 40% Regelung wird durch die Vorteile für die Umwelt und die Wirtschaftlichkeit ausgeglichen und auch durch die Tatsache, dass es keine Beschränkung in der Füllgeschwindigkeit gibt. Es besteht ein anderer Nachteil beim Mischen auf Umgebungsdruck. Es gibt eine (erhebliche) Verzögerung zwischen dem Einstellen der Mischung am Mischgerät und dem Moment, in welchem die Mischung tatsächlich an der Füllkonsole ankommt. Als erstes muss das Nitroxgemisch die Zylinder des Kompressors, die Abscheider, die Filter und alle anderen Lufträume füllen. Bis zu diesem Moment, drückt das Nitroxgemisch nur die Luft im System vor sich her (oder eine anderes Nitroxgemisch einer vorherigen Füllung). Die Verzögerung vom Einstellen des Gemisches bis zur Ankunft in der Füllkonsole muss beim Beimischverfahren vermessen werden (diese Verzögerung muss bei allen zukünftigen Füllungen berücksichtigt werden). Abhängig von dem Volumen des Filters und den Abscheidern, kann die Verzögerung eine bis mehrere Minuten sein. Viele Anwender dieses Systems benutzen einen Anschluss an der Füllkonsole für eine Flasche, in welche sie das „Zwischengemisch“ abströmen lassen und öffnen die Zielflasche(n) erst in dem Moment, wenn die tatsächliche Mischung an der Füllkonsole ankommt. Die Flasche mit dem „Zwischengemisch“ wird einen geringen Anteil EANx enthalten und kann für Schwimmbadkationen oder Ausbildungstauchgängen im Freiwasser vom Staff des Tauchcenters benutzt werden.

Membran Systeme

Sollte die Verfügbarkeit von Sauerstoff, der Preis oder gesetzliche Regelungen problematisch sein, dann sind sowohl das Partialdruckverfahren, als auch das Beimischverfahren schwierig. Es gibt eine andere Lösung. Das Entfernen von Stickstoff aus der Luft und somit als Ergebnis ein sauerstoffreiches Gemisch. Anstatt den Sauerstoffgehalt in der Luft zu erhöhen, wird der Stickstoffgehalt in der Luft verringert. Es könnte auch einen wirtschaftlichen Grund geben, um sich für ein Membransystem zu entscheiden. Eine Membrananlage ist in der Anschaffung teurer als andere verfügbare Systeme, aber wiederum sind die laufenden Kosten geringer. Bei einem Membransystem benötigst du keinen Zulieferer für Sauerstoff. Der Stromverbrauch und die Instandhaltungskosten sind höher als bei anderen Systemen (wesentlich höher), aber abhängig vom Preis für Sauerstoff kann es sich immer noch rechnen. Ein Membransystem wird erst dann wirtschaftlich interessant, wenn ein Mindestvolumen (an Füllungen) überstiegen wird. In Mitteleuropa könnte das ein Füllvolumen von 10 bis 20 Flaschen am Tag sein und in entlegenen Gebieten bereits 3 bis 4 Flaschen am Tag (wenn die Transportkosten für Sauerstoff sehr hoch sind).

Membrananlagen haben die gleichen Vor- und Nachteile wie die Beimischverfahren. Sie sind auch auf 40% begrenzt, haben eine Verzögerung zwischen dem Einstellen des Gemisches und dem Moment bei welchem das Gemisch die Füllkonsole erreicht und muss auch auf die Grösse des Kompressors angepasst sein. Auf der anderen Seite ist die Füllgeschwindigkeit nicht beschränkt und die Anforderungen an sauerstofffreien Tauchflaschen und Ventilen ist begrenzt. Für den Füllvorgang mit einer Membrane laufen gleichzeitig zwei Kompressoren. Somit ist der umweltfreundliche Aspekt, der beim Beimischverfahren besteht, bei Membransystemen nicht vorhanden.



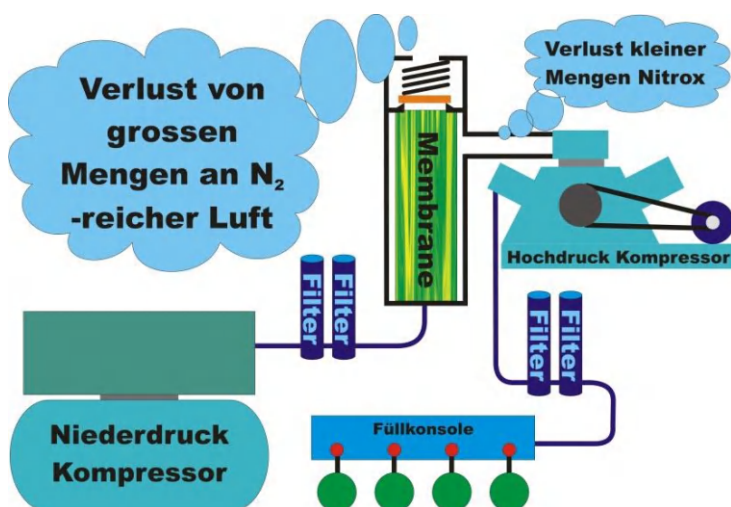
Der funktionelle Teil einer Membrananlage ist die Membrane selbst. Ein Bündel Glasfibern befindet sich in einem Rohr. Zwischen der Aussenwand und dem Glasfaserbündel besteht ein Leerraum, in welchem Gas gesammelt wird und das Rohr an der Seite verlässt. Luft wird (unter Druck) an einer Seite des Rohrs in das Glasfaserbündel eingespritzt. Ohne Widerstand würde das Glasfaserbündel das gesamte eingespritzte Gas zwingen sich linear durch das Bündel zu bewegen und am anderen Ende des Rohrs wieder auszuströmen.

gespritzte Gas zwingen sich linear durch das Bündel zu bewegen und am anderen Ende des Rohrs wieder auszuströmen.

Um die Trennung von Sauerstoff und Stickstoff zu erreichen wird am Ende des Rohres ein Widerstand eingebaut. Aufgrund des Widerstands wird einiges Gas einen radialen Weg nehmen, anstatt der Richtung der Glasfibern linear zu folgen. Mit der richtigen Wahl der Fibern wird das Gas das einen radialen Weg nimmt sauerstoffreich und das Gas, welches am Ende des Rohrs ausströmt stickstoffreich sein. Das genaue Gemisch ist von dem Widerstand am Ende des Rohrs abhängig. Bei einem grossen Widerstand wird viel Gas auf der Seite der Membrane ausströmen, aber das Gas wird einen geringen Anteil an Sauerstoff enthalten. Ein geringer Widerstand am Ende des Rohrs wird zu einem verminderten Volumen das seitlich abströmt führen, aber in diesem Fall ist der Anteil an Sauerstoff höher. Die Trennung basiert auf den physikalischen Unterschieden von Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen.

Es muss eine grosse Menge Luft durch die Membrane gepumpt werden, um den Kompressor ausreichend zu versorgen und das Gemisch an Nitrox zu erhalten. Wenn ein Kompressor einen Fluss von 300 Litern Nitrox 36 am Einlass benötigen würde, dann müssten ungefähr 5 Mal mehr Luft durch die Membrane gepumpt werden (1.500 Liter pro Minute). Theoretisch könnte die Luft von einer Speicherbank versorgt werden, die vorher mit demselben Kompressor gefüllt wurde. Das ist aber leider keine gute Lösung. Wenn eine Membrane 5 Mal mehr Luft benötigt, als sie Nitrox liefern kann, würde der Kompressor 10 Minuten benötigen, um eine Flasche zu füllen und vorher 50 Minuten um die Speicherbank zu füllen. Danach würde der aktuelle Füllvorgang nochmals 10 Minuten dauern, also würde eine einzige Flasche 1 Stunde Arbeitszeit des Kompressors benötigen.

Um die Membrane ausreichend mit Luft zu versorgen, ist ein Niederdruck-Kompressor die einzige vernünftige Lösung. Die meisten Membranen arbeiten auf einem Druck zwischen 3 und 12 bar. Der Niederdruck-Kompressor sollte eine angemessene Leistung erbringen, um die Nachfrage der Membrane abdecken zu können. Diese Luft muss eine (sehr) gute Qualität haben. Wie vorher schon besprochen, der Widerstand am Ende der Membrane definiert die Menge an Gas die einen radialen Weg nimmt und die Membranröhre an der Seite verlässt. Jeder zusätzlicher Widerstand würde mehr Gas zur Seite abströmen lassen. Deswegen muss die Luft die in die Membrane geblasen wird frei von Verunreinigungen sein, welche die Passage zwischen den Glasfibern verstopfen könnten. Alle Luft, die in die Membrane geblasen wird muss ausreichend gefiltert sein, um sicher zu stellen, dass die Membrane für eine längere Zeit funktionstüchtig bleibt.



Wie viel Nitrox die Membrane produziert, hängt von dem eingestellten Gemisch ab. Das Maximum (nicht für die Membrane, aber für den Kompressor) ist EANx40. Sollte ein höheres Gemisch eingestellt werden, dann produziert die Membrane weniger Nitrox. Bei der Auswahl einer Membrane hängt die "richtige Grösse" also von dem Fluss bei dem höchsten Gemisch ab (EANx40). Bei niedrigeren Gemischen, wie z.B. EANx32 wird die Membrane ein grösseres Volumen produzieren. Der Kompressor wird nicht alles erzeugte Nitrox verwenden. Es gibt also noch eine zweite Stelle wo Gas das System verlässt. Jedes herge-

stellte Nitrox, das nicht in die erste Stufe des Kompressors gelangt, wird durch dieses Ventil verloren gehen (siehe Darstellung).

Wenn die gewählte Membrane nicht ausreichend Nitrox für die Nachfrage des Kompressors produziert, könnte der Kompressor Luft aus der Ölwanne ansaugen, weil das der Weg des geringsten Widerstands sein könnte. Die Konsequenzen dieses Problems haben wir bereits besprochen. Ein ähnliches (aber schwerwiegendes) Problem ist die Möglichkeit, dass der Niederdruck-Kompressor stoppt während die Membrane noch angeschlossen ist und der Hochdruck-Kompressor noch läuft. Wenn der Weg durch die Membrane die einzige Möglichkeit für das Gas darstellt zum Kompressor zu strömen, dann würde der Kompressor jetzt "kein Gas mehr anziehen" können.

Um Probleme mit Schläuchen oder mit der Membrane zu verhindern, muss die Anlage mit einem Sicherheitssystem ausgestattet sein. Das kann einfach ein Ventil sein, welches sich öffnet, wenn der Druck im Füllschlauch zur ersten Stufe unter den Umgebungsdruck fällt. Einige Hersteller benutzen allerdings eine elegantere Methode. Anstatt die gewünschte Mischung durch Änderung des Widerstands am Ende der Membrane zu erzeugen, wird systematisch Nitrox 40 hergestellt. Diese Mischung fliesst nicht direkt

zur ersten Stufe des Kompressors, sondern wird in einen Beimischer eingespritzt. Nitrox 40 nimmt deswegen den Platz des reinen Sauerstoffs ein der normalerweise in dieser Ausrüstung benutzt wird, aber der Rest des Ablaufs bleibt gleich. Sollte der Zufluss an Nitrox unterbrochen werden, dann saugt der Kompressor einfach nur normale Luft an.

Umgang mit Sauerstoffrisiken

Die Verantwortung von zertifizierten Gas Blendern ist die Vorbereitung des Kompressorsystems und der Tauchflaschen die in Kontakt mit einem erhöhten Sauerstoffgehalt kommen. Es besteht keine Absicht diese Zertifizierung mit der hier vermittelten Information zu ersetzen. Ein technischer Kurs über Kompressoren und Nitrox Anlagen ist aber unvollständig, wenn nicht die Grundlagen der Sicherheit im Umgang mit Sauerstoff abgedeckt werden. Dies wollen wir hiermit machen.

Der erste Schritt, um das Risiko einer Selbstentzündung im Kompressor zu minimieren ist die Wahl des Öls. Aufgrund der Schmierung von oben (die Schmierung im Kompressor von oben nach unten) kommt die Luft oder das Nitrox in Kontakt mit (geringen) Mengen an Öl. Je höher der Flammpunkt liegt, desto geringer ist das Risiko, dass Kohlenmonoxid während dem Füllvorgang entsteht. Der Flammpunkt der verschiedenen Marken und Typen von Ölen variiert. Für jeden Kompressor wird eine Liste mit verwendbaren Ölen mitgeliefert. Nicht alle Öle auf der Liste können benutzt werden. In den meisten Fällen werden unterschiedliche Öle für unterschiedliche Arbeitstemperaturen empfohlen. Für Kompressoren, die in den Tropen drehen werden andere Öltypen benutzt, als für Kompressoren die in gemässigten Klimazonen arbeiten, aufgrund der Viskosität des Öls bei unterschiedlichen Temperaturen. In den meisten Fällen ist ein synthetisches Öl am besten. Sollte der Kompressor bereits mit Mineralöl gelaufen sein, dann muss ein Fachmann befragt werden, welche notwendigen Schritte bei der Umstellung auf Synthetik Öl eingehalten werden müssen (anders herum ist es normalerweise kein Problem).

Mit einem erhöhten Risiko der Kohlenmonoxid Produktion wird empfohlen dem chemischen Filter Hopcalite beizumischen. Molekularsieb und Aktivkohle sind Standard Substanzen für Filter, Hopcalite aber nicht. Wenn dieses in den Filtervorgang eingefügt wird dann liefert es einen grossen Beitrag, um Probleme mit Kohlenmonoxid vorzubeugen.

Während dem Füllvorgang erhöht sich die Temperatur des Gases. Wie vorher besprochen, ist ein Kompressor so konzipiert, dass er einen Temperaturanstieg bis maximal 160°C toleriert und über eine angemessene Kühlung verfügt. Deswegen darf ein Kompressor nicht über seiner „Arbeitstemperatur“ benutzt werden und des Weiteren muss jegliche warme Luft effizient abgeführt werden. Sollte ein Kompressor die bereits von ihm erwärmte Luft wieder ansaugen, könnte ein Kreislauf entstehen, bei welchem sich die Luft immer weiter erwärmt. Trenne klar zwischen kalter Luft, die am Kompressor ankommt und erwärmter Luft, die vom Kompressor wegströmen muss.

Hitze bei der Kompression kann auch aufgrund einer zu schnellen Druckzunahme in einem Teil eines Rohrs/Schlauchs zustande kommen. Wenn ein Ventil zwischen einer Tauchflasche auf 200 bar und einem verschlossenen Rohr auf Umgebungsdruck zu schnell geöffnet wird, dann kann die Temperatur am Ende des Rohrs bis auf 800°C ansteigen. Um das zu schnelle Öffnen von Ventilen zu vermeiden, sind Kugelventile (Ventile, die sich mit einer Viertelumdrehung öffnen und schliessen) nicht empfohlen. Benutzer sollten Ventile immer langsam öffnen und das ist mit Kugelventilen so gut wie unmöglich. Eine andere Vorsichtsmassnahme ist, dem Druck zu erlauben irgendwohin zu entweichen. Öffne immer zuerst die zu füllende (leere) Flasche und danach erst die Speicherflasche. Und zu Letzt, um das Risiko einer Überhitzung zu vermeiden, sollten alle flexiblen Schläuche des Systems (z.B. die Schläuche an der Füllkonsole) mit einem Metallende von mindestens 15 cm Länge ausgestattet sein. Sollte ein Fehler passieren dann wird sich das Ende des Schlauchs erhitzen, was weniger schlimm ist, weil Metall so hohe Temperaturen toleriert.

Partikel im dem System könnten sich bei ausreichender Geschwindigkeit entzünden (ca. 46 Meter pro Sekunde). Solche Geschwindigkeiten entstehen normalerweise nur in Teilen wo eine Verengung des Rohrs ist. Bei kleinerem Durchmesser erhöht sich die Flussgeschwindigkeit. Um Probleme mit Partikeln zu vermeiden, sollte das System vor der Benutzung mit einem sauerstoffarmen oder einem inerten Gas durchgespült werden.

Der Zweck des Durchspülens ist es, alle Partikel aus dem System zu blasen. Das kann tatsächlich mit einem „inerten Gas“ wie Stickstoff gemacht werden, aber normalerweise reicht Luft dafür aus. Während der Herstellung des Systems könnten Metallteilchen oder andere Materialien in den Leitungen und anderen Teilen zurückbleiben. Diese werden beim Durchspülen (blasen) mit Gas bei einer hohen Geschwindigkeit entfernt. Es sollte auch verhindert werden, dass neue Partikel in das System gelangen. Aus diesem Grund sind Teile aus Titan und Aluminium nicht empfehlenswert. Die Korrosion dieser Metalle (z.B. Aluminiumoxid) ist nicht sehr fest an das Muttermaterial gebunden. Wenn Luft unter Hochdruck an einer Titan- oder Aluminiumoberfläche vorbeiströmt, dann wird es die Rostpartikel (Korrosion) mitnehmen.

Obwohl es unwahrscheinlich ist, könnte auch statische Aufladung (Elektrizität) ein Problem darstellen. Um eine statische Entladung zu vermeiden, reicht es aus, wenn der Metallrahmen des Kompressors eine gute Erdung z.B. an einer Wasserleitung oder der Heizung hat. Die „Standard“ Erdung des elektrischen Systems ist an die Maschine angeschlossen. Es könnte allerdings sein, dass die Verbindung zum Rest des Kompressors nicht ausreicht, um eine statische Aufladung zu verhindern.

Index

-A-

Abscheider.....	14
Aktivkohle	20
Atemluftqualität.....	18
Auslassventil	10
Aussenfüllstationen.....	25
Auswahl	35

-B-

Beimischgerät	43
Betriebstemperatur.....	26

-D-

Druckhalteventil	12
Druckschalter	28

-E-

Einlassventil	11
Einwegventil.....	31
Elektronische Filterüberwachung	25
EN 12021	18
Enddrucksicherheitsventil.....	6

-F-

Faltenschlauch.....	19
Feuer	39
Filter.....	19, 20
Filtergehäuse.....	21
Freiflugkolben.....	9
Füllen	33
Füllkonsolen	32

-H-

Hopcalite	20
-----------------	----

-K-

Kaskadensystem	28
Keilriemen	27
Kolben	4, 8
Kolbenringen.....	10
Kompressionsschritte	6
Kompressortyp.....	5
Konvektionskühlung.....	13

Kühlspirale	13, 26
Kurbelwelle.....	4

-L-

Logbuch	33
Luftfeuchtigkeit.....	7
Luftfilter	19

-M-

Magnetventil.....	15
Membran Systeme	45
Molekularsieb	20
Motor	26

-O-

Öldruckregulator	17
Öldunst.....	16
Ölpumpe.....	17
Oxidation.....	38

-P-

Partialdruckverfahren.....	40
Pleuel	4

-R-

Reparaturverfahren	2
--------------------------	---

-S-

Sauerstoffpartialdruck.....	38
Sauerstoffrisiken	47
Schleuderstift	16
Schmierung	16
Sicherheitsventil	15
Speicherbank.....	28
Stufenkolben.....	9

-T-

Treiberkolben	9
---------------------	---

-Z-

Zylinderkopf	10
--------------------	----