

Markus Voigt

Die Technik des Gase mischen



H₂

O₂

NITROX

Ne

He

HELIOX

TRIMIX

N₂

Hinweis:

Der Autor übernimmt keinerlei Haftung auf die in diesem Buch beschriebenen Verfahren und Arbeitsweisen. Dieses Buch ersetzt auch in keiner Weise eine praktische Ausbildung bei einer anerkannten Ausbildungsstätte. Das Mischen von Gasen ist bei falscher Anwendung überaus gefährlich und kann im Unglücksfall zu ernststen Verletzungen oder gar zum Tod führen.

Inhaltsverzeichnis:

Vorwort	6
Der "richtige" Weg zur Ausbildung	7
Mischen von Gasen	9
Tauchgase	10
Luft	10
Nitrox	10
Menox®	11
Sauerstoff	11
HeliAir	11
Heliox	11
TRIMIX	11
Neox	12
Hydreliox	12
Gase zum mischen	13
Luft	13
Sauerstoff O ₂	14
Stickstoff N ₂	14
Helium He	15
Neon Ne	15
Wasserstoff H ₂	15
Gasgesetze und Gaseigenschaften	16
Definition von Gas	16
Druck	16
Das Avogadro'sche Gesetz	16
Das ideale Gasgesetz	17
Boyle-Mariotte	17
Gay-Lussac	18
Die kinetische Gastheorie	18
Reale Gase	19
Partialdruck	20
Sauerstoff und seine Eigenschaften	21
Gefahren durch Sauerstoff	21
Verbrennungsgeschwindigkeit	21
Verbrennungstemperatur	21
Zündtemperatur	21
Feuerdreieck	21
Zündquellen	22
extern Hitze	22
Reibung	22
Kompression	22
Druckstoß	22
Funkenschlag	22
Spontanentzündung	23
Brennstoffe	23
Kompressorenöl	23
Fett/Silikon	23
Aktivkohle	23
Sauerstoff kann vielerlei reagieren	24
Umgang mit Sauerstoff	24
Allgemeiner Umgang mit Sauerstoff	24
Regelwerke für den Umgang mit Sauerstoff	24
Umgang mit Sauerstoffgeräten	25
Umgang mit Sauerstoffflaschen	25
Lagerung von Sauerstoff	26
Generelle Anforderungen	26
Lager in Räumen	27
Lager im Freien	28

Die Technik des Gase mischen

Schutzbereich	28
Anforderungen für Lager im Freien	28
Abmessungen des Schutzbereiches	28
Methoden der Gasmischung	29
Kontinuierliches Beimischen	29
Gravimetrie	30
Partialdruckmethode	31
Mischungsrechnung Partialdruck	32
Arbeitsanweisungen für Berechnungsblatt Mischgase	32
Korrekturen	36
Arbeitsanweisungen für Korrekturblatt	36
PREMIX Partialdruckmethode	41
Intelligentes Überströmen	41
MENOX-Membran	42
Funktionsweise der Membran:	42
Kombination verschiedener Mischmethoden	43
Welche Mischverfahren sind geeignet?	43
Sauerstoffrein und Sauerstoffkompatibel	44
Reinigung	44
Arbeitsplatz und Werkzeuge	44
Flaschenreinigung	45
Reinigungsvorgang	46
Reinigung von Ventile und Armaturen	47
Reinigungskontrolle	48
Allgemeine Regeln	49
Gase	49
Ausrüstung	49
Reinheit	49
Örtlichkeiten	49
Persönliche Ausstattung	49
Strömgeschwindigkeit	50
Ausrüstungsteile	51
Mischanlagen	51
Mischschlauch	51
Mischkoffer	51
Stationäres Füllpaneel	52
Computergestützte Systeme	52
MenoX Membran	52
Cont-Mix	53
Gravi-Mix	53
Individuelle Mischanlagen	53
Mischzubehör	53
Sauerstoffkompressoren	53
Kompressoren	54
Filter	54
Trocknergranulat	54
Aktivkohle	55
Manometer	55
Gas + Flaschen	56
Ventile	56
Rückschlagventile	56
Adapter	57
Schmiermittel	57
O-Ringe	57
Die Gasanalyse	59
Sauerstoffmessgeräte	59
Sauerstoffsensoren	59
Handhabung von Sauerstoffmessgeräten	60
Kalibrierung	60

Referenzgas	61
Dokumentation	61
Nachweise Mischgasherstellung	62
Praxis - Partialdruckmischen	63
Anschlüsse	63
Druckmessung	63
Füllbetrieb Gas (Sauerstoff, PREMIX, ect.):	64
Toppen:	64
Störungen	65
Anhang	66
Formellegende zum Mischgas berechnen	66
Umrechnungstabelle Druck	67
Umrechnungstabelle Volumen	67
Umrechnungstabelle Temperatur	67
Wichtige Einheiten und Abkürzungen	68
Nachweis Mischgasherstellung	69
Lagerbuch Gasflaschen	70
Neue Farbkennzeichnung von Gasflaschen	71

Vorwort

Die Erde ist mit einer "NITROX"-Atmosphäre, besser bekannt als Luft, ausgestattet. Diese von der Natur vorgegebene Mischung von Sauerstoff und Stickstoff ist leider kein ideales Gasgemisch zum Tauchen. Aus diesem Grund wurden schon Anfang des 20. Jahrhunderts Experimente mit Mischgasen durchgeführt. Über die Jahrzehnte hin entwickelten verschiedene Forscher in vielen Ländern Methoden zum sicheren Tauchen mit den unterschiedlichsten Gasen und Gasgemischen. Vor allem das Militär und die Industrie forschten und testeten, was heute auch der zivilen Nutzung zu gute kommt. Die Erfahrungen und der technische Fortschritt ermöglicht es uns heute mit relativ einfachen Mitteln Gase in jeder gewünschten Form herzustellen.

Anfang 1993 begann ich mich beruflich für das Gase mischen zu interessieren. Durch Ausbildungen und Schulungen im industriellen Bereich erlangte ich im Laufe der Jahre einen Kenntnisstand der es mir ermöglichte selbst Schüler im Gase mischen zu unterrichten. Leider fand ich keine Literatur in deutscher Sprache die meinen Wissensdurst befriedigen konnte. Auch die meisten Manuals von Tauchorganisationen waren eher dürftig oder nur für den amerikanischen Markt ausgelegt. Ende 1997 begann ich an diesem Buch zu arbeiten und hoffe ein leicht verständliches und umfangreiches Werk geschaffen zu haben. Aufgrund der sich ständig weiterentwickelnden Regelungen und technischen Neuerungen, versuche ich dieses Heft immer auf den neuesten Stand zu halten. In erster Linie ist diese Publikation als begleitendes und ergänzendes Informations- und Nachschlagwerk zu entsprechenden Seminaren im Bereich der Mischgasherstellung gedacht.

In diesem Sinne Viel Spaß beim Gase mischen,

Markus G. Voigt

Danke

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen, welche mich in den vergangenen Jahre, mit Rat und tat unterstützt haben, bedanken. Besonderer Dank gilt meinem einstigen Mentor, dem leider viel zu früh verstorbenen Dr. Bernd Aspacher, sowie Ralph Wilhelm für das Redigieren des Buches und den interessanten und praxisnahen Ausführungen.

Der Autor

Markus G. Voigt

Geboren 1964 in Offenbach am Main war er nach zwei gewerblich-technischen Ausbildungen erst mehrere Jahre als Rettungsassistent im Rettungsdienst tätig. Mitte der achtziger Jahre zum Tauchen gekommen hat er als intensiver Sporttaucher unzählige Tauchgänge in vielen Gewässern weltweit absolviert. 1992 kam er als Werbeleiter zum Kompressorenhersteller Mohnsam, wo er von 1994 bis 1997 auch als Vertriebsleiter tätig war. 1997 gründete er die KompTec GmbH die er bis zu seinem Ausscheiden 2003 erfolgreich führte. Seit 2003 ist er alleiniger Gesellschafter und Geschäftsführer der MaVoTec GmbH und führt auch dort den erfolgreichen Weg im Anlagenbau und der Kompressorenteknik fort.

Im Jahre 1993 begann er sich aus beruflichen Gründen mit dem Mischen von Gasen zu beschäftigen. Aufgrund seiner jahrelangen Erfahrung und bedingt durch die regelmäßigen Ausbildungen und Schulungen im industriellen Bereich, erlangte er im Laufe der Jahre einen Kenntnisstand der es ihm ermöglicht, selbst Schüler im Gase mischen auszubilden. Er half führend mit, in Deutschland die notwendige Ausrüstung für das Mischen von Gasen anzubieten. In diesem Zusammenhang war er auch an der Entwicklung und Einführung der ersten NITROX-Membrananlage in Europa im Jahre 1994 maßgeblich beteiligt. Bei mehreren großen Expeditionen legte er durch die entsprechende Fülllogistik die Basis für erfolgreiche Tauchgänge. Heute gilt er als führender Experte auf dem gebiet der Mischgasherstellung.

2004 gründete er die MaVoTec Akademie, deren Leiter er bis heute ist. Neben den vielen privaten Gas-Mischern (Gas Blender) die er bis heute ausgebildet hat, gelang es im die Basis für eine gewerblichen-technische Schulung zu schaffen, die in Industrie und Handwerk Anerkennung findet. Mittlerweile werden auch Instruktoren geschult, welche nach den Maßgaben der MaVoTec Akademie ausbilden dürfen.

Der "richtige" Weg zur Ausbildung

Bevor ich nun in die Welt des Gase mischen einsteige, möchte ich noch ein paar Worte zu dem "richtigen" Erlernen des Gase mischen verlieren. Der Umgang mit Gasen ist ein sehr heikles Thema. Bei falscher Vorgehensweise und unsachgemäßer Handhabung kann aus einem simplen Vorgang ein gefährliches Unterfangen werden. Die Gefahren aufzeigen und verhindern kann man nur wenn eine gute und umfangreiche Ausbildung stattgefunden hat. Dieses Buch soll bei einer solchen Ausbildung helfen und als Grundlage dienen.

In Deutschland und vielen anderen Ländern unterliegen das gewerbliche Mischen und die Abgabe von Gasgemischen an Dritte vielen Regeln und Vorschriften. Eine gute und ordentliche Ausbildung kann helfen den umfangreichen Ausbildungsstoff und die vielen Gesetze und Vorschriften zu Verstehen und die notwendigen Sicherheitsvorgaben in der Praxis sicher umzusetzen. Die geforderte Sachkunde erhält der Auszubildende nach erfolgreicher Prüfung am Ende einer Schulung. Allerdings nicht jeder kann und darf eine Sachkunde bescheinigen. In Deutschland sind nur anerkannte Ausbildungsbetriebe wie Meisterbetriebe (Handwerkskammer) oder Industriebetriebe mit zugelassenen Ausbilder (Industrie- und Handelskammer) für die gewerbliche Ausbildung zuständig. Um diesen gewerblichen Status entsprechend zu halten, sollten nur Ausbildungsbetriebe mit entsprechenden Referenzen gewählt werden.

Natürlich bieten auch viele Tauchsport- und Tec-Organisationen entsprechende Gasblender oder Mischkurse an, die vom Konzept und vom Wissenstand der gewerblichen Ausbildung gleichkommen. Diese Kurse eignen sich vor allem für die privaten Gasmischer und gelehrt von einem kompetenten Lehrer steht solch eine Ausbildung der gewerblichen in nichts nach.

Hüten sollte man sich allerdings vor so genannten Crash-Kursen. Der sichere und richtige Umgang mit Gasen ist nicht, begleitend, in einem NITROX- oder TRIMIX-Kurs nebenher zu erlernen. Die Vermittlung des notwendigen Fachwissens sowie einige praktische Übungen, die im Rahmen eines Grundkurses im Gase mischen notwendig sind, benötigen mindestens 8 Unterrichtsstunden. Wobei nicht die Zeit, sondern viel wichtiger der Umfang des zu vermittelnden Wissens im Vordergrund steht. Ein guter Ausbilder wird schließlich auch nach der absolvierten Schulung mit Rat und Tat seinen Schülern zur Verfügung stehen.

Mischen von Gasen

Die atembare Luft besteht aus mehreren Gaskomponenten, die sich unter Druck verändern. Was an der Wasseroberfläche für uns Menschen kein Problem darstellt, kann in einer gewissen Tiefe gefährlich oder gar giftig für den menschlichen Organismus sein. Das richtige Gemisch für die gewählte Tiefe ist der Schlüssel zum gesunden und sicheren Tauchen. Aus diesen Gründen werden synthetische Gase (dies sind alle in der zusammengesetzten Form künstlich hergestellten Gase) hergestellt.

Nicht jeder Taucher hat das "Glück" neben einem Gaslieferanten zu wohnen. Vielmals ist es so, dass man die gewünschten Tauchgemische bei seiner Tauchbasis/schule abholen kann oder selbst Hand anlegen muss. Einige Gaslieferanten bietet fertige NITROX Gemische an. Vorteil ist natürlich die einfache Handhabung. Hinfahren - Einladen - Wegfahren. Nachteil ist die Verfügbarkeit des gewünschten Gasmisches. Wartezeiten von mehreren Tagen und ein hoher Preis sind die Folge "spezieller" Wünsche. Tauchen gerade mit Mischgas lässt sich halt nicht problemlos standardisieren. Die Antwort für den NITROX / TRIMIX Taucher ist der Aufbau einer eigenen Fülllogistik, also das Selbermischen.

Neben einer fundierten Ausbildung ist auch die richtige Ausrüstung wichtig. Dann steht aber der eigenen Herstellung von Mischgasen nichts mehr im Weg und die Herstellung eignere Mischgase, welche auf den nächsten Tauchgang hin optimiert wurden (Tiefen- und/oder Dekogase) kann beginnen.

Tauchgase

Das ideale Tauchgas hat kurze Dekompressionszeiten und einen geringen Wärmeverlust beim Atmen, und eine gut verständliche Stimme (Unterwasserkommunikation). Da die Möglichkeiten der Gase meist nur einen Teil des Wünschenswerten erlauben, werden in verschiedenen Tiefen unterschiedliche Gase eingesetzt. Für tiefe Tauchgänge kann es sogar nötig sein während eines Tauchganges verschiedene Gase zu verwenden.

Luft und Nitrox sind die derzeit bekanntesten Tauchgase. Mit Luft wird schon seit jeher getaucht, es ist allerdings nicht das ideale Tauchgas. Nitrox und andere Gasgemische setzen sich in jüngster Zeit immer mehr durch, gerade weil diese Gasgemische für die entsprechenden Tauchtiefen geeigneter sind als Luft. Eins haben alle Tauchgase gemeinsam - SAUERSTOFF. Für das Tauchen ist wichtig, dass der Sauerstoffpartialdruck zwischen 0.16 und 1.6 bar liegt und die narkotische Wirkung der beigemischten Gase nicht stärker ist als bei einem Tauchgang mit Luft zwischen 40 und 50 Metern. Jedes beigemischte Gas, darf allerdings maximal bis zur Giftigkeitsgrenze zugeführt werden.

Luft

(O₂=21%, N₂=78%, Edelgase=1%)

Luft als Tauchgas ist weltweit erhältlich. Mittels eines Hochdruckkompressors wird die Luft auf 200 bzw. 300 bar verdichtet und in Tauchflaschen abgefüllt. Bei der Verdichtung der Luft wird größte Bedeutung auf die Reinigung der komprimierten Luft gelegt. In Europa sind die Werte in der DIN EN 12021 (ehemals DIN 3188) festgelegt.

Ab 66 Meter erreicht Luft einen Sauerstoffpartialdruck von 1.6 bar und wirkt schon ab einer Tiefe von 40 Metern narkotisch. Auch die Dekompressionspflicht steigt ab dieser Tiefe stark an. Als günstiges und einfach erhältliches Gas ist Luft für viele Standardtauchgänge ausreichend.

Nitrox

(O₂>21%, N₂<78%)

NITROX ist ein Kunstwort aus dem englischen **NITROGEN** und **OXYGEN**. Man bezeichnet so Sauerstoff / Stickstoffgemische oberhalb eines Sauerstoffanteils von 21 %. Streng genommen könnte man auch die Luft als ein NITROX Gemisch ansehen. Im Tauchsport haben sich NITROX 32 und NITROX 36 als Standard-Tauchgase durchgesetzt. Diese Gemische wurden 1978 von der National Oceanographic and Atmospheric Administration festgelegt. Diese Gemische nennt man auch NOAA Nitrox I (NNI) oder EAN32 oder NOAA Nitrox II (NNII) oder EAN36. Vorteile von NITROX sind vor allem die längeren Nullzeitgrenzen, die kürzeren Deko-Zeiten, die kürzeren Oberflächenpausen, deutlich mehr Sicherheit bei Verwendung von normalen Lufttabellen und ein "ermüdungsfreieres" Tauchen.

NITROX Gemische mit einem höheren Sauerstoffanteil werden meist zum Dekomprimieren oder für Rebreather verwendet.

Menox®

(O₂>21%, N₂<78%)

MENOX ist ein synthetisches Gas und wie NITROX ein Tauchgas welches aus den Hauptbestandteilen der Luft, nämlich Sauerstoff und Stickstoff besteht. Der Unterschied zwischen NITROX und MENOX besteht in der Herstellungsweise. MENOX wird ausschließlich durch Membransystemen, bei denen Stickstoff aus normaler Luft separiert wird, hergestellt.

Zusammengesetzt aus den Wörtern **MEMBRAN**, **NITROGEN** und **OXYGEN** ist auch MENOX ein aus dem Englischen abgeleitetes Kunstwort.

Sauerstoff

(O₂=100%)

Sauerstoff in seiner reinen Form wird gerne zum schnellen Entsättigen eingesetzt. Wegen der Gefahr der Sauerstoffvergiftung darf es jedoch nicht tiefer als 6m verwendet werden. Als Dekompressionsbeschleuniger geradezu ein "Muss" beim Trimixtauchen. Sauerstoff wird in geschlossenen Kreislaufgeräten eingesetzt und ist Pflicht zum behandeln der Dekompressionskrankheit.

HeliAir

(O₂<21%, O₂/N₂=1/4, He>17%)

HeliAir auch bekannt als Poor Man's Mix ist das so genannte "Arme Leute Gas". hergestellt wird es aus Helium und Atemluft. Da die Gemische nur für bestimmte Tauchgänge geeignet sind ist die Verwendung begrenzt. Genau genommen ist HeliAir schon ein TRIMIX.

Heliox

(O₂<21%, He>79%)

Heliox wurde schon 1919 von Elihu Thompson erfunden. Zur Vermeidung der Stickstoffnarkose ersetzte er Stickstoff durch Helium. Meist wird auch noch der Sauerstoffanteil reduziert, um so den kritischen Sauerstoffpartialdruck erst in größeren Tiefen zu erreichen. Dieses narkosefreie Gas ist aber nicht immer erste Wahl. Erstens sind die Kosten hoch, zweitens können sich die Dekompressionszeiten verlängern und drittens kann über 100 Meter HPNS (high pressure nervous syndrom) ein so genanntes Heliumzittern auftreten, was im schlimmsten Fall bis zu einem völligen Verlust der Kontrolle führen kann.

TRIMIX

(O₂<21%, He>17%, He-N₂>79%)

TRIMIX ist ein Tauchgas speziell für tiefere Tauchtiefen. Es ist ein Gemisch aus Sauerstoff, Stickstoff und meistens Helium. Sauerstoff und Stickstoff sind gegenüber dem Helium reduziert vorhanden und ermöglichen so die Umgehung der Sauerstoffvergiftung bzw. der Stickstoffnarkose. HPNS tritt erst jenseits von 150 Metern auf, das liegt daran, dass der Heliumpartialdruck geringer ist als bei der Verwendung von Heliox und das die aggressiv machende Wirkung des Heliums durch die narkotisierende Wirkung des Stickstoffes abgeschwächt wird.

Neox

(O₂<21%, Ne>79%)

Neox hat gegenüber allen anderen Gasgemischen zwei entscheidende Vorteile, erstens tritt bei extrem tiefen Tauchgängen kein HPNS auf und zweitens gibt es bei Neox keine Sprachverzerrungen wie bei den Gasen Trimix und Heliox, wodurch auch in großen Tiefen eine Sprachkommunikation möglich ist. Leider ist Neon sehr teuer und überdies für den Tauchsport noch sehr wenig erforscht.

Hydreliox

(O₂<4%, He, H)

Wasserstoff, Helium, Sauerstoff- Gemisch. Der Wasserstoff wird anstelle des Stickstoffes gesetzt und man kann extrem große Tiefen damit Tauchen. Nun neigt Wasserstoff dazu leicht zu explodieren und ist daher nur vom absoluten Fachmann einzusetzen.

Gase zum mischen

Natürlich vorhandene Gaskompositionen wie unsere Atemluft und Reinstgase wie Sauerstoff, Stickstoff, Helium u.s.w. sind die Grundkomponenten eines jeden Gasgemisches. Neben diesen Grundkomponenten hat jede Gasart ihre Qualität oder besser ausgedrückt ihre Reinheit. Meistens wird die Reinheit in zwei Ziffern angegeben z.B. 4.6 oder 5.0. Diese erste Ziffer gibt die Anzahl der 9er Stellen des Reinheitsgrades an und die zweite Ziffer die letzte Zahl der Reinheit. So bedeutet 4.6 eine 99.996%ige Reinheit. Auch ist die Feuchte ein Faktor der in den Qualitäten festgehalten ist. Meistens liegt er unter 5 ppm und wir können ihn als Faktor in unseren Mischvorhaben vernachlässigen.

Luft

Molekulargewicht(durchschnittlich)	28,84 kg/kmol
Gasdichte bei 20°C	1,293 g/l

Als Luft bezeichnet man das atmosphärisch vorhandene Gasgemisch auf unserer Erde. Sie besteht gewöhnlich aus.

Bestandteile	Volumen %	Bestandteile	Volumen %
Stickstoff	78,08	Kohlenstoffmonoxyd*	0,00001
Sauerstoff	20,95	Stickstoffmonoxyd*	0,00005
Argon	0,93	Wasserstoff*	0,00005
Kohlenstoffdioxid*	0,03	Ozon*	0,00004
Neon	0,0018	Xenon	0,000008
Helium	0,00052	Stickstoffdioxyd	0,0000001
Methan	0,00015	Jod	2-10 ⁻¹¹
Krypton	0,00011	Radon	6-10 ⁻¹⁸

* Gasanteile können variieren

Für die Verwendung zum Mischen mit anderen Gasen wie z.B. Sauerstoff benötigen wir eine hervorragende Qualität. Die meisten Atemluftkompressoren liefern eine Qualität die in der DIN 3188 vorgegeben ist. In dieser Atemluft können noch Ölkonzentrationen von <0,03 mg/m³ vorhanden sein. Für das Mischen mit Sauerstoff muss die Atemluft ölfrei, d.h. eine Ölkonzentration von <0,001 mg/m³ sein. Unter Verwendung eines zusätzlichen Reinigungsfilters (z.B. NITROX-Clean Filter von KompTec), wo die bereits verdichtete und gereinigte Luft nochmals gereinigt wird, erreichen wir eine Luftqualität die selbst schärfsten internationalen (Militär-) Normen entspricht. Die so aufgearbeitete Luft ist nun sauerstoffkompatibel.

Sauerstoff O₂

Molekulargewicht	32 kg/kmol
Gasdichte bei 20°C	1,265 g/l
Elektronegativität	EN 3.5
Siedepunkt bei 1,013 bar	-182,96 °C

Das Molekül (O₂) besteht aus zwei Atomen und hat ein Molekulgewicht von 32 kg/kmol. Die Elektronegativität beträgt EN 3.5 und aufgrund dieser ausgeprägten Elektronegativität gilt Sauerstoff als besonders reaktionsbereit. Sauerstoff ist gegenüber vielen anderen Stoffen sehr aggressiv. Bei der Reaktion mit Sauerstoff wird viel Energie freigesetzt. Sauerstoff ist in verschiedenen Qualitäten erhältlich. Die Gasfirmen vertreiben Schweiß-Sauerstoff, medizinischen Sauerstoff und Flieger-Sauerstoff. Mit Abstand am teuersten ist der hochreine Flieger-Sauerstoff. Verhältnismäßig günstig ist der medizinische Sauerstoff (2.5), der allerdings in Deutschland unter strengster Auslegung der Verordnungen, als Medikament gilt und somit nur vom Apotheker abgegeben werden dürfte. Letztendlich ist der günstigste Sauerstoff, der zum Schweißen. Die Qualität soll nicht so hoch wie bei dem med. Sauerstoff sein, wird aber oftmals aus der selben "Quelle" gezapft. Auch wenn der med. Sauerstoff mit dem zum Schweißen identisch wäre, sollte aus sicherheits-technischen Gründen auf die Verwendung von Schweißsauerstoff verzichtet werden. Die Flaschen für med. Sauerstoff müssen vor dem Füllen evakuiert und gespült werden, was bei Schweißsauerstoff nicht gemacht wird.

Stickstoff N₂

Molekulargewicht	28,01 kg/kmol
Gasdichte bei 20°C	1,168 g/l
Elektronegativität	EN 3.1
Siedepunkt bei 1,013 bar	-195,8 °C

Stickstoff ist ebenso wie Sauerstoff ein Element. Das Molekül (N₂) besteht ebenfalls aus zwei Atomen und hat ein Molekulgewicht von 28 kg/kmol. Die Elektronegativität beträgt EN 3.1 und liegt somit dicht bei Sauerstoff. Stickstoff verhält sich anders als Sauerstoff sehr neutral anderen Stoffen gegenüber und wird aus diesem Grund auch gerne zu Konservierungszwecken verwendet. Als reines Inertgas ist Stickstoff verhältnismäßig teuer. Da Stickstoff in unserer Atmosphäre mit 78% vorhanden ist, ist die Verwendung über die Luft nahe liegend.

Helium He

Molekulargewicht	4,0026 kg/kmol
Gasdichte bei 20°C	0,169 g/l
Siedepunkt bei 1,013 bar	-268,9°C

Auch Helium ist ein Element, allerdings reagiert und verbindet sich Helium unter normalen Umständen nicht mit anderen Elementen. Das Atomgewicht und das Molekulgewicht von Helium ist jeweils 4,0026 kg/kmol. Es ist ein Edelgas und inert. Auch Helium gibt es in verschiedenen Qualitäten. Das allseits bekannte Ballonhelium ist fast überall und relativ leicht zu erwerben. Leider reicht diese Qualität nicht für unsere Zwecke. Wir benötigen zum Herstellen von HELIOX oder TRIMIX mindestens eine Qualität von 4.6.

Neon Ne

Molekulargewicht	20,18 kg/kmol
Gasdichte bei 20°C	0,843 g/l
Siedepunkt bei 1,013 bar	-246,1°C

Neon ist ein chemisch inertes Edelgas. Das Molekulgewicht beträgt 20,179 kg/kmol. Neon gibt es in verschiedenen Qualitäten. Die Qualität 4.0 ist zum Tauchen ausreichend, da sie gegenüber höherwertigen (z.B. 4.8) nur mehr Heliumanteile ($\text{He} \leq 100$ vpm) enthält.

Wasserstoff H₂

Molekulargewicht	2,016 kg/kmol
Gasdichte bei 20°C	0,084 g/l
Siedepunkt bei 1,013 bar	-252,8°C
Flammpunkt in Luft (Vol.% in Luft)	4,0 bis 75,0

Etwas explosiver aber trotzdem gut zum Tauchen ist Wasserstoff. Es ist zwar ungiftig, farblos und geruchlos, aber schon bei 4-75,6 Vol.% in der Luft entzündlich. Das Molekulgewicht beträgt 2,0158 kg/kmol. Die Qualität 5.0 oder besser ist zum Tauchen geeignet.

Gasgesetze und Gaseigenschaften

Definition von Gas

Gase bestehen aus räumlich weit voneinander getrennten Molekülen oder Atomen in schneller Bewegung. Zwei (oder mehrere) beliebige Gase können in jedem Verhältnis völlig homogen vermischt werden (Diffusion). Ähnliches gilt nicht generell auch für Flüssigkeiten. Da zwischen den Molekülen eines Gases relativ große Zwischenräume bestehen, können die Moleküle eines zweiten Gases leicht dazwischen geschoben werden. Dasselbe passiert bei der Kompression eines Gases, nur werden hier die Moleküle durch Druck enger zusammen gebracht. Ein Gas füllt ein Gefäß immer vollständig aus.

Druck

Druck ist definiert als Kraft pro Fläche. In der Chemie ist der Atmosphärendruck eine wichtige Bezugsgröße.

Das Avogadrosche Gesetz

Schon 1808 konnten chemische Versuche nachweisen, dass die Volumina von Gasen, die bei Reaktionen verbraucht werden oder entstehen, in einem ganzzahligen Verhältnis zueinander stehen, sofern alle Volumina bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gemessen werden. Eine der untersuchten Reaktionen war die von Wasserstoffgas mit Chlorgas, bei der Chlorwasserstoffgas („gasförmige Salzsäure“) entsteht:

1 Vol. Wasserstoff + 1 Vol. Chlor --> 2 Volumen Chlorwasserstoff

Die Erklärung für diese Volumenverhältnisse wurde 1811 von Amedeo Avogadro gegeben. Nach dem Avogadro'schen Gesetz enthalten gleiche Volumina beliebiger Gase bei gleicher Temperatur und gleichem Druck die gleiche Anzahl von Molekülen.

Diese genaue Beziehung der Volumeneinheiten untereinander **gilt nur für Gase**.

Wenn gleiche Volumina zweier Gase bei gleicher Temperatur und gleichem Druck gleich viele Moleküle enthalten, dann gilt umgekehrt auch:

Eine gleich große Zahl von Molekülen zweier Gase beansprucht bei gleichem Druck und gleicher Temperatur das gleiche Volumen. Dies gilt unabhängig von der Art der Moleküle, weil sie räumlich so weit voneinander getrennt sind dass ihre Form und oder Größe vernachlässigbar ist.

Ein Mol eines Gases besteht aus $6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen (Avogadro'sche Zahl). Ein Mol eines Gases nimmt unter gleichen Druck-Temperatur-Bedingungen das gleiche Volumen wie ein beliebiges anderes Gas ein.

Unter Normalbedingungen (0°C und 1 atm) nimmt ein Mol eines Gases ein Volumen von 22,414 Litern ein.

Das ideale Gasgesetz

Ideales Gas ist eine Erfindung, um die Druck-Volumen-Temperatur-Abhängigkeiten bei Gasen beschreiben zu können. Bei Gase gibt es eine enge Beziehung zwischen den Größen Druck, Volumen und Temperatur und der Stoffmenge. Für ein Mol ideales Gas gilt der Zusammenhang:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Dabei ist:

p = Gasdruck

V = Gasvolumen

n = Molzahl (Stoffmenge)

R = allgemeine Gaskonstante = $8.31451 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

T = Temperatur in Kelvin

Die meisten Gase erfüllen unter gewöhnlichen Bedingungen recht gut die Gleichung. Ein hypothetisches Gas, das unter allen Bedingungen die Gleichung exakt erfüllt, nennt man ideales Gas. Die Gleichung wird deshalb ideales Gasgesetz genannt.

Leider sind die Voraussetzungen für ein ideales Gas in der Praxis nicht immer sehr gut erfüllt. Dies bedeutet, dass es beim realen Gas (z.B. Luft) mehr oder weniger große Unterschiede zu dem recht einfachen Verhalten gibt, das durch obige Gleichung angegeben wird.

Wenn ein Gas bei konstantem Druck erwärmt wird, dehnt es sich aus. Eine Temperaturerhöhung um 1°C bewirkt eine Ausdehnung um $1/273$ des Volumens, das bei 0°C eingenommen wird.

Völlig gleichartig ist auch die Abhängigkeit des Drucks, wenn die Temperatur erhöht wird. Für jedes $^\circ\text{C}$ Temperaturerhöhung steigt der Druck um $1/273$ des Druckes, der bei 0°C herrscht.

(Diese Beobachtungen nennt man die Gay-Lussacschen Gesetze)

Boyle-Mariotte

Das Gesetz von Boyle-Mariotte besagt, dass das Produkt aus Druck (p) und Volumen (V) einer abgeschlossenen Gasmenge bei gleich bleibender Temperatur konstant (k) ist.

$$p \cdot V = k$$

Voraussetzung ist:

- die Gasmenge darf sich nicht ändern, d.h. es darf kein Gas zugeführt oder entnommen
- ... und die Temperatur des Gases darf sich nicht ändern.

Gay-Lussac

Dieses Gesetz von Gay-Lussac ergänzt in gewisser Weise das von Boyle-Marotte und besagt, dass der Druck (p) einer abgeschlossenen Gasmenge bei konstantem Volumen proportional zu der Temperatur (T) des Gases ist.

$$p = \text{const.} \cdot T$$

Kombiniert man dies nun mit dem Gesetz von Boyle-Mariotte erhält man:

$$\frac{p \cdot V}{T} = k$$

Bei der Verwendung der Temperatureinheit darf nur die Kelvin Skala Anwendung finden.

Als praktisches Beispiel dient die bekannte Erwärmung von Tauchflaschen beim befüllen. Wer kennt nicht den „Druckverlust“ nach dem sich eine Tauchflasche nach dem befüllen abgekühlt hat?!

Eine 12 Liter Tauchflasche wird auf 221 bar gefüllt. Die Tauchflasche erwärmt sich während des Füllvorganges auf 318 Kelvin ($318 - 273 = 45^\circ\text{C}$) . Gelagert wird die Tauchflasche bei 288 Kelvin ($288 - 273 = 15^\circ\text{C}$). Welchen Druck ist in der Flasche nachdem sie abgekühlt ist?

$$\frac{P_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{P_2 \cdot V_2}{T_2}$$

$$P_2 = P_1 \times T_2 / T_1$$

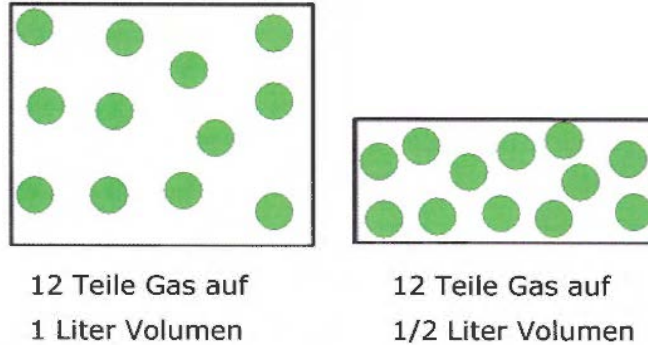
$$P_2 = (221 \times 288 / 318) \text{ bar} = 200 \text{ bar}$$

Die kinetische Gastheorie

Mit Hilfe der kinetischen Gastheorie können die bei Gasen herrschenden Gesetzmäßigkeiten erklärt werden. Sie basiert auf folgenden Postulaten:

- 1.) Gase bestehen aus Teilchen (Molekülen oder Atomen), die im Raum weit verteilt sind. Das Volumen der einzelnen Teilchen ist vernachlässigbar klein im Vergleich zum Gesamtvolumen.
- 2.) Die Teilchen im Gas befinden sich in ständiger, schneller und geradliniger Bewegung. Sie stoßen miteinander und mit der Gefäßwand zusammen. Bei den Stößen kann Energie von einem Teilchen auf ein anderes übertragen werden, aber insgesamt geht keine kinetische Energie verloren.
- 3) Die mittlere kinetische Energie („Geschwindigkeit der Teilchen“) hängt von der Temperatur ab; sie nimmt mit der Temperatur zu. Bei gegebener Temperatur ist die mittlere kinetische Energie für alle Gase die gleiche.
- 4.) Anziehungskräfte zwischen den Teilchen sind vernachlässigbar.

Die Gasgesetze können mit der kinetischen Theorie erklärt werden. Nach der Theorie kommt der Druck durch die ständigen Kollisionen der Teilchen mit der Gefäßwand zustande. Wenn die Zahl der Teilchen pro Volumeneinheit vergrößert wird, verursacht die vergrößerte Zahl von Kollisionen einen erhöhten Druck. Eine Verkleinerung des Volumens vermehrt die Zahl der Teilchen pro Volumeneinheit. Verkleinerung des Volumens bewirkt also eine Druckerhöhung.



Mit zunehmender Temperatur nehmen die mittlere kinetische Energie und damit die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen zu. Die Stöße gegen die Gefäßwände werden heftiger und häufiger. Als Konsequenz steigt der Druck mit der Temperatur.

Reale Gase

Das ideale Gasgesetz erfasst das Verhalten eines idealen Gases - ein Gas, das die Voraussetzungen der kinetischen Gastheorie erfüllt. Unter gewöhnlichen Druck- und Temperatur-Verhältnissen erfüllen reale Gase das ideale Gasgesetz recht gut, bei niedrigen Temperaturen und/oder hohen Drücken, jedoch nicht. Die Kurven realer Gase weichen von der Kurve eines idealen Gases, in den Grenzbereichen, deutlich ab.

Hierfür gibt es zwei Gründe:

Intermolekulare Anziehungskräfte:

Eine der Voraussetzungen der kinetischen Gastheorie ist das Fehlen von Anziehungskräften zwischen den Molekülen. Solche Anziehungskräfte müssen jedoch existieren, anderenfalls wäre es nicht möglich, Gase zu verflüssigen, denn intermolekulare Anziehungskräfte halten die Moleküle einer Flüssigkeit zusammen. Je höher der Druck ist, desto mehr rücken die Moleküle aneinander und desto stärker macht sich die intermolekulare Anziehungskraft bemerkbar.

Molekularvolumen:

Die kinetische Gastheorie geht von punktförmigen Molekülen aus, die keinen eigenen Raumbedarf haben. Dementsprechend ist nach dem idealen Gasgesetz das Volumen gleich Null, wenn beim absoluten Temperatur-Nullpunkt die molekulare Bewegung zum Stillstand gekommen ist. Die Moleküle realer Gase haben aber ein eigenes Volumen. Bei Druckerhöhung werden die Abstände zwischen den Molekülen verringert, aber die Moleküle selbst können nicht „zusammengequetscht“ werden.

Partialdruck

"Im Gemisch idealer Gase ist der Gesamtdruck gleich der Summe der Partialdrücke der einzelnen Gase - wobei jedes einzelne Gas sich so verhält, als ob es alleine das gesamte Volumen des Gemisches ausmachen würde."

DALTON

In einer Formel ausgedrückt:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Der Gesamtdruck an der Oberfläche (Meereshöhe) beträgt 1 bar

Der Partialdruck von Stickstoff ist 0,79 bar (gerundet - gleich dem Anteil in unserer Luft).

Der Partialdruck von Sauerstoff ist 0,21 bar (gerundet - gleich dem Anteil in unserer Luft).

Sauerstoff und seine Eigenschaften

Gefahren durch Sauerstoff

Sauerstoff ist ein farbloses, geruchloses, die Verbrennung förderndes Gas von großer Reaktionsfähigkeit. In jeder Gasmischung die wir verwenden bzw. herstellen wollen, gilt dem Sauerstoff unsere besondere Aufmerksamkeit. Zum einen ist der Sauerstoffanteil im Gasgemisch der wichtigste Parameter für den Tauchgang und zu anderen geht vom Sauerstoff bei der Herstellung unseres Mischgases eine besondere Gefahr aus.

Beim Umgang mit Sauerstoff besteht erhöhte Gefahr besonders:

- bei Sauerstoffanreicherung
- bei Sauerstoffminderung
- durch Missbrauch von Sauerstoff
- durch fehlende Wahrnehmbarkeit
- beim Umgang mit flüssigem Sauerstoff
- beim Umgang mit verdichtetem Sauerstoff

Werkstoffe, die in Luft nicht brennen, können sehr lebhaft oder sogar spontan in Sauerstoff oder sauerstoffangereicherter Luft brennen. Dies gilt bereits für eine Anreicherung um wenige Prozent.

Verbrennungsgeschwindigkeit

Bei erhöhtem Sauerstoffanteil steigt die Verbrennungsgeschwindigkeit. Aus einem Glimmbrand wird schnell zu einer lebhaften Flamme. Bei einem Baumwollfaden erhöht sich die Verbrennungsgeschwindigkeit

- bei 25 Vol.-% O₂ auf das Zweifache
- bei 30 Vol.-% O₂ auf das Achtfache

Verbrennungstemperatur

Auch die Verbrennungstemperatur steigt bei erhöhtem Sauerstoffanteil. Die Temperatur der Glut einer Zigarette ist

- bei 21 Vol.-% O₂ Anteil 780°C
- bei 30 Vol.-% O₂ Anteil 910°C
- bei 50 Vol.-% O₂ Anteil 1110°C

Zündtemperatur

Jeder Brennstoff hat seine Zündtemperatur, die sich bei erhöhtem Sauerstoffvorkommen reduziert. Baumwolle entzündet sich mittels eines Induktionsfunken wie folgt:

- bei 21 Vol.-% O₂ keine Zündung
- bei 25 Vol.-% O₂ nach 12 Sekunden
- bei 30 Vol.-% O₂ nach 5 Sekunden
- bei 45 Vol.-% O₂ nach 1 Sekunde

Bei 55 Vol.-% O₂ entflammt sich nach 1 Sekunde auch imprägnierte Baumwolle.

Feuerdreieck

Zusammen mit einem Brennstoff und einer Zündquelle können explosionsartige Reaktionen hervorgerufen werden. Insbesondere Öle und Fette können bei Kontakt mit Sauerstoff explosionsartig reagieren.

Die Reaktion lässt sich im **Feuerdreieck** gut darstellen:



Zündquellen

Damit Sauerstoff mit einem oder mehreren Brennstoffen reagieren kann, benötigt es immer eine Zündquelle. Diese Zündquelle kann viele verschiedene Ursachen haben. Nachfolgend sind die im Umgang beim Gase mischen am häufigsten auftretenden Ursachen.

extern Hitze

Externe Hitzequelle wie z.B. Sonneneinstrahlung auf Mischanlagen, ist selten die alleinige Ursache für die Entstehung einer Zündung. Häufiger wirken externe Hitzequellen in Verbindung mit anderen Ursachen wie Kompression, Reibung oder Druckstoß zusammen.

Reibung

Durch Reibung des Gases in Folge einer hohen Strömung und meist in Verbindung mit einem hohen Druck kann eine Entzündung auslösen.

Kompression

Durch die Kompression erhitzen sich die Gase. Die erreichte Temperatur hängt dabei von der Anfangstemperatur (siehe externe Hitze), von der Isolation, vom Kompressionsverhältnis und von der Kompressionsgeschwindigkeit ab.

In einem Kompressor herrschen hohe Temperaturen (Kompression, Reibung), hohe Verdichtungsverhältnisse und die Kompression erfolgt sehr schnell.

Druckstoß

Sauerstoff strömt, getrieben von bis zu 200 bzw. 300 bar, in einem Schlauch, Rohr oder Ventil gegen einen Widerstand (Winkel, Bourdon-Röhre eines Manometers, Ventil). Bei Aufprall auf den Widerstand komprimiert sich das Gas kurzzeitig sehr stark und erhitzt sich dabei. Der hier entstehende hohe Druck und die hieraus resultierenden hohen Temperaturen können zu einer Zündung führen.

Funkenschlag

Durch hohe Strömungsgeschwindigkeiten können Rostpartikel (z.B. Flaschenwand) aufgewirbelt oder harte Fremdkörper in eine Flasche eingblasen werden. Treffen diese auf Metall, so kann Funkenflug entstehen, der brennbares Material entzündet.

Elektrischer Funken

Eine elektrostatische Entladung oder anliegender Spannung kann ebenfalls zu einem Funken führen.

Spontanentzündung

Sehr selten aber dennoch erwähnenswert sind leicht entzündbare Kohlenwasserstoffe, die sich durch Zufall entzünden.

Brennstoffe

Als Brennstoff kann so ziemlich alles dienen. Als brennbar bis gut brennbar haben sich neben allen bekannten Brennstoffen auch Gummi, Baumwolle, Schmieröle (Kompressorenöle), Wolle und Silikonöle erwiesen.

Selbst Metall kann als Brennstoff dienen. Unter ungünstigen Voraussetzungen und dem Zusammenspiel von Sauerstoff und Zündung ist es schon häufig vorgekommen, dass auch Metalle verbrannt sind.

Am häufigsten finden wir aber folgende Brennstoffe:

Kompressorenöl

Das Öl befindet sich natürlich in erster Linie im Kompressor aber auch bei mangelnder Wartung der Filteranlage in Füllanlagen und in den Flaschen.

Es gibt einige wenige Kompressorenöle, die vom jeweiligen Hersteller für die Kompression von sauerstoffangereicherter Luft freigegeben werden. Die Grenzen liegen hier aber verhältnismäßig niedrig. Der Sauerstoffanteil sollte 40Vol.% nicht überschreiten und auch die Ölwechselintervalle verkürzen sich drastisch auf bis zu 1/10 der normalen Standzeit. Kompressorenöle die einen höheren Sauerstoffanteil vertragen oder gar bis zu 100% Sauerstoff komprimieren sind nicht verfügbar, bzw. zugelassen und extrem teuer.

Fett/Silikon

Silikonfett befindet sich im Flaschenventil und in der ersten Stufe von Lungenautomaten. Hier herrschen aufgrund der engen Querschnitte die schnellsten Strömungsgeschwindigkeiten und die Gefahr von Druckstößen.

Aktivkohle

Aktivkohle befindet sich in den Filtern der Kompressoren und besitzt aufgrund einer großen Oberfläche (porös) ein hohe 'Reaktionsbereitschaft'. Deshalb Rückschlagventile benutzen und nie Nitrox oder Sauerstoff durch hierfür nicht zugelassene Filter führen.

Dagegen sind spezielle Stoffe, wie sie zum Beispiel auch für Dichtungsringe (O-Ringe), aus FPM (VITON®) und einige PTFE-Verbindungen (Teflon) als selbst löschend zu bezeichnen.

Sauerstoff kann vielerlei reagieren

Eine weitere weitaus häufigere Sauerstoffreaktion ist uns aus dem Alltag bekannt - Rost. Hier reagiert der Sauerstoff mit entsprechenden Metallen und Wasser (Luftfeuchtigkeit). Auch Aluminium korrodiert mit Sauerstoff. Aluminium bildet eine Passivierungsschicht aus Aluminiumoxid, die weiteres Oxidieren unter heftiger Reaktion verhindert. Diese Schicht ist spröde und zerfällt bei mechanischer Beanspruchung (z.B. Flaschenfüllen) in ein weißes Pulver und kann z.B. einen Sinterfilter verstopfen.

Umgang mit Sauerstoff

Allgemeiner Umgang mit Sauerstoff

Nur geschulte oder eingewiesene Personen dürfen mit Sauerstoff umgehen.

Die missbräuchliche Verwendung von Sauerstoff, wie z.B. das Kühlen und Verbessern der Umgebungsluft, das Abkühlen und Abstauben, Abblasen von Personen, Kleidung, Einrichtungen usw. ist besonders gefährlich und daher verboten.

Beim Umgang mit Sauerstoff ist Rauchen und Hantieren mit Zündquellen und offenen Flammen verboten.

Nach einem Aufenthalt in möglicherweise sauerstoffangereicherter Atmosphäre ist die Kleidung sehr sorgfältig zu lüften, denn der Sauerstoff haftet sehr gut in der Kleidung. Eine Zündquelle, z.B. eine brennende Zigarette, könnte einen Kleiderbrand verursachen.

Die Betriebsanleitungen und Herstellerhinweise für die verwendeten Geräte sind zu beachten.

Nichtmetallische Werkstoffe dürfen im Hochdruckteil von Sauerstoffanlagen nur verwendet werden, wenn sie nachweislich eine Ausbrennprüfung mit Sauerstoff unter maximal auftretendem Betriebsdruck bestanden haben (BAM - Ausbrennprüfung).

Sauerstoff immer langsam strömen lassen! (max. 70 l/min.)

Der sichere Umgang mit Sauerstoff und die damit verbundene Vermeidung von Unfällen ist nur möglich, wenn die spezifischen Eigenschaften des Sauerstoffs bekannt sind und berücksichtigt werden.

Regelwerke für den Umgang mit Sauerstoff

In den letzten Jahren haben sich viele "Fachleute" mit dem Erklären von Grenzen und der Auslegung von Verordnungen und Gesetzen befasst. Viele Veröffentlichungen wurden allerdings falsch, bzw. aus dem eigentlichen Zusammenhang nur teilweise und damit nicht korrekt wiedergegeben. Als Stand der Technik und für den Gesetzgeber als Basis gelten folgende Regelwerke

- Unfallverhütungsvorschrift "Sauerstoff"
- Merkblatt "Umgang mit Sauerstoff"
- Merkheft "Gefahren durch Sauerstoff"
- Das Lagern von Gasflaschen (Druckgasbehältern) ist in den Techn. Regeln Druckgase TRG 280, geregelt

Die wohl wichtigsten Aussagen hieraus ergeben für den Umgang mit Sauerstoff folgende Grenzen:

70% Grenze

In der Unfallverhütungsvorschrift VBG 62 heißt es im § 2 Begriffsbestimmung

Sauerstoff im Sinne dieser Unfallverhütungsvorschrift umfasst

- reinen Sauerstoff
- alle Gemische aus Inertgas und Sauerstoff mit einem Volumenanteil an Sauerstoff von mehr als 70%, bezogen auf den gasförmigen Zustand.

40% Grenze

In den USA haben sich NAVY und NOAA aufgrund jahrzehntelanger Erfahrung auf diese Grenze festgelegt. Diese praktische Grenze besagt, dass Tauchausrüstungen keine besondere Behandlung bedürfen solange der Volumenanteil von 40Vol.% Sauerstoff nicht überschritten wird. Weltweit wird diese 40% Grenze anerkannt und genutzt soweit keine nationalen Beschränkungen oder Gesetze dagegen sprechen.

21% Grenze

Die Druckbehälterverordnung sagt eindeutig, dass Gase mit mehr als 21Vol.% Anteil Sauerstoff gekennzeichnet, gehandhabt und gelagert werden müssen wie reiner Sauerstoff. Im Merkblatt "Umgang mit Sauerstoff" der Berufsgenossenschaft Chemie wird EMPFOHLEN, für alle Gemische mit mehr als 21Vol.% Sauerstoff Schutzmaßnahmen nach der UVV Sauerstoff und dem Merkblatt festzulegen. Hier ist vor allem der Hersteller sowie der Betreiber von Anlagen gefragt.

Umgang mit Sauerstoffgeräten

Geräte, Armaturen und Ventile für Sauerstoff öl- und fettfrei halten und vor Verschmutzung schützen.

Öl und Fett niemals zum Schmieren von Teilen oder Anschlüssen von Flaschenventilen und Geräten für Sauerstoff verwenden.

Mit Öl und Fett verunreinigte Geräte und Einrichtungen für Sauerstoff sind unverzüglich mit geeigneten Lösemitteln zu entfetten.

Auf keinen Fall mit verschmutzten Händen, verschmutzten Handschuhen oder verschmutzten Tüchern Arbeiten an Sauerstoffgeräten oder Einrichtungen durchführen.

Herstellieranweisungen und Bedienungsanleitung, insbesondere Wartungsarbeiten unbedingt beachten und durchführen.

Umgang mit Sauerstoffflaschen

Sauerstoff darf aus den Flaschen nur mit für Sauerstoff zugelassenen, mängelfreier Armaturen und Abfülleinrichtungen (z.B. GasMix-Set) entnommen werden.

Beim Anschluss von Druckminderern und Armaturen nur zugelassene (Original-)Dichtungen und metallische Verbindungselemente verwenden.

Einstellbare Druckminderer müssen immer entlastet sein (Druckeinstellschraube ganz herausdrehen), bevor sie mit Drucksauerstoff beaufschlagt werden.

Die Ventile von Sauerstoffflaschen nur von Hand betätigen und nur langsam öffnen. Ventilöffnung und Handrad immer vom Körper weg gerichtet halten.

Kugelhahnventile sind im Umgang mit Sauerstoff gefährlich, da diese den Druck schlagartig freigeben.

Sauerstoffflaschen gegen Umfallen oder Herabfallen sichern (z.B. mit Ketten oder Bügeln).

Die Ventilanschlüsse müssen sauber gehalten werden.

Die Ventile und Armaturen an Sauerstoffflaschen sind öl- und fettfrei zu halten.

Flaschen nicht werfen.

Sauerstoffflaschen dürfen nicht mit brennbaren Stoffen zusammen gelagert werden. Lagerort gut durchlüften.

Sauerstoffflaschen vor gefährlicher Erwärmung (über 50 C) z.B. durch Heizkörper oder offene Flammen schützen.

Flaschen für medizinischen Sauerstoff dürfen nicht aus anderen Sauerstoffflaschen (auch wenn diese medizinischen Sauerstoff enthalten) befüllt werden; ausgenommen in zugelassenen Füllstellen.

Die Kennzeichnung an Sauerstoffflaschen (Prägung, Aufkleber, Farbmarkierung) nicht beschädigen, verändern oder beseitigen.

Sauerstoffflaschen mit Schäden (z.B. Ventil-, Brand-, mechanische Schäden) keinesfalls benutzen. Flaschen deutlich kennzeichnen und den Gaslieferanten informieren.

Die Ventile von Sauerstoffflaschen auch mit angeschlossenem Druckminderer und Fülleinrichtungen geschlossen halten, solange kein Sauerstoff entnommen wird.

Sauerstoffflaschen dürfen, außer bei Anwendung, nur mit zugelassenem Ventilschutz (z.B. Flaschenkappe) und mit ausreichender Sicherung gegen Verrutschen oder Umherrollen transportiert werden.

Lagerung von Sauerstoff

Nachstehend sind einige der wichtigsten Anforderungen für die Errichtung kleiner Gaseläger (maximal 50 Flaschen) für inerte, brandfördernde und brennbare Gase (z.B. Argon, Sauerstoff, Propan) aufgelistet.

Ein Gasflaschenlager ist ein festgelegter Ort, in dem ständig volle Gasflaschen im Vorrat gehalten werden bzw. leere Gasflaschen für den Abtransport gelagert werden.

Generelle Anforderungen

Das Lagerpersonal ist regelmäßig im Umgang mit Gasflaschen sowie über die Betriebsanweisungen gemäß der GefahrstoffV zu unterweisen

Für Unbefugte ist das Zugangsverbot durch Schilder anzuzeigen. z.B.:



Eine Gefährdung durch Fahrzeuge (z.B. durch einen Anfahrtschutz) ist auszuschließen.

Die Gasflaschen müssen auf ebenem Boden sicher stehen und sind gegen Umfallen zu sichern, z.B. Lagerung in Paletten, Aufstellen in Gruppen.

Die Ventile sind dicht zu schließen und die Flaschenkappen sind aufzuschrauben.

Zu Wärmequellen und Heizkörpern ist ein Mindestabstand von 0,5 m einzuhalten.

Ein Feuerlöscher und ein Telefon mit Angabe von Notfall-Rufnummern müssen leicht erreichbar sein.

In kritischen Bereichen, wie Treppenträumen, Fluren, Rettungswegen, Garagen, Durchgängen und Durchfahrten dürfen keine Lager errichtet werden.

Für Lagerräume unter Erdgleiche müssen Sonderregelungen (TRG 280) beachtet werden.

Bei brennbaren Gasen sind Schutzbereiche einzuhalten.

Das Umfüllen von Gasen sowie Reparaturarbeiten an Gasflaschen ist im Lager nicht zulässig.

Lager in Räumen

Ein Lager in Räumen ist in geschlossenen oder an einer Seite offenen Räumen

Die Wände angrenzender Gebäude und die Außenwände des Lagers müssen mindestens Feuer hemmend ausgeführt sein; die Dacheindeckung muss ausreichend widerstandsfähig gegen Flugfeuer und strahlende Wärme sein.

Der Fußbodenbelag muss schwer entflammbar sein.

In Lagerräumen dürfen sich keine Gruben, Kanäle oder Abflüsse zu Kanälen ohne Flüssigkeitsverschluss sowie keine Kellerzugänge oder sonstige offene Verbindungen zu Kellerräumen befinden. Ferner dürfen sich dort auch keine Reinigungs- oder andere Öffnungen von Schornsteinen befinden.

Ausreichende Be- und Entlüftung des Lagers ist zu gewährleisten (Lüftungsfläche mindestens 1 % der Bodenfläche).

In Lagerräumen dürfen keine sonstigen brennbaren Stoffe (z.B. brennbare Flüssigkeiten, Holz, Papier) gelagert werden. (Ausnahme: Bei Abtrennung mit einer Schutzmauer mit Höhe > 2m).

Lagerräume, in denen mehr als 25 gefüllte Gasflaschen gelagert werden, dürfen nicht unter oder über Räumen liegen, die dem dauernden Aufenthalt von Personen dienen.

Falls Wände eines Lagerraumes an einen öffentlichen Verkehrsweg angrenzen, dürfen diese Wände bis 2 m Höhe keine Türen und Fenster besitzen (außer selbst schließende und Feuer hemmende Türen).

Zwischen Gasflaschen mit brand fördernden und Gasflaschen mit brennbaren Gasen muss ein Abstand von mindestens 2 m eingehalten werden.

Lager im Freien

Als Lager im Freien gelten auch solche, die mindestens nach zwei Seiten offen sind, sowie solche, die nur an einer Seite offen sind, wenn die Tiefe - von der offenen Seite aus gemessen- nicht größer ist als die Höhe der offenen Seite.

Eine Seite des Raumes gilt auch dann als offen, wenn sie aus einem Drahtgitter oder dergleichen besteht.

Der Sicherheitsabstand zu benachbarten Anlagen, von denen eine Gefahr ausgehen kann (z.B. Lager mit brennbaren Stoffen), beträgt mindestens 5m; eine Schutzwand von 2m Höhe aus nicht brennbaren Baustoffen kann den Sicherheitsabstand ersetzen.

Schutzbereich

Auf die Schutzbereiche und die Ex-Gefährdung ist durch Warnschilder hinzuweisen.

Im Schutzbereich dürfen sich keine Zündquellen befinden.

Elektrische Anlagen müssen EX-geschützt gemäß Zone 2 ausgeführt sein.

Es dürfen nur die Fahrzeuge verkehren, die zum Betreiben des Lagers erforderlich sind.

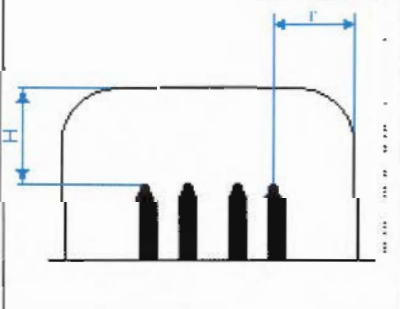
Der Schutzbereich darf sich nicht auf Nachbargebäude oder öffentliche Verkehrsflächen erstrecken.

Bei Räumen mit einer Grundfläche bis zu 20 m² ist der gesamte Raum Schutzbereich.

Anforderungen für Lager im Freien

Der Schutzbereich darf an höchstens zwei Seiten durch mind. 2 m hohe öffnungslose Schutzwände aus nicht brennbaren Baustoffen eingeeengt sein. Hierbei darf es sich an einer Seite auch um eine Gebäudemauer handeln, die im Schutzbereich öffnungslos sein muss.

Abmessungen des Schutzbereiches



	Lager in Räumen	Lager im Freien
	Sauerstoff	
Höhe h	2 m	1 m
Radius r	2 m	1 m

Methoden der Gasmischung

Es gibt einige Methoden um Gasgemische herzustellen. Die wichtigsten Verfahren werden nachfolgend beschrieben. Man unterscheidet die Verfahren generell nach:

- ☞ Volumen
- ☞ Gewicht
- ☞ Druck
- ☞ Separation

Kontinuierliches Beimischen

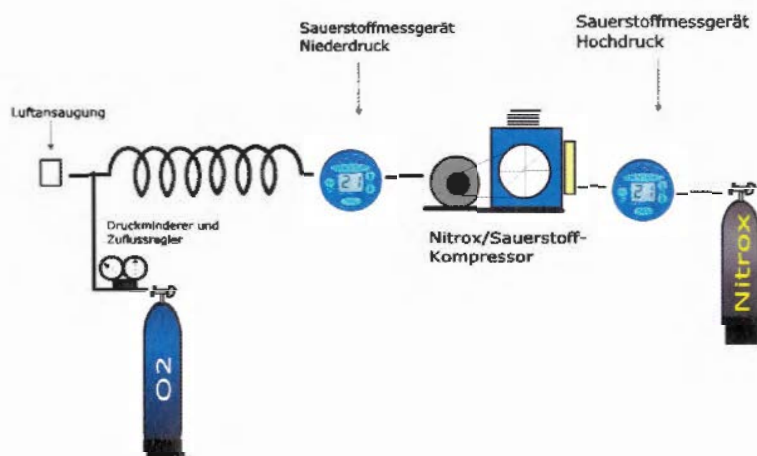
Volumenmischmethode

Auch Continuous Flow oder Continuous Blend genannt.

Luft und Sauerstoff werden in einem durch den Zuflussregler festgelegten Verhältnis gemeinsam angesaugt und vermischen sich in Mischspiralen zum gewünschten Nitroxgemisch. Üblicherweise wird bei diesem Verfahren ein Nitrox geeigneter Kompressor eingesetzt, wobei hier die Gasmischung maximal 40 Vol.% Sauerstoff enthalten darf. Die Gasmischung kann unter Verwendung eines Sauerstoffkompressors auch mehr als 40 Vol.% betragen.

Vorteil: man kann hochprozentige Nitroxgemische auf der Hochdruckseite vermeiden.

Nachteil: Verwendung von reinem Sauerstoff, teurer Kompressor



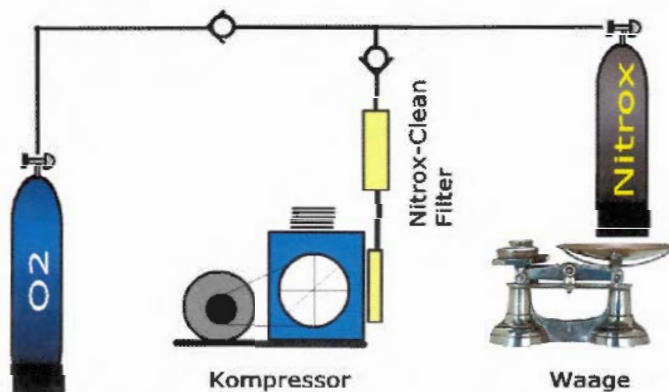
ACHTUNG! Einige Taucher betreiben das System des Beimischens mit einem normalen Hochdruckkompressor und dann noch ohne Zuflussregler direkt in die Ansaugung des Kompressors betrieben. Allein im Jahr 1997 sind mir zwei schwere Unfälle bekannt, bei denen ein normaler Hochdruckkompressor mit Sauerstoff beschickt wurde. Die Gefahr wird meist einfach ignoriert und die Tatsache das "noch nie" etwas passiert sei, entbehrt nicht des sehr hohen Risikos.

Gravimetrie

Gewichtsmischmethode

Eine sehr genaue Methode des Mischens.

Man füllt eine vorher berechnete Menge reinen Sauerstoff in die Flasche und füllt dann mit zusätzlich gereinigter Pressluft nach, um so in der Flasche das gewünschte Nitroxgemisch zu erhalten.



Es wird eine sehr genaue Waage ($\pm 1g$ bei 3 kg, evtl. mit Nullabgleich = Tara) benötigt. Beim Wiegen müssen wechselnde Kräfte von Füllschläuchen auf die Waage peinlichst vermieden werden. Der

Enddruck hängt von der Temperatur und der Flaschentoleranz ab. Die Vorteile dieser sehr genauen Methode sind auch, dass Temperaturunterschiede oder Dehnungsverhalten der Flasche keine Rolle spielen.

Molekulargewicht

Gas	Gramm/Liter	Gramm/Mol
Sauerstoff	1.333	31.9988
Stickstoff	1.167	28.0135
Helium	0.167	4,0026
Luft	1.207	~ 28.96

Berechnungsformel für gravimetrisches Mischen anhand eines Beispiels:

Legende siehe Anhang

Eine 15-Liter-Flasche soll mit Nitrox 32 auf 200 bar (3000 Liter) gefüllt werden.

$$L \cdot P = V$$

Der Sauerstoffanteil in der Zielflasche beträgt $(0,32 \cdot 200) = 64$ bar.

$$FO_2 \cdot P = ppO_2$$

Der Sauerstoffanteil multipliziert mit der Flaschengröße ergibt das benötigte Volumen, also 960 Liter Sauerstoff, in der Flasche.

$$ppO_2 \cdot V = pVO_2$$

Das Volumen Sauerstoff wird nun mit dem Sauerstoffgewicht (g/Liter) multipliziert und man erhält das Sauerstoffgewicht der Endmischung.

$$\rightarrow 960L \cdot 1.333g/L = 1279,7g \text{ Sauerstoff}$$

$$pVO_2 \cdot mO_2 = FmO_2$$

Nun subtrahiert man von dem Endvolumen (3000 Liter) das Sauerstoffvolumen ab und erhält somit den Stickstoffvolumenanteil.

$$V - pVO_2 = pVN_2$$

Diesen multipliziert man mit dem Stickstoffgewicht (g/Liter) und erhält das benötigte Stickstoffgewicht.

$$\rightarrow 2040L \cdot 1.167g/L = 2380,7g \text{ Stickstoff}$$

$$pVN_2 \cdot mN_2 = FmN_2$$

Bei Verwendung von Sauerstoff und Luft müssen die Sauerstoffanteile in der Luft mit berücksichtigt werden. Man rechnet nun weiter.

Der Stickstoffvolumenanteil (2040 l) wird nun dividiert durch 0,79 (Anteil des Stickstoffes in der Luft).

$$pVN_2 / 0,79 = pVL_{\text{uft}}$$

Das Ergebnis wird nun mit dem Luftgewicht (g/Liter) multipliziert und erhält das benötigte Luftgewicht.

$$\rightarrow 2582,3L \cdot 1,207g/L = 3116,8 g \text{ Luft}$$

$$pVL_{\text{uft}} \cdot mL_{\text{uft}} = FmL_{\text{uft}}$$

Nun subtrahiert man von dem Endvolumen (3000 Liter) das Luftvolumen (2582,3L) ab und erhält somit den Sauerstoffvolumenanteil.

$$V - pVL_{\text{uft}} = pVO_2 \text{ misch}$$

Diesen multipliziert man mit dem Sauerstoffgewicht (g/Liter) und erhält das benötigte Sauerstoffgewicht.

$$\rightarrow 417,7L \cdot 1.333g/L = 556,8g \text{ Sauerstoff}$$

$$pVO_2 \text{ misch} \cdot mO_2 = FmO_2$$

Partialdruckmethode

Druckmischmethode

Auch Partial Pressure genannt.

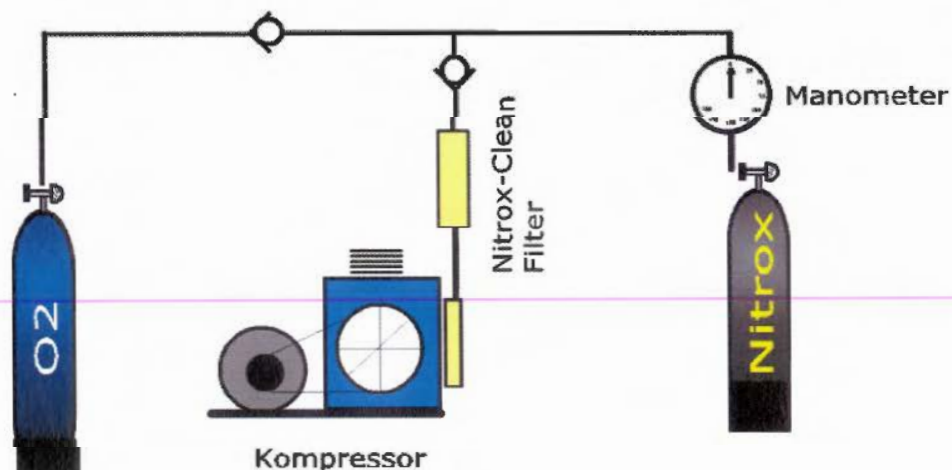
Wie bei der Gravimetrischen Methode wird das Gas in die Flaschen gefüllt. Nur dass die eingefüllte Gasmenge nicht über das Gasgewicht sondern über den Flaschendruck bestimmt wird.



Aufgrund der weltweiten Verbreitung der Partialdruckmethode wird diese Methode später noch eingehend erklärt.

Vorteil: sehr billige Methode, geringer Materialaufwand.

Nachteil: reiner Sauerstoff; Luft muss sehr rein sein, um Explosionen zu verhindern.



Mischungsrechnung Partialdruck

Vor dem Mischen von Gasen müssen zuerst die Werte zum Mischen der Gase ermittelt werden. Es gibt die unterschiedlichsten Formeln zum Erlangen des richtigen Gemisches. Die kompliziertesten Formeln berücksichtigen neben den Partialdrücken auch die Atmosphäre des Mischortes, die Temperatur der Gase und der Erwärmung beim Überströmen sowie den Zustand der Gase insbesondere der Feuchtigkeit, etc.

In der Praxis zeigt sich, dass die einfachste Berechnungsmethode auch gleich die richtige ist. Die Unterschiede zwischen den aufwendigen und den einfachen Formeln sind praktisch zu vernachlässigen und stellen keinen gravierenden Unterschied dar.

Eines sollte man nach Aussage aller Praktiker beachten, die richtig erlernte Mischmethode ist der Schlüssel zum konstanten Erfolg beim Gase mischen.

Für das Mischen mittels Partialdruck werden einige Formeln benötigt. Nun möchte ich hier kein Mathematik bzw. Physikstudium ersetzen. Mittels eines eigens hierfür entworfenen Formblattes ist das Berechnen von Mischgasen sehr einfach zu handhaben.

Achtung! Füllen von fremden Flaschen mit **unbekanntem** Inhalt sind nicht erlaubt und gefährlich (für den Nutzer). Solche Flaschen am besten komplett evakuieren.

Arbeitsanweisungen für Berechnungsblatt Mischgase

Formellegende siehe Anhang

Auf jedem Berechnungsblatt ist ein Identifikationsfenster in dem Sie zuerst Ihren Namen und das aktuelle Datum eintragen. Später sollte man (gerade bei Ungeübten!) sich die Rechnung noch mal von einer dritten Person Gegenrechnen lassen. Auch wenn es für die meisten unangenehm ist sich überprüfen zu lassen, aber lieber einmal zuviel kontrolliert als ein falsches (tödliches) Gas gemischt.

Berechnet von:	<u>Markus Voigt</u>
Kontrolliert von:	<u>Marc Alexander</u>
Datum:	<u>09.09.1999</u>

Damit wir und auch andere wissen was berechnet wird, geben Sie nun das gewünschte Zielgas (z.B. NITROX 36, HELIOX 10/90 oder TRIMIX 16/50/34) an.

ZIELGAS Trimix 12 O₂ / 55 He 200 bar

Nun tragen Sie den benötigten Enddruck (P_{end}) und die Gasanteile (FO_2 , FHe und FN_2) für das Zielgas ein und errechnen Sie die jeweiligen Partialdrücke (ppO_{2end} , pHe_{end} und pN_{2end}) für das Endgemisch.

$F_x \times P_{end} = pp_x$		
$FO_2 \times P_{end}$	=	ppO_{2end}
0,12 x .200		24 bar
$FHe \times P_{end}$	=	$ppHe_{end}$
0,55 x .200		110 bar
$FN_2 \times P_{end}$	=	ppN_{2end}
0,33 x .200		66 bar

Ermitteln sie das Restgas in der zu füllenden Flasche und tragen Sie die Bezeichnung bei RESTGAS ein. Analysieren Sie nun das Restgas in der zu füllenden Flasche. Tragen Sie nun die ermittelten Werte ein (P_{rest} , FO_{2rest} , FHe_{rest} und FN_{2rest}).

Berechnen Sie nun die Partialdrücke des Restgases (ppO_{2rest} , pHe_{rest} und pN_{2rest}).

RESTGAS Luft 21 O₂ / 79 N₂ 10 bar

$F_{xrest} \times P_{rest} = pp_{xrest}$		
$FO_{2rest} \times P_{rest}$	=	ppO_{2rest}
0,21 x .10		2,1 bar
$FHe_{rest} \times P_{rest}$	=	$ppHe_{rest}$
-----		----- bar
$FN_{2rest} \times P_{rest}$	=	ppN_{2rest}
0,79 x .10		7,9 bar

Übertragen Sie nun die errechneten Werte in den unteren Abschnitt des Formblattes und berechnen entsprechend der Formeln die benötigten Druckwerte für Luft ($PLuft$), Helium (PHe) und Sauerstoff (PO_2). Die Druckwerte geben Ihnen die Druckzunahmen für jedes Gas an, das der Flasche hinzugefügt werden muss.

MISCHEN der GASE

$ppN_{2end} - ppN_{2rest}$	=	ppN_{2misch}
66 - 7,9	=	58,1 bar

$ppN_{2misch} / 0.79$	=	$PL_{uft} = LUFT$
58,1 / 0.79	=	73,5 bar

Hinweis: Wenn die Werte pX_{misch} kleiner als 0 sind muß von dem Restgas etwas abgeströmt werden.

$ppHe_{end} - ppHe_{rest}$	=	$PHe = HELIUM$
110 - 0	=	110 bar

$ppO_{2end} - ppO_{2rest}$	=	ppO_{2misch}
24 - 2,1	=	21,9 bar

$P_{end} - P_{rest} - PL_{uft} - PHe$	=	$PO_2 = SAUERSTOFF$
200 - 10 - 73,5 - 110	=	6,5 bar

Die Werte PO_2 , PHe und PL_{uft} sind die benötigten Druckvolumen der entsprechenden Gase, die der Zielflasche zugeführt werden. Die Reihenfolge des Füllens ist immer **O2 - He - Luft**.

KONTROLLRECHNUNG

Anhand der folgenden Formel kann die Berechnung kontrolliert werden.

$$ppO_{2rest} + PO_2 + (PL_{uft} \times 0.21) = ppO_{2end}$$

Bei Berechnungen von nur zwei Gasen (NITROX, HELIOX) wird das dritte Gas auf dem Berechnungsblatt **NICHT** berücksichtigt!

Wichtiger Hinweis!

Die Verwendung der Berechnungsblätter bedarf umfangreicher Sachkunde. Diese Sachkunde kann nur in einem entsprechenden Lehrgang vermittelt werden. Die Verwendung dieser Blätter geschieht auf eigene Gefahr und unter Ausschluss jeder Gewährleistung seitens des Autors und des Herausgebers.

MaVoTec

Berechnungsblatt Mischgase

Berechnet von: _____
 Kontrolliert von: _____
 Datum: _____

ZIELGAS

Hier berechnen Sie das gewünschte Gas. Stellen Sie zuerst die gewünschten Gasanteile ($F =$ Fraktion) des Zielgases fest und tragen diese in Nebenstehende Berechnungsformel ein.
 z.B. $FO_2 =$ Sauerstoffanteil. P_{end} steht für den Enddruck des Zielgases. Errechnet wird so der Partialdruck in bar der benötigten Gasbestandteile.

$F_x \times P_{end} = p_x$	
$FO_2 \times P_{end}$	ppO_{2end}
x	bar
$FHe \times P_{end}$	$ppHe_{end}$
x	bar
$FN_2 \times P_{end}$	ppN_{2end}
x	bar

RESTGAS

Hier berechnen Sie das eventuell vorhandene Restgas. Stellen Sie zuerst die gewünschten Gasanteile ($F =$ Fraktion) des Restgases fest und tragen diese in Nebenstehende Berechnungsformel ein.
 z.B. $FHe_{rest} =$ rest Heliumanteil. P_{rest} steht für den Restdruck in der Zielflasche. Errechnet wird so der Partialdruck in bar der vorhandenen Gasbestandteile in der

$F_{xrest} \times P_{rest} = p_{xrest}$	
$FO_{2rest} \times P_{rest}$	ppO_{2rest}
x	bar
$FHe_{rest} \times P_{rest}$	$ppHe_{rest}$
x	bar
$FN_{2rest} \times P_{rest}$	ppN_{2rest}
x	bar

MISCHEN der GASE

$ppN_{2end} - ppN_{2rest}$	ppN_{2misch}	$/ 0.79$	$PL_{uft} = LUFT$
-	bar	$/ 0.79$	bar
Hinweis: Wenn die Werte ppX_{misch} kleiner als 0 sind muss von dem Restgas etwas abgeströmt werden. Zur Berechnung verwenden Sie bitte das Berechnungsblatt			
$ppO_{2end} - ppO_{2rest}$	ppO_{2misch}	$P_{end} - P_{rest} - PL_{uft} - PHe$	$PO_2 = SAUERSTOFF$
-	bar	-	bar

- Die Werte PO_2 , PHe und PL_{uft} sind die benötigten Druckvolumen der entsprechenden Gase, die der Zielflasche zugeführt werden. Die Reihenfolge des Füllens ist immer **O₂ - He - Luft**.

KONTROLLRECHNUNG

Anhand der folgenden Formel kann die Berechnung kontrolliert werden.

$$ppO_{2rest} + PO_2 + (PL_{uft} \times 0.21) = ppO_{2end}$$

Korrekturen

Selbst dem geübten Gasmischer kann es passieren, dass eine Gasmischung nicht mit dem gewünschten Ergebnis übereinstimmt. Nun hat man die Möglichkeit die gesamte Gasmischung zu verwerfen und von vorne zu beginnen oder das Ergebnis zu korrigieren. Die sicherste Art ist die des Neubeginns.

Aufgrund der Kosten, von der Arbeit einmal abgesehen, möchten die meisten Gasmischer das vorhandene Gemisch behalten und entsprechend korrigieren. Allerdings ist die Korrektur nicht immer möglich. Ist zum Beispiel eine Trimix Mischung aus drei einzelnen Gasen hergestellt worden (Sauerstoff, Stickstoff und Helium), so ist eine Korrektur nicht zu empfehlen, da in der Regel die Analyse des Gasgemisches über den Sauerstoffgehalt erfolgt und wir nicht mit Sicherheit sagen können ob der Stickstoff oder das Helium für die falsche Mischung verantwortlich waren. Bei Verwendung nur zweier Gase wie Helium und Luft oder Sauerstoff und Luft oder auch Helium und Nitrox, können wir aufgrund der vorgegebenen Bestandteile der Luft, bzw. des Nitrox eine Korrektur sicher berechnen. Voraussetzung ist jedoch die EINDEUTIGE Identifikation der verwendeten Gase!

Das Berechnen von Korrekturen bedarf einiger Übung. Ziel einer Korrektur ist es nur einen bestimmten Teil der "falschen" Mischung abzulassen und mit einem der verwendeten Originalgase wieder auf den ursprünglichen Druck auf zu toppen.

Achtung! Bei unbekanntem oder nicht genau definiertem Flascheninhalt, verwerfen Sie den gesamten Flascheninhalt und füllen Sie neu! Dies ist sicherer und schützt Ihre Gesundheit!

Arbeitsanweisungen für Korrekturblatt

Formellegende siehe Anhang

Erst einmal werden die zum Mischen des Gasgemisches eingesetzten Gase eindeutig identifiziert. Wir unterscheiden in Gas A und Gas B.

Gas A ist Luft oder NITROX. Gas B ist Helium oder Sauerstoff

Soll ein Nitrox-Gemisch korrigiert werden, ist Gas B immer Sauerstoff.

Ist das zu korrigierende Gemisch TRIMIX, ist Gas B Helium.

Diese Feststellungen sind für die spätere Berechnung sehr wichtig.

Kann auch nur ein Gas nicht 100% identifiziert werden, so ist eine Korrektur NICHT möglich!

Wie im Berechnungsblatt auch füllen wir zuerst den Kopf aus.

Berechnet von:	<u>Marc Alexander</u>
Kontrolliert von:	<u>Christina</u>
Datum:	<u>09.09.1999</u>

Hier wird das gewünschte Gasgemisch eingetragen.

ZIELGAS NITROX 36 200 bar

Nun notieren wir die bekannten, bzw. die analysierten Werte.

Gewünschter Enddruck:

P_{end}
200 bar

gemessener tatsächlicher Sauerstoffanteil im Gasgemisch

FO_{2mess}
0.40

gewünschter Sauerstoffanteil im Zielgas

FO_{2end}
0.36

gewünschter Stickstoffanteil im Zielgas

FN_{2end}
0.64

Sauerstoffanteil des für die Mischung verwendete Gases A (Luft oder Nitrox)

$FO_2 A$
0.21

Stickstoffanteil des für die Mischung verwendeten Gases A

$FN_2 A$
0.79

Jetzt berechnen wir den aktuellen Stickstoffanteil des Gases B im "falschen" Gemisch. Ist das Gas B Helium (ist bei Trimix der Fall) verwenden wir folgende Formel:

$FO_{2mess} \times FN_2 A / FO_2 A = FN_{2akt}$

Ist das Gas B Sauerstoff (ist bei NITROX der Fall) verwenden wir folgende Formel:

$$1 - FO_{2\text{mess}} = FN_{2\text{akt}}$$
$$1 - 0.40 = 0.60$$

Nun berechnen wir Schritt für Schritt die Gasanteile und Drücke

aktueller Anteil Gas A

$$FN_{2\text{akt}} / FN_{2\text{A}} = FG_{\text{akt A}}$$
$$0.6 / 0.79 = 0.76$$

aktueller Anteil Gas B

$$1 - FG_{\text{akt A}} = FG_{\text{akt B}}$$
$$1 - 0.76 = 0.24$$

gewünschter Anteil Gas A

$$FN_{2\text{end}} / FN_{2\text{A}} = FG_{\text{end A}}$$
$$0.64 / 0.79 = 0.81$$

gewünschter Anteil Gas B

$$1 - FG_{\text{end A}} = FG_{\text{end B}}$$
$$1 - 0.81 = 0.19$$

aktueller Druck Gas A

$$P_{\text{end}} \times FG_{\text{akt A}} = pp_{\text{akt A}}$$
$$200 \times 0.76 = 152$$

aktueller Druck Gas B

$$P_{\text{end}} \times FG_{\text{akt B}} = pp_{\text{akt B}}$$
$$200 \times 0.24 = 48$$

gewünschter Druck Gas A

$$P_{\text{end}} \times FG_{\text{end A}} = pp_{\text{end A}}$$
$$200 \times 0.81 = 162$$

gewünschter Druck Gas B

$$P_{\text{end}} \times FG_{\text{end}} B = pp_{\text{end}} B$$

$$200 \times 0.19 = 38$$

Jetzt subtrahieren wir den aktuellen Partialdruck vom gewünschten Partialdruck des Gases und erhalten den benötigten Differenzdruck des jeweiligen Gasteiles.

Differenzdruck Gas A

$$pp_{\text{akt}} A - pp_{\text{end}} A = pp_{\text{red}} A$$

$$152 - 162 = -10$$

Differenzdruck Gas B

$$pp_{\text{akt}} B - pp_{\text{end}} B = pp_{\text{red}} B$$

$$48 - 38 = 10$$

Berechnet werden beide Gase (A+B). Berücksichtigt wird nur das Gas, welches im positiven Bereich ist. zum Erreichen der gewünschten Endmischung.

War der Differenzdruck des Gases A positiv, verwenden wir diese Formel zum Ermitteln des abzulassenden Druckes aus der Zielflasche,

$$pp_{\text{red}} A / FG_{\text{akt}} A = P_{\text{red}}$$

War der Differenzdruck des Gases B positiv, verwenden wir diese Formel zum Ermitteln des abzulassenden Druckes aus der Zielflasche,

$$pp_{\text{red}} B / FG_{\text{akt}} B = P_{\text{red}}$$

$$10 / 0.24 = 41.66$$

Zum Überprüfen verwenden wir folgende Rechnungen:

$$(P_{\text{end}} - P_{\text{red}}) \times FG_{\text{akt}} A = pp_{\text{rest}} \text{ Gas A}$$

$$(200 - 41.66) \times 0.76 =$$

$$120,34$$

$$(P_{\text{end}} - P_{\text{red}}) \times FG_{\text{akt B}} = p_{\text{rest Gas B}}$$

$$(200 - 41.66) \times 0.24 = 38$$

Mit folgender Rechnung ermitteln wir das zum auftopfen benötigte Gas und die benötigte Gasmenge in bar.

$$p_{\text{end A}} - p_{\text{rest A}} = P_{\text{misch Gas A}}$$

$$162 - 120,34 = 41.66$$

$$p_{\text{end B}} - p_{\text{rest B}} = P_{\text{misch Gas B}}$$

$$38 - 38 = 0$$

Der Wert $P_{\text{misch Gas A}}$ oder $P_{\text{misch Gas B}}$ muss annähernd Null ergeben (Rundungstoleranz). Der andere Wert sollte gleich P_{red} sein und zeigt gleichfalls das hinzuzufügende Gas mit dem entsprechenden Druck an.

PREMIX Partialdruckmethode

Wie Partialdruckmethode, nur dass jetzt statt reinem Sauerstoff ein PREMIX (z.B. NITROX 40) verwendet wird. Das PREMIX wird von einigen Gaslieferanten angeboten.

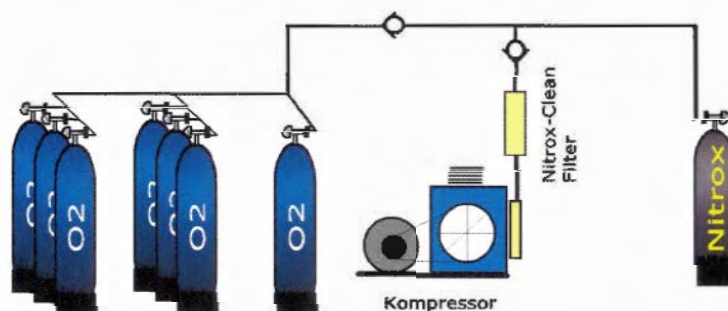
Vorteil: man kann hohe Sauerstoffkonzentrationen vermeiden

Nachteil: teures PREMIX, man kann keine Gemische erzeugen, die höherprozentig sind als das PREMIX.

Intelligentes Überströmen

Auch Kaskaden-Mischen genannt.

Eine praktische Umsetzung der Partialdruckmethode. Es werden mehrere Speicherflaschen vorrätig gehalten und entsprechend der Gasmischung (PREMIX oder Sauerstoff) für das Überströmen verwendet.



Beispiel: Zur Herstellung von Nitrox-36, wird in leere 15-Liter-Flaschen Sauerstoff übergeströmt. Nach der

Partialdruckrechnung werden hierfür 720 Liter Sauerstoff (= 48 bar in der Zielflasche) benötigt. Dieser Vorgang lässt sich (unteroptimalen Bedingungen) insgesamt 13-mal wiederholen. Beim 14ten Überströmen kann der benötigte Enddruck nicht erreicht werden und der Druck balanciert sich auf 33,85 bar aus. Damit der Restdruck nicht verworfen werden muss, kann eine zweite "volle" Sauerstoffflasche nun den benötigten Druck auffüllen. Dieses ausbalancieren kann man nun noch zweimal wiederholen, bis die Mutterflasche 20 bar Restdruck anzeigt.

Der Vorteil des Kaskadenfüllens zeigt sich gerade bei höheren Drücken und Qualitäten (z.B. für Deko-Gase).

Der Verbrauch der Flaschen lässt sich wie folgt berechnen:

$$V_1 = P_1 \cdot L_1$$

$$V_2 = P_2 \cdot L_2$$

$$L_{\text{end}} = V_1 - V_2$$

$$P_{\text{end}} = V_{\text{end}} / L_1$$

1 = Speicherflasche

2 = Zielflasche

Vorteil: Schnelle und einfache Methode. Bei Verwendung von PREMIX kein Umgang mit Sauerstoff.

Nachteil: Großer Materialaufwand. Bei Verwendung von reinem Sauerstoff muss die Luft sehr rein sein, um Explosionen zu verhindern. Rechenaufwand!

MENOX-Membran

Separations- Methode

Die Separationsmethode ist schon seit vielen Jahren bekannt und wird vor allem im industriellen Bereich zur Stickstoff-Herstellung eingesetzt. In jüngster Zeit wurden die eingesetzten Membranen qualitativ derart weiterentwickelt, dass auch der Einsatz und die Nutzung des bisher als Nebenprodukt entstandenen MenoX (industriell auch als Permeat bekannt) interessant wurde. Allerdings stellt der hohe Anschaffungspreis für viele ein Hindernis dar und in erster Linie größere Tauchbasen und Füllstationen können sich eine MenoX-Membran leisten. Mittelfristig ist die Nutzung einer Membran ab einem Flaschenumsatz von mindestens 500 Flaschen im Jahr lohnenswert.

Funktionsweise der Membran:



In die MENOX-Membran wird saubere Pressluft (Speicherbank mit Druckminderer oder

Niederdruckkompressor) zwischen 3 - 10 bar Druck gespeist. Aufgrund von spezifischen Eigenschaften diffundiert der Sauerstoff schneller durch die Hohlmembranfaser als der Stickstoff. Dadurch kommt es außerhalb der Membranfaser zu einer Sauerstoffanreicherung, während sich innerhalb der Hohlmembranfaser der Stickstoff anreichert. Durch das geregelte Ablassen des inneren Gasgemisches lässt sich ein stationärer Zustand erreichen, bei dem sich die Gasgemische nicht mehr ändern. Das Menoxgemisch kann nun mit einem modifizierten Hochdruckkompressor komprimiert werden.

Vorteil: kein reiner Sauerstoff, keine hohen Sauerstoffkonzentrationen, kein Gaskauf.

Kombination verschiedener Mischmethoden

Die effektivste Form des Gase mischens ist die Kombination verschiedener Mischmethoden. Die Vorteile des Partialdruckmischens mit der MenoX-Membran kombiniert ergibt ein absolut unabhängiges System mit nahezu unbegrenzter Kapazität. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten ist diese Form eher für professionelle Füllstationen zu empfehlen.

Welche Mischverfahren sind geeignet?

In Deutschland und Europa gibt es eine Reihe von Gesetzen und Vorschriften, die den Umgang mit Gasen regeln. Die Unfallverhütungsvorschriften, die Druckbehälterverordnung, die Technischen Regeln Gase und viele weitere Regelwerke. Das sicherste Verfahren zum Herstellen von Nitrox ist klar die MenoX-Membran. Der Umgang mit reinem Sauerstoff ist ausgeschlossen und die meisten Hochdruckkompressoren lassen sich mit einfachen Mitteln für den Einsatz mit der MenoX-Membran umrüsten.

Das bekannteste Verfahren ist die Partialdruck Methode. Es ist unter Berücksichtigung aller Vorsichtsmaßnahmen einfach anzuwenden und in der Anschaffung vergleichsweise billig.

Die Partialdruck Methode mit dem intelligenten Überströmen ist sehr effektiv. Nachteil der Partialdruck Methoden ist immer der Umgang mit reinem Sauerstoff. Die Verwendung von PREMIX ist zurzeit noch sehr teuer.

Die genaueste Methode ist die Gravimetrische, dicht gefolgt von der Membran-Methode. Allerdings sind beide Methoden mit hohen Anschaffungskosten verbunden und eignen sich eher für entsprechende Tauchbasen.

Das kontinuierliche Beimischen ist zurzeit weniger verbreitet und aus Sicherheitsgründen nur mit (teuren) aufwendigen Anlagen einsetzbar.

Sauerstoffrein und Sauerstoffkompatibel

Unter Sauerstoffrein versteht man die absolute Sauberkeit eines Systems oder einer Komponente. Es dürfen keinerlei Verunreinigungen vorhanden sein, man spricht auch von „metallisch rein“. Sauerstoffrein können auch Materialien und Oberflächen sein, die selbst mit Sauerstoff reagieren !

Sauerstoffkompatibel sind Ausrüstung und Materialien, die sich mit Sauerstoff auch unter Druck und Temperatur vertragen.

Reinigung



Natürlich wollen wir alle unsere Ausrüstungsgegenstände für Sauerstoff einsatzfähig, sprich „metallisch rein“ machen. Am besten geschieht dies mit einem speziellen Reiniger auf alkalischer Basis. Die Verwendung von sauren Reinigern oder gar speziellen chemischen Mitteln (TRI, ACETON oder dergleichen) ergeben auch ganz brauchbare Ergebnisse, sind aber bei weitem nicht so effektiv und unbedenklich wie allgemein angenommen. Gerade lösungsmittelhaltige Reiniger bergen die Gefahr der Kontaminierung der zu reinigenden Oberfläche. Substanzen können sogar in die Metalloberfläche (gerade bei Stahlflaschen) eindiffundieren und später bei Gebrauch wieder in die Umgebung abgegeben werden. Die meisten flüchtigen Mittel (z.B. Alkohol, Waschbenzin) entfernen sehr gut die Öle und Fette, verdünnen aber auch einen Teil und hinterlassen nach dem verflüchtigen Spuren der vorher aufgelösten Verunreinigung. Für die Reinigung von Komponenten hat sich DIVE Clean von KompTec hervorragend bewährt. Aufgrund der hervorragenden Ergebnisse setze ich den Reiniger nicht nur im Tauchbereich sondern auch zu Hause in der Küche und sonst allen erdenklichen Reinigungsarbeiten ein.

Arbeitsplatz und Werkzeuge

Das Reinigen von Flaschen und Armaturen benötigt ausreichend Platz sowie einen Kalt- und Warmwasseranschluss mit einem entsprechenden Abfluss. Da es sehr schwierig ist den Arbeitsplatz während des Reinigens (insbesondere bei Flaschen) trocken zu halten, sollte der Arbeitsplatz natürlich auch entsprechend gestaltet sein (Fliesen, abwaschbare Wände, etc.) Eine Küche mag zwar überall Verfügbar sein, aber garantiert kein idealer Arbeitsplatz zum Reinigen unserer Armaturen und Flaschen.

Folgende Einrichtungsmerkmale, Werkzeuge und Zubehöre gehören zum Reinigen:

- Wasseranschluss mit einem Schlauchanschluss.
- ein ausreichend langer, sauberer Schlauch
- zwei 20 l Eimer
- Messbecher
- Einweg-Latexhandschuhe, ungepudert
- eine (Zahn-)bürste (Schmutzseite)
- eine (Zahn-)bürste (saubere Seite)
- eine Flaschenbürste (Babyflaschen, Industriebedarf)
- ein Borstenpinsel
- Pfeifenreiniger

- kleiner Schraubenzieher
- Holzstäbchen
- Rolliergerät
- Flaschenlampe mit Spiegel
- Druckluft mit sauberer Luft (am besten Tauchflasche mit Druckminderer und Luftpistole)
- Trockengebläse mit Heizung und Stabaufsatz
- fusselfreie Tücher, Papiertücher
- Küchenschwamm (OHNE Reinigungsmittel)
- Ultraschallgerät
- Reiniger (Dive-Clean)
- Rolliergranulat (bitte nur Glas-Strahlperlen / Glas-Korund verwenden)
- Tank Protect

Flaschenreinigung

Das Reinigen von Flaschen ist komplizierter als man denkt. Es genügt nicht einfach einen Reiniger in die Flasche zu füllen und diesen einfach „wirken“ zu lassen. Feste Verunreinigungen, Rost, Ölablagerungen, usw. lassen sich nicht so einfach entfernen.

Beim Flaschenreinigen gehen wir wie folgt vor:

Zuerst bereiten wir den Arbeitsplatz vor. Dieser sollte natürlich auch sauber sein. Alle benötigten Materialien stellen wir bereit.

Die zu reinigende Flasche ist nun mittels Flaschenlampe zu inspizieren. Wir unterscheiden in verschiedenen Verschmutzungsgrade:

1. leicht Verschmutzt - leichte Ablagerungen, Flugrost und / oder Feuchtigkeit ist zu erkennen.
2. mittlere Verschmutzung - Ablagerungen / Öl ist gut zu erkennen. Flugrost und vereinzelt "blühende" Roststellen sind sichtbar. Flasche ist innen Nass.
3. starke Verschmutzung - Ablagerungen / Öl sind deutlich zu erkennen und bedecken mehr als ein Drittel der Flasche. Starker Rost ist über große Flächen der Flasche verteilt. Nach dem öffnen wurde mehr als ein Schnapsglas Wasser entsorgt.
4. Sanierungsbedürftig - Ablagerungen und Öl sieht man nicht nur sondern rücht man auch sehr deutlich (stark muffig). Es ist keine freie Stelle OHNE Rost sichtbar bzw. starker Rostfraß ist vorhanden.

Die Kriterien lassen sich auch auf Aluminiumflaschen übertragen. Lediglich anstelle von Rost ist weißes Aluminiumoxyd sichtbar.

In den Fällen 1 und 2 ist eine Reinigung durch uns problemlos möglich. Im 3. Fall kann eine mehrfache Wiederholung des Reinigungsvorganges nötig sein um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Und im 4. Fall ist die Flasche von einer Fachfirma reinigen zu lassen und vom TÜV prüfen zu lassen.

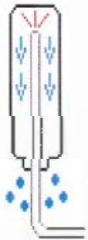
Reinigungsvorgang

Roll-Reinigung



Sehr effektiver wird mit der Roll-Reinigung gereinigt.

- In die Flasche kommt ca. 1 -2 Kilo Glas-Korund (gereinigte Kieselsteine gehören auf einen Gehweg und Glasscherben gehören auf den Müll oder ins Recycling aber Bitte NICHT in eine Flasche).
- Nun wird die Flasche bis zu einem Drittel mit heißer (55 - 65°C) DIVE-Clean Lösung (Mischungsverhältnis des Herstellers beachten) gefüllt.
- Die Öffnung wird verschlossen (mit Verschlusschraube M25x2) und die Flasche wird je nach Verschmutzungsgrad 5-15 min „rolliert“.
- Danach wird die Flasche geöffnet und die Dive-Clean Lösung wird durch ein Sieb geschüttet (um das Glas-Korund aufzufangen).
- Mittels Bürste (Schmutzseite) Gewinde reinigen.
- Flasche auf den Kopf stellen und mittels Schlauch und warmen Wasser restliches Glas-Korund ausspülen.
- Die Flasche wird nun gründlich mit heißem Wasser gespült.
- Beim letzten Spülvorgang wird eine Lösung mit Tank-Protect (von KompTec) zugeführt. Tank-Protect dient ausschließlich dem Kurzzeit-Korrosionsschutz und verhindert während der Trocknung das Bilden von Flugrost. Die Tank-Protect-Lösung ist übrigens mehrfach verwendbar.
- Jetzt wird die Flasche mit dem Hals nach untergestellt, so dass das Wasser gut abfließen kann.
- In die Flasche wird nun die Stablanze des Heißluftgebläses gesteckt. Die Lanze muss bis kurz vor den Flaschenboden reichen, damit die feuchte Luft nach unten aus der Flasche gedrückt wird.
- Ist kein Heißluftgebläse vorhanden, kann man auch mit sauberer Druckluft (am Besten aus einer Tauchflasche mit Druckminderer) und einer entsprechenden Druckluftpistole mit Lanzenaufsatz, arbeiten. Normale Niederdruckkompressoren dürfen nur mit nachgesetztem Kältetrockner und Filteranlage verwendet werden um eine erneute Verunreinigung zu verhindern.
- Zum Schluss wird die Flasche wieder inspiziert. Die Flasche muss innen absolut trocken, sauber und blank sein. Sind noch Verunreinigungen sichtbar, muss der ganze Reinigungsvorgang wiederholt werden.
- Flaschen mittels Sauberen Stopfen verschließen oder unverzüglich das Ventil montieren.



Anstelle der Rollier-Reinigung bietet sich auch die Reinigung mittels einer Druckluft-Reinigungspistole an.

Mittels einfacher Druckluft (3-4 bar) wird DIVE-Clean über die Reinigungspistole direkt in die Flasche gesprüht. Der extra lange Reinigungsschlauch bringt den Sprühstrahl unmittelbar an die zu reinigende Stelle.

Reinigung von Ventile und Armaturen

Das Reinigen von Flaschenventilen oder sonstigen Armaturen bedarf einer ebensolcher gründlichen Sorgfalt wie die des Flaschenreinigens. Wir gehen hier wie folgt vor:

- Zuerst zerlegen wir das Ventil in alle Teile.
- Fett, Öl und andere Schmierstoffe werden zuerst mit einem Papiertuch entfernt. Fest haftende Verschmutzungen mit einem Holzstäbchen oder sehr vorsichtig (ohne die Oberfläche des Teiles zu Beschädigen) mittels Schraubenzieher entfernen.
- Silikonfette müssen mit einem speziellen Silikon-Entferner beseitigt werden. Ansonsten können trotz intensiver Reinigung Rückstände haften bleiben!
- Die Teile legen wir nun in eine warme 10%ige Dive-Clean Lösung und reinige in der Lösung sie mit einer Bürste und einem Schwamm.
- Sind auf den Teilen (meist bei gebrauchten Ventilen, etc.) Kalkreste und Verkrustungen vorhanden werden diese am einfachsten im Ultraschallbad mit einer Essiglösung aufgeweicht und entfernt.
- Alle Teile werden dann im Ultraschallbad mit einer 10%igen Dive-Clean-Lösung 15 min gereinigt.
- Damit ich die Teile durch das weitere hantieren nicht wieder kontaminiere, ziehe ich nun Latexhandschuhe an.
- Die Teile werden nun nochmals mit einer sauberen Lösung gespült.
- Zum entfernen der Reinigerflüssigkeit spüle ich einfache Teile intensiv mit fließendem heißen Wasser ab. Komplizierte Teile wässere und spüle ich mehrmals in immer frischem heißem Wasser.
- Während des Spülens mit Wasser begutachte ich das Teil. Perlt an der Oberfläche das Wasser (bildet Tropfen) ab, so ist das Teil noch verunreinigt und muss wiederholt gereinigt werden. Lläuft das Wasser ab (ohne Tropfen zu bilden).
- Die Teile breite ich nun einzeln auf einem Papiertuch (fusselfrei) aus und trockne sie ebenfalls mit einem Papiertuch ab. An schwer zugänglichen Stellen setze ich saubere, ölfreie Druckluft ein um Wasser weg zu blasen.
- Nicht sauerstoffkompatible Teile werden durch kompatible ersetzen.
- Und letztendlich werden die Teile unter Verwendung von zugelassenem Gleitmittel wieder zusammensetzen.

Nach der Reinigung müssen alle Teile sofort in sauberer Umgebung montieren oder sauber und dicht Verpackt werden

Reinigungskontrolle

Die Kontrolle der gereinigten Teile muss in jedem Fall erfolgen. Für die Kontrolle muss der Arbeitsplatz absolut sauber und genügend beleuchtet sein. Es gibt eine Reihe von einfachen Möglichkeiten Kohlenwasserstoffe "sichtbar" zu machen. Nachfolgende Kontrollen sollten jeder Reinigung folgen:

- Eine Sichtprüfung mit hellem, weißem Licht (Tages- oder Kunstlicht). Fremdstoffe und -teilchen dürfen nicht mehr sichtbar sein.
- Eine Sichtprüfung mit ultraviolettem Licht. Starkes Fluoreszieren darf nicht feststellbar sein. ACHTUNG!! Öle und Fette pflanzlicher, tierischer und synthetischer Herkunft fluoreszieren nicht wie die Kohlenwasserstoffe mineralischer Herkunft. Auch bei Mineralölen ist die Fluoreszenz unterschiedlich.
- Die Wischprobe mit einem nichtfaserndem Tuch oder Papier. Nach kräftigem Wischen erfolgt die Prüfung am Tuch oder Papier nach einem der beiden erstgenannten Verfahren.
- Dem Wasserbenetzungstest. Auf einer horizontalen Oberfläche wird destilliertes Wasser aufgesprüht. Bei öl- und fettfreier Oberfläche bildet sich für Sekunden ein ungebrochener Wasserfilm aus. Bei Gegenwart von Öl und Fett bilden sich schnell wasserfreie Inseln (Tropfen, Perlen).

Folgende Nachweisgrenzen für Öl- und Fettrestgehalte für die einzelnen Prüfverfahren sind bekannt:

Prüfverfahren	Nachweisgrenzen in mg/m ²
Helles, weißes Licht	ca. 900 - 1700
Ultraviolettes Licht	ca. 40-1500
Wischprobe	ca. 30-600
Wasserbenetzungstest	ca. 30-60

Die erreichbaren Werte sind von der Art des Öles abhängig. Für Anlagenteile im Sauerstoffeinsatz sollte ab 30 bar die Kontaminationsgrenze von 200 mg/m² nicht überschritten werden.

Allgemeine Regeln

Wie mischen wir nun die Gase richtig? Jedes Gas hat seine Eigenschaften. Beim Vermischen von zwei oder mehreren Gasgemischen müssen wir immer die Eigenschaften des Gases welches am ehesten reagieren kann berücksichtigen. Da wir meistens mit Sauerstoff arbeiten sollten wir die Eigenschaften dieses Gases als Standard ansehen und alle Vorkehrungen gemäß diesem Gas auslegen. Die Beugung oder Vernachlässigung auch nur eines kleinen Teils der Vorschriften und Regeln, kann starke Schäden, lebensgefährliche oder gar tödliche Verletzungen nach sich ziehen.

Gase

Alle verwendeten Gase müssen vor dem Mischen eindeutig identifiziert werden und entsprechend analysiert sein (Sauerstoffkonzentration!). Der Umgang mit den Gasen insbesondere des Sauerstoffes ist im Kapitel "Umgang mit Sauerstoff" bestens beschrieben.

Ausrüstung

Es dürfen für die Verdichtung von NITROX oder Sauerstoff nur dafür zugelassene Kompressoren verwendet werden. Generell dürfen nur zugelassene Einrichtungen und Materialien zum Mischen verwendet werden.

Reinheit

Alle Gase müssen sauerstoffkompatibel und entsprechend gereinigt sein. Ebenso dürfen nur kompatible und reine Ausrüstungsgegenstände verwendet werden. Es dürfen keinerlei Schmier- oder Fettstoffe verwendet werden. Anlagen, insbesondere die Anschlüsse, Gasleitungen und -schläuche sind absolut sauber zu halten. Die Verwendung von Sauerstoffgleitmittel ist nur an den hierfür zugelassenen Stellen erlaubt.

Örtlichkeiten

Die Örtlichkeiten zum Füllen müssen geeignet und sicher sein. Beim Umgang mit Sauerstoff und Kompressoren muss die Gefährdung Dritter ausgeschlossen sein. Auch soll der Füllort gut belüftet und über ausreichend Fluchtwege verfügen. Der Keller eines Mietshauses ist sicherlich der falsche Raum zum Gase mischen. Auch dürfen keine leicht entzündliche Stoffe oder offene Flammen vorhanden sein. Im Zweifelsfall ist immer ein Fachmann zu konsultieren. Die Hersteller der Gasmisch-Anlagen sowie die Fachleute der Gasfirmen stehen hier sicherlich mit Rat und Tat ihren Kunden zur Seite.

Persönliche Ausstattung

Penibel achten wir auf die Reinheit der Anlage. Aber wie steht es letztendlich mit dem Bediener? Selbstverständlich sollte auch auf die

persönliche Reinheit geachtet werden. Mit schmutzigen, ölverschmierten Händen oder mit Hähnchen-Fettfinger sollte nicht an einer Anlage gearbeitet werden. Beim Reinigen und Warten von Anlagen werden oftmals Einweghandschuhe aus Latex verwendet um die erforderliche Reinheit zu gewährleisten.

Geeignete Schutzkleidung insbesondere beim Umgang mit Sauerstoff ist anzulegen. Hier reicht eine luftige Arbeitsbekleidung aus. Gerade nach dem Umgang mit Sauerstoff sollte die Kleidung so gewählt sein, dass sie schnell und einfach durchgelüftet werden kann und so eine Sauerstoffkonzentration in der Bekleidung verhindert wird. Dies ist übrigens nicht so Übertrieben wie es auf den ersten Blick scheint. Gerade für Raucher die ihre Zigarette danach (nach vollendeter Arbeit!) anzünden, kann es LEBENSWICHTIG sein auf gut gelüftete Kleidung zu achten.

Beispiel:

Zünden sie ein Stück Baumwolle an. Es wird nicht brennen, sondern nur glimmen. Wenn das Stück Baumwolle vorher mit Sauerstoff kontaminiert wurde brennt es hingegen sehr schnell.

Beim Mischen von Gasen besteht natürlich generell ein absolutes Rauchverbot sowie kein Umgang mit offenem Feuer.

Alkohol und Gase mischen sind auch zwei Sachen die sich nicht miteinander vertragen. Es gilt ein Alkoholverbot und alkoholisierte Personen dürfen nicht an Gasmischanlagen arbeiten.

Selbstverständlich darf nur ausgebildetes Personal mischen. (Vorschriften der UVV und der TRG beachten).

Strömungsgeschwindigkeit

Beim Überströmen von Gasen muss besonders auf die Strömungsgeschwindigkeit geachtet werden. Eine zu hohe Strömungsgeschwindigkeit birgt die Gefahr der Sauerstoffreaktion durch starke Erwärmung und einer Druckstoßreaktion.

Generell soll die Strömungsgeschwindigkeit der Gase aus Speicherflaschen nicht höher als **70 Liter** in der Minute betragen. Am einfachsten kann man dies durch die Druckerhöhung kontrollieren.

$70 \text{ l in der Minute} / \text{Flaschengröße} = \text{Druckerhöhung in bar pro Minute.}$
Bei einer 10 Liter Flasche wäre die maximale Druckerhöhung also $70 / 10 = 7 \text{ bar in der Minute}$

Bei Kompressoren ist die Strömungsgeschwindigkeit durch die Luftlieferleistung des Kompressors gegeben. Es empfiehlt sich immer den kleinstmöglichen Kompressor zu verwenden. Es dauert zwar länger, aber die Fülltemperatur, die aufgrund einer hohen Verdichtungsmenge immer höher ist, bleibt niedrig und die Mischung wird genauer.

Ausrüstungsteile

Für das Gase mischen benötigt man eine geeignete Ausrüstung. Die Qualität der benötigten Ausrüstung hängt im ausschlaggebenden Maße von dem Einsatz mit Sauerstoff ab. Sauerstoff ist ein sehr aggressives Gas und kann unter Verwendung falscher Ausrüstungsteile schnell reagieren. Aus diesem Grund legen wir alle Ausrüstungsteile so fest, als ob wir ständig mit reinem Sauerstoff arbeiten würden. Diese keineswegs übertriebene Maßnahme schafft uns so die Sicherheit die wir auch noch Jahre nach der ersten Inbetriebnahme einer Ausrüstung benötigen und erwarten.

Mischanlagen

Die Frage welche Mischanlage ist die Richtige ist schwer zu beantworten. Der größte Teil der Gasmischer fangen mit einem einfachen Misch-Set an. Der einzelne Taucher bleibt auch bei einfachen Anlagen. Tauchbasen und Füllstationen wechseln alsbald auf stationäre Systeme oder Systemkombinationen.

Mischschlauch

Partialdruck



Die einfachste Form einer Mischanlage ist der Mischschlauch. Ein sauerstoffgeeigneter Überströmschlauch mit Rückschlagventil, Regelventil und Manometer, sowie einem Hochdruckfilter und entsprechende Adapter gehören zu der Grundausrüstung. In der Regel reicht solch eine Anlage für den privaten Einsatz absolut aus. Vor allem das Preis-Leistungs-Verhältnis macht solche kleine Mischeinrichtungen interessant. Das GasMix-Set der Fa. KompTec bietet hier sogar schon einen digitalen Sauerstoffmanometer.

Mischkoffer

Partialdruck

Etwas komfortabler ist da schon ein Mischkoffer. Auch hier soll für die Aufarbeitung der Druckluft ein Hochdruckfilter mit vorgeschaltetem Rückschlagventil eingebaut sein. Ein Anschluss für einen Kompressor, einen für die Sauerstoffzufuhr, evtl. einen für Helium und ein gutes Manometer sind das Minimum eines Mischkoffers. Die Sauerstoffleitung sollte mittels Regulier-Ventil dosierbar sein und durch ein Rückschlagventil gesichert. Diese etwas teurere Variante ist in erster Linie für Vereine und Gruppen mit einem erhöhten Füllbedarf gedacht.

Stationäres Füllpaneel

Partialdruck



Im Prinzip ist ein Füllpaneel aufgebaut wie ein Mischkoffer. Der stationäre Aufbau lässt aber mehr Möglichkeiten zu. Ein großer Filter, ein mind. Kl. 1,0 Mischmanometer und einzelne Manometer für die entsprechenden Flaschendrucke zeichnen gute Füllpaneele aus. Ein integriertes Analysegerät soll ebenso vorhanden sein wie mindestens drei Anschlüsse für Sauerstoff (intelligentes Füllen).

Computergestützte Systeme

Partialdruck

Absolutes High-Tech ist beim Mischen mit computergestützten Mischsystemen erreichbar. Solche Systeme sind sehr teuer und um Gase schnell und sicher zu mischen reicht meist ein normales Füllpaneel aus. Die aufgezeigten Vorteile werden durch den aufwendigeren Umgang und die Wartung gegenüber eines normalen Füllpaneels wieder zunichte gemacht.

MenoX Membran

Separation



Wie schon in der Funktionsweise erklärt, ist diese Form der Mischgasherstellung eher etwas für den professionellen Anwender. Die MenoX Anlage wird in zwei Versionen angeboten. Als Box ist sie sehr kompakt und funktionell, und als Wandmontage-Set überall einsetzbar. Die kleinste Anlage liefert 100 Liter MenoX in der Minute und die bisher größte MenoX-Anlage hat es auf 750 Liter in der Minute gebracht.

Cont-Mix

Volumen

Mischanlagen die nach der kontinuierlichen Volumenmischmethode arbeiten sind sehr selten. Eine optimale und den Sicherheitsbestimmungen entsprechende Anlage ist aufwendig und kompliziert. Aus diesem Grund gibt es zur Zeit außerhalb der Laborhersteller (teuer!!) keine Anbieter auf dem europäischen Markt. Die Fa. KompTec arbeitet zur Zeit an einer Entwicklung, die alle notwendigen Sicherheits- und Funktionseinrichtungen enthält. Hierzu zählt eine Sauerstoffdosiereinheit mit Sicherheitsabsperreinrichtung, eine Mischeinheit mit Sauerstoffinjektion, ein Sauerstoffmessgerät mit Warneinrichtung (drucklose Seite), ein Sauerstoffmessgerät (Hochdruckseite) zur Kontrolle.

Gravi-Mix

Gewicht

Mischanlagen die nach der Gewichtsmethode arbeiten werden meist für die Industrie hergestellt. Da die Waagen eine hohe Auflösung (Gramm Anzeige) bei einem max. Gewicht von 50 Kg brauchen, sind diese empfindlich und teuer. Hierzu kommt noch ein Umfüllschlauch mit Regelventil.

Individuelle Mischanlagen

Immer mehr Füllstationen lassen sich kombinierte Mischanlagen erstellen. Zum einen möchte man bestehende (Kompressoren-) Anlagen in das System integrieren und zum andern soll die Anlage zu den örtlichen Parametern (Gaslieferant, etc.) passen. Auch spart man eine Menge Geld. Es werden keine doppelten Anschaffungen nötig und man nutzt die vorhandenen Ressourcen wesentlich besser aus. Die Anbieter solcher individuellen Anlagen sind allerdings sehr rar gesät. Zwischen den wenigen seriösen Firmen, tummeln sich allerlei sogenannte "Fachleute" für die es immer wieder kein Problem darstellt Mischanlagen selbst herzustellen. Vorsicht! Verwender solcher Amateur-Mischgeräte erhalten in den seltensten Fällen eine sichere und dem Stand der Technik entsprechende Anlage. Ganz zu schweigen von Garantieverprechungen (die nicht eingehalten werden können) oder Versicherungsleistung im Schadenfall.

Mischzubehör

Sauerstoffkompressoren

Kompressoren die Sauerstoff bzw. sauerstoffangereicherte Luft verdichten sind selten und teuer. Reiner Sauerstoff wird meist mittels eines Druckerhöher (HASKEL) verdichtet.

Einfacher ist die Verwendung normaler Hubkolbenverdichter. Die Möglichkeit mittels eines speziellen Öles Sauerstoff mit bis zu 80% Vol O₂ zu fördern wird aufgrund der hohen Kosten des Öles (1 Liter für 900 US\$) kaum genutzt. Auch fehlt die BAM für dieses spezielle Öl.

In Deutschland bietet einzig die Fa. KompTec modifizierte Kompressoren für den Einsatz bis 40% O₂ an. Viele Hersteller schließen die Verwendung von Sauerstoffangereicherter Luft über 21% Vol. O₂ aus. In den USA liegt die Grenze bei 40 %. Gemäß einer Verordnung müssen alle Kompressoren in den USA bis 40% Vol O₂ zu betreiben sein!

Kompressoren



Zum Mischen verwenden wir normale Hochdruckkompressoren, die eine Atemluftqualität entsprechend der DIN 12021 liefern. Die Qualität der Luft ist meistens für den "normalen" Atemluftbedarf ausreichend. Für das Mischen mit Sauerstoff benötigen wir eine andere, bessere Qualität. Diese erreichen wir nur mit der Verwendung eines speziellen Reinigungsfilters (z.B. Nitrox-Clean-Filter von KompTec). Der Einsatz von Kompressoren mit geringerer Luftlieferleistung hat sich gegenüber großen "Schnellfüllanlagen" bewährt. Durch eine hohe Füllrate erwärmt sich die Flasche sehr stark und führt zu Misch-Ungenauigkeiten. Kompressoren mit einer Luftlieferleistung unter 160 Liter/Minute besser noch unter 100 Liter/Minute, führen zu exakteren Mischergebnissen.

Filter

Damit wir auch ölfreie Luft bei unseren Mischvorgängen verwenden können benötigen wir einen speziellen Reinigungsfilter (z.B. Nitrox-Clean-Filter von KompTec), welcher die vom Kompressor gelieferte Luft nochmals aufbereitet und entsprechend unseren Bedingungen ölfrei zur



Verfügung stellt. Diese Filter sind aufgebaut wie ein Atemluftfilter eines Kompressors, aber mit besonderem Inhalt. Die vom Kompressor vorgereinigte Luft strömt durch eine ausreichend dimensionierte Schicht Trockner mit einem sehr tiefen Drucktaupunkt von mind. -65°C (siehe Trockner). Danach wird die Luft nochmals mit einer speziellen Aktivkohle (siehe Aktivkohle) aufbereitet. Als letztes passiert die Luft einen Indikator, welcher bei Kontrolle die Qualität der bisherigen Luft aufzeigt.

Vorsicht! Sogenannte Überströmfilter erfüllen die Kriterien die an einen ordentlichen Reinigungsfilter gestellt werden bei weitem nicht! Diese Überströmfilter halten in erster Linie Partikel (größer $5\mu\text{m}$) zurück, lassen aber Kohlenwasserstoffe und dergleichen durch. Auch bei Einsatz von Filterscheiben zeigt sich schon nach wenigen Minuten, dass die Scheiben kontaminiert sind und eine Reinigung NICHT mehr stattfindet. Die empfohlenen Wechsel der Filterscheiben bei sichtbarer Feuchtigkeit oder bei reduziertem Gasdurchsatz zu wechseln ist eher als schlechter Scherz zu deuten. Ist Wasser sichtbar oder lässt der Gasdurchsatz nach hat eine Kontamination und damit das Risiko einer Reaktion schon stattgefunden. Fazit: Solche Placebo-Filter sind nichts für das Gase mischen!

Trocknergranulat



Zur Trocknung und Reinigung empfehle ich ausschließlich BAY-DRY mit einem Drucktaupunkt von -75°C . Der Drucktaupunkt gibt die äquivalente Trocknungstemperatur an. Je Tiefer die Temperatur, desto trockener und reiner wird die aufgearbeitete Luft. Das weit verbreitete Silica-Gel (äquivalenter Drucktaupunkt -30°C) verwende ich nur als Indikator. Wechselt die Farbe des Silica-Gels, weis ich, dass die Anlage kontaminiert ist und diese gereinigt werden muss.

Aktivkohle



Die Aktivkohle entnimmt der trockenen und vorgereinigten Luft auch die letzten Ölbestandteile (Kohlenwasserstoffe) und Aerosole. Es ist allerdings darauf zu achten, dass nur Aktivkohle bester Qualität verwendet werden darf. Sie muss sehr aufnahmefähig (Wassergehalt max. 6%), besonders hart (Abriebhärte >97%) und staubfrei sein. Je kleiner (optimal ca. 1 mm Korndurchmesser) die Aktivkohle-Pellets sind, desto weniger Zwischenraum findet die Luft um an der Aktivkohle "vorbei" zu strömen. Die Zündtemperatur muss über 250°C liegen. All diese Eigenschaften finden wir z.B. bei Tec-Carbon.

Aktivkohle und Trockener müssen immer trocken und in gasdichten Behälter gelagert werden. Oftmals werden Trockner und Kohle in Kunststoffflaschen verkauft. Man kann sehr einfach prüfen ob die Behälter wirklich gasdicht sind. Wird die Lagertemperatur der geschlossenen Behälter um 5°C erhöht, bläht sich der Behälter auf. Tut er dies nicht, findet ein Gasaustausch statt und wir können davon ausgehen, dass sich Kohle oder Trockner mit der Zeit sättigen und inaktiv werden. Auch Folienbeutel sind kein geeignetes Behältnis, hier findet der Gasaustausch sehr schnell statt und die Granalien können nicht mehr gebraucht werden.

Manometer



Ausschließlich Manometer für Sauerstoff dürfen beim Mischen von Gasen verwendet werden. Dies sind die einzigen Manometer die Ölfrei, bzw. nur mit zugelassenen Schmiermitteln gefertigt werden. Diese Manometer werden mit dem Aufdruck eines durchgestrichenen Ölkännchens oder dem schriftlichen Hinweis, das Produkt Öl- und Fettfrei zu halten geliefert.

Die Klassifizierung eines Manometers wird in absolut % angegeben, d.h. ein Kl. 1,6 Manometer darf eine Abweichung von $\pm 1,6\%$ des absoluten Messwertes haben. Bei einem Manometer mit einer Skala von 400 bar kann die Abweichung schon einmal 6,4 bar betragen. Hat das Manometer dann auch nur einen Durchmesser von 63mm, ist der Messwert sowieso nicht mehr exakt abzulesen.

Geeignete analoge Manometer besitzen die Klasse 1,0 oder besser und haben mindestens einen Durchmesser von 100 mm.

Digitale Manometer sind in der Klasse 0,5 oder besser erhältlich. Wichtig ist, dass diese Manometer für Sauerstoff geeignet sind und mit einem speziellen Öl (Galdene 20) gefüllt sind. Gerade bei digitalen Geräten soll man sich die Verwendung für Sauerstoff bescheinigen lassen, da einige schwarze Schafe immer wieder normale Druckluftmanometer als Sauerstoffmanometer verkaufen.



Gas + Flaschen

Der einfachste Weg Sauerstoff-, bzw. Heliumflaschen zu erhalten, ist der regionale Gaslieferant. Überregionale Anbieter wie AGA, Linde oder Westfalen Gas und auch kleinere regionale Anbieter können zumeist die benötigten Gase innerhalb kurzer Zeit liefern. Da das Preis/Leistungsangebot regional stark differiert, lohnt sich der Preisvergleich und das Handeln. Doch sollte man sich von so genannten Rahmenaufträgen und Vertragsverpflichtungen, die einen sehr lange an den Gaslieferanten binden, hüten. Mit ein wenig Verhandlungsgeschick erhält man auch geringe Gasmengen zu sehr adäquaten Konditionen.

In Deutschland dürfen für das Tauchen mit Gasgemischen mit mehr als 21 % Sauerstoffanteil nur Sauerstoff-Tauchgeräte (STG) verwendet werden. In den vielen anderen Ländern bestehen keine oder nur unzureichende Regelungen für das Tauchen mit NITROX.

Ventile

Was für ein Ventilanschluss soll ich nehmen? Diese oder ähnliche Fragen werden mir immer wieder gestellt. Es sind zurzeit verschiedene Anschlussarten erhältlich.

M24 x 2 Außengewinde (Drägeranschluss) für Nitrox

Dieses Ventil wird in erster Linie von der Fa. Dräger eingesetzt. Es ist für den Bereich von 22-100 % O₂ vorgesehen.

¾" Außengewinde nach DIN 477 für Sauerstoff

Das ¾" Ventil ist das am meisten benutzte für Sauerstoff in Deutschland.

5/8" Innengewinde nach DIN 477 für Druckluft

Dieses Ventil finden wir auf allen deutschen Druckluftflaschen. Da es keine Sauerstoffzulassung hat ist es auch nicht für den Einsatzzweck NITROX geeignet. Trotzdem wird dieses Ventil oftmals (gerade im Ausland) gereinigt und für den NITROX-Einsatz umgebaut. In Amerika wird dieses Ventil gerne von Höhlentauchern eingesetzt.

M26 x 2 Innengewinde nach EN 144-2 für Nitrox (EU-Nitrox)

Das neue Nitrox-Ventil soll europaweit als Standard für Nitrox verwendet werden und weitgehend das Dräger Nitrox und das ¾" Sauerstoffventil ersetzen. Es ist für den Bereich von 22-100 % O₂ vorgesehen.

Rückschlagventile

Rückschlagventile werden in erster Linie als Schutz vor unkontrolliertem Rückschlagen von Gasen in einem bestimmten Bereich gesetzt. Rückschlagventile im Gasbereich sind allerdings nicht immer ganz dicht und stellen keinen 100%igen Ersatz für Absperrventile dar. Unter Umständen kann ein Rückschlagventil Gas rückströmen lassen. Jedoch sollten diese Leckagen minimal sein. Rückschlagventile die größere Mengen (deutliches zischen) Gas entweichen lassen sind entweder verunreinigt oder defekt.

Adapter



Wo verschiedene Systeme zum Einsatz kommen, da ist die Verwendung von Adaptern unumgänglich. Zum Füllen gibt es eine Reihe verschiedener "Fülladapter". Ein guter Fülladapter muss mit der Hand schraubbar sein und gleichfalls eine entsprechende Fläche für Werkzeuge wie ein Schraubenschlüssel aufweisen.

Ich möchte besonders darauf hinweisen, dass bei Verwendung von Adaptern zwischen Tauchflasche und Lungenautomaten die Betriebserlaubnis des Tauchgerätes erlicht. Adapter sind in erster Linie für das Überbrücken unterschiedlicher Füllsysteme beim Mischen von Gasen gedacht ist. Auch einfache Adapter zur Überbrückung von Druckgrenzen (z.B. 300 bar auf 200 bar) sind nicht erlaubt. Hier schafft ein Druckminderer oder Fülladapter mit Sicherheitseinrichtung (Sicherheits-Überdruckventil) Abhilfe.

Schmiermittel



Überall wo etwas verbunden oder angeschlossen wird ist der Einsatz von Schmiermittel angesagt. Da wir auch bei Sauerstoffanwendungen auf Schmiermittel nicht verzichten wollen, müssen wir spezielle für diese Einsatzart bestimmte Gleitmittel und Öle verwenden. Diese Schmiermittel müssen von der Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) geprüft und freigegeben worden sein.

Die Druckstoßgrenze sollte nicht unter 210 bar liegen. Auch hier ist man natürlich von den Aussagen der Hersteller abhängig. Die Druckstoßgrenze ist Temperatur abhängig. Je höher die Temperatur desto niedriger die Druckstoßgrenze. Als hervorragende Gleitmittel haben sich T-Oxy LCO 25 von KompTec (bis 220 bar / 200°C) und SAF93-302 von Klüber (bis 260 bar / 60°C) bewährt.

O-Ringe

O-Ringen in Zusammenhang mit Sauerstoff müssen aus VITON® bzw. FPM gefertigt sein. Unterschieden wird nur noch in der Härte (Shore). Beim Austausch von normalen NBR O-Ringen muss die Härte des Materials beibehalten werden. Oftmals werden NBR O-Ringe mit einer Härte von 90 Shore aus Kostengründen gegen VITON O-Ringen mit nur einer Härte von 75 ± 5 oder 80 Shore getauscht. Dies kann unter Umständen sehr gefährlich sein. Gerade im Hochdruckbereich (Flaschen) ist die Verwendung von O-Ringen mit 90 Shore unumgänglich.

Die Gasanalyse

Die Gasanalyse ist ein wichtiger Bestandteil beim Mischen von Gasen. Eine fehlerhafte Messung und man erhält Gasmischungen die unter Umständen fatale Folgen für den Nutzer haben können. Die Auswahl der richtigen Messinstrumente ist deshalb genauso wichtig wie die Reinheit der Gase die wir verwenden.

Sauerstoffmessgeräte



OxiQuant RD

Eine Reihe von Analysegeräten sind mittlerweile auf dem Markt zu finden. Von ganz billig bis extrem teuer. Eins haben alle Geräte gleich; Sie messen den elektrischen Strom den die Brennstoffzelle erzeugt. Nun sollte man davon ausgehen das ein Auswertgerät (nichts anderes ist ein Analysegerät) einfach und mit wenigen Bausteinen zu realisieren ist. Aber Vorsicht, auch hier gibt es gravierende Unterschiede. Der größte Unterschied liegt in der Qualität der Bausteine und in der Abschirmung gegenüber äußerer elektrischer Felder. Jedes Messgerät benötigt eine mehr oder weniger gute Abschirmung. Je einfacher die Bauteile desto aufwendiger die Abschirmung. Manche Hersteller verwenden einfache Platinen

und Bauteile, beschichten dafür das Gehäuse mit einem speziellen Graphit und verbinden diese aufwendig mittels Kupferband mit der Platine.

In der heutigen Zeit sind "Sandwich"-Platinen mit innen liegenden Leiterbahnen und entsprechende Chipbauteile die bessere Wahl. Die Messwertbeeinflussung ist fast völlig ausgeschlossen und somit sind die einzigen Faktoren die zu einer Messwertveränderung führen können beim Sensor zu suchen.

Sauerstoff-Messgeräte weisen in der Handhabung und Funktion folgende Merkmale auf:

Sauerstoffsensoren

Auf dem Markt gibt es mittlerweile eine große Auswahl von Geräten. Am häufigsten finden wir Sauerstoffsensoren, die nach dem elektrochemischen Verfahren betrieben werden. Der Sensor enthält eine Membran die aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung mit Sauerstoff elektrisch reagiert (Oxidation). Ein in einer Flüssigkeit liegender Bleikern sorgt für die galvanische Reaktion. Je höher der Sauerstoffanteil desto heftiger die Reaktion und mehr Elektrizität wird erzeugt. Theoretisch wird ein Wert erzeugt der linear verläuft. Praktisch gibt es allerdings auch bei den besten Sensoren Abweichungen, die beim Kalibrieren der Geräte berücksichtigt werden müssen. Die Genauigkeit der Sensoren ist abhängig vom Druck, der Temperatur und der Feuchtigkeit. Sie kann je nach Sensortyp von unter 0,5% bis über 2% betragen. Eine wichtige Angabe des Herstellers ist die der Abweichung. Eine Abweichung bis zu $\pm 1\%$ des absoluten Wertes (das ist der Wert über die gesamte Skala) ist in der Toleranz und akzeptabel. Messgeräte mit einer höheren Toleranz sollten keine Verwendung finden.

Auch sollte man den Verbrauch des Sensors berücksichtigen. Die meisten Sensoren haben eine Haltbarkeit von über 10 Monaten in reinem Sauerstoff, bzw. mehr als zwei Jahre unter normalen Einsatzbedingungen.

Handhabung von Sauerstoffmessgeräten



Oxylyser S

Die Handhabung und der Umgang mit einem Sauerstoffmessgerät sollte so einfach wie möglich sein. Aufgrund der verschiedenen Einsatzgebiete haben sich am Markt verschiedenste Geräte positioniert.

Im normalen MENOX / NITROX Bereich haben sich Geräte wie z.B. der Oxylyser[®]S von KompTec durchgesetzt. Dieses Gerät ist schnell und einfach zu bedienen und erlaubt eine zuverlässige Messung gerade von MENOX und NITROX Gemischen.

Im TRIMIX Bereich sowie im professionellen Einsatz hat sich besonders der OxiQuant bewährt. Die einfache und sichere Handhabung und die freie Kalibrierbarkeit zwischen 0 und 100% erlauben den Einsatz ohne Einschränkung.

Kalibrierung



Entnahmeset
Flow

Um einen genauen Messwert zu erhalten muss bei dem Kalibrieren mit größter Sorgfalt gearbeitet werden.

Folgende Faktoren beeinflussen die Messergebnisse:

- Druck
- Temperatur
- Feuchtigkeit

Der anstehende Druck am Sensor sollte so niedrig wie möglich sein. Das Kalibrieren muss unter gleichen Bedingungen (Druck, Temperatur, Feuchtigkeit) wie der eigentliche Messvorgang erfolgen. Am genauesten erreicht man dies unter Verwendung eines Druckminderers mit einstellbarem Flow. Der Flow sollte zwischen 2 und 4 Liter in der Minute betragen. Der Sensor darf unter keinen Umständen während der Messung mit einem anderen Gas als das zu Messende in Berührung kommen.



QuickFlow

Wichtig hierbei ist das Referenzgas (Stickstoff, Luft oder Sauerstoff). Das Kalibrieren erfolgt bestenfalls mit einer Flasche, so dass die Druckverhältnisse dem des zu messenden Gases annähernd gleichen.

Bewährt hat sich mittlerweile der einfachere und universelle Gasentnahme-Adapter QuickFlow von KompTec. Dieser Adapter hat die Gasentnahme zum Messen der Gase wesentlich erleichtert. Bei dem QuickFlow handelt es sich um ein T-Stück mit Sensoraufnahme und beidseitigem Gummiansatz.

Der Gummiansatz wird einfach auf das Gasflaschenventil gedrückt und das Flaschenventil leicht geöffnet. Aufgrund des großen Messraumes entsteht kein nennenswerter Überdruck welcher die Messung beeinflussen könnte. Der gegenüberliegende Gummiansatz verhindert das unkontrollierte Zuströmen von Luft.

Von Geräten mit einer nicht kontrollierbaren, automatischen Kalibrierung rate ich generell ab. Die Geräte kalibrieren nur annähernd und "mitteln" per Software. Die Geräte die hier sehr genau arbeiten sind wiederum für den Normal-Gasmischer unerschwinglich.

ACHTUNG! Einige Gasmische (meist TRIMIX) können sich unter bestimmten Voraussetzungen entmischen. Vor Messungen sind die Flaschen zu rollen bzw. zu "schütteln".

Referenzgas

Um die Genauigkeit der Messungen zu optimieren, ist es ratsam die Kalibrierung des Messgerätes an einem Referenzgas vorzunehmen, welches dem zu messenden Gases im Sauerstoffgehalt am nächsten kommt.

Mit welchem Gas kalibriert werden soll hängt im wesentlichen von dem Sauerstoffgehalt des zu messenden Gases ab.

Als Referenzgas eignen sich

- Stickstoff** für Messungen mit einem Sauerstoffgehalt bis 10%
- Luft** für Messungen mit einem Sauerstoffanteil von 11 bis 60%
- Sauerstoff (100%)** für Messungen mit einem Sauerstoffanteil von 61 bis 100%

Dokumentation

Damit der Taucher auch weiß was in seiner Flasche drin ist muss der Inhalt natürlich nach der Analyse entsprechend dokumentiert werden. Folgende Daten müssen an der geprüften Flasche erkennbar sein:

- Datum der Füllung
- Namen des Gasmischers
- Sauerstoffanteil
- Stickstoffanteil
- Heliumanteil
- Partialdruck Sauerstoff
- maximale Tauchtiefe in m

ACHTUNG!		Diese Tauchflasche		ACHTUNG!	
		enthält ein modifiziertes Atemgas.			
NITROX - TRIMIX - HELIOX					
MOD	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	O ₂	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	%	
	m	N ₂	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	%	
ppO ₂	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	He	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	%	
gefüllt von	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>	Datum	<input style="width: 100px; height: 20px;" type="text"/>		

Für den gewerblichen Bereich sowie beim Füllen für Dritte (Vereinskameraden, etc.) empfiehlt sich die Füllung und die Werte in einem Füllbuch zu dokumentieren. Bei der Herausgabe der Flasche muss der Empfänger den Inhalt der Flasche kontrollieren und im Füllbuch bestätigen.

Nachweise Mischgasherstellung

Für die Herstellung von Gasen benötigen wir zwei Nachweisbücher. Erstens muss der Nachweis über die verwendeten Gase geführt werden. Jede Flasche die wir von einem Lieferanten erhalten muss in einem Eingangsbuch notiert werden.

- Flaschennummer (Seriennummer der Flasche)
- Lieferant
- Art des Gases
- Datum der Lieferung
- Datum des ersten Einsatzes
- Datum des letzten Einsatzes
- Handzeichen des ausführenden Mischers

(siehe Muster im Anhang)

So ist bei eventuellen Schadensereignissen feststellbar, welche Flaschen auch eingesetzt waren und von welcher Lieferung und welchem Lieferanten das Gas stammt. Das Eingangsbuch ist um so wichtiger je mehr Flaschen im Einsatz sind.

Zweitens ist der Nachweis der Mischung und der Abgabe an "Dritte" (Kunden, Vereinskameraden, Freunde, etc.) zu dokumentieren und vom Nutzer zu quittieren. Folgende Daten sollten bzw. müssen bei der Herstellung festgehalten werden:

- Flaschennummer (Seriennummer der Flasche)
- Kundename
- Gewünschte Mischung (O_2 / HE / N_2)
- Unterschrift Gase Mischer
- erzielte Mischung (O_2 / HE / N_2)
- Datum der Mischung
- Unterschrift Nutzer
- kontrollierte Mischung (O_2 / HE / N_2)
- Datum der Kontrolle

(siehe Muster im Anhang)

Praxis - Partialdruckmischen

Die Nachfolgende Anleitung behandelt das Mischen von Gasen mittels des GasMix-Set digital der Fa. KompTec. Bei Verwendung anderer Mischeinrichtungen darf diese Anleitung nicht zugrunde gelegt werden. Verwenden Sie die Anleitung des Herstellers.



Zum Mischen mittels der Partialdruckmethode benötigen wir:

- ☞ Umfüllschlauch mit $\frac{3}{4}$ " Anschlüsse
- ☞ Sauerstoff-Regelventil
- ☞ Sauerstoff-Manometer, digital
- ☞ Rückschlagventil
- ☞ NITROX-Clean Filter
- ☞ Adapter $\frac{3}{4}$ " a - $\frac{5}{8}$ "i

Alle Teile natürlich für Sauerstoff zugelassen und entsprechend gereinigt.

Anschlüsse

- ☞ Generell immer nur den Anschluss ($\frac{3}{4}$ "") mit dem davor geschalteten Rückschlagventil an die liefernde Gasflasche anschließen.
- ☞ Der Anschluss mit dem Entlüftungsventil und dem Manometer wird an dem zu füllenden Druckbehälter angebracht.
- ☞ Der Adapter $\frac{5}{8}$ " - $\frac{3}{4}$ " ist nur für die Verbindung des NITROX-Clean Filters auf den Verbindungsschlauch beim Toppen gestattet.

Druckmessung

Mit dem Verbindungsschlauch ist es möglich den Druck in einer Druckgasflasche (z.B. Tauchflasche) zu ermitteln. Es dürfen nur sauerstoffkompatible Flaschen geprüft werden. Gehen Sie wie folgt vor:

- ☞ Schließen Sie den Verbindungsschlauch mit der Manometer-Seite an die zu prüfende Flasche an.
- ☞ Schalten Sie das digitale Manometer an.
- ☞ Öffnen Sie langsam das Flaschenventil.
- ☞ Nun können Sie den Druck ablesen.
- ☞ Schließen Sie das Flaschenventil.
- ☞ Entlüften Sie das System über den Entlüftungsknopf.

- ☞ Jetzt können Sie den Verbindungsschlauch wieder von der Flasche entfernen.

Achtung: *Bei Prüfungen von Druckgasflaschen mit einem DIN 5/8" Ventil (Achten Sie auf die Sauerstoffkompatibilität!) verwenden Sie den beiliegenden 5/8" - 3/4" Adapter.*

Füllbetrieb Gas (Sauerstoff, PREMIX, ect.):

Bei dem Umfüllen von Gasen gehen Sie wie folgt vor:

- ☞ Stellen Sie die Druckverhältnisse des zu füllenden Druckgasbehälters sowie der liefernden Gasflasche fest. Der Druck in der liefernden Gasflasche muss immer höher sein, als der in der zu füllenden Gasflasche!
- ☞ Schließen Sie die zu füllende Flasche am Verbindungsschlauch (Manometerseite) an.
- ☞ Schließen Sie die Gasflasche an dem anderen Ende des Verbindungsschlauches (Seite mit Rückschlagventil) an.
- ☞ Schalten Sie das Manometer ein.
- ☞ Liefernde Gasflasche vorsichtig öffnen
- ☞ Flaschendruck der liefernden Gasflasche kontrollieren (dieser muss immer höher sein als der Druck in der zu füllenden Flasche)
- ☞ Flaschenventil der zu füllenden Flasche langsam öffnen (auf geringe Strömgeschwindigkeit achten - Druckerhöhung von max. 3 bar in 10 Sekunden gelten als sicher)
- ☞ Mittels Ventil der liefernden Flasche Füllvorgang regulieren.
- ☞ Wenn gewünschte Menge Gas übergeströmt ist Ventil der zu liefernden Flasche schließen.
- ☞ Flaschenventil der zu füllenden Flasche wieder schließen.
- ☞ Gasflasche vom Verbindungsschlauch trennen.



Toppen:

Das Auffüllen (Toppen) mit reiner Druckluft bedarf einer absolut sauberen Druckluft. Diese reine Druckluft erreicht man unter Verwendung eines speziellen Reinigungsfilters, des NITROX-Clean Filters. Beachten Sie die Bedienungsanleitung des NITROX-Clean Filters und verwenden Sie diese Anleitung nur ergänzend.

- ☞ Verbindungsschlauch (Rückschlagventilseite) am NITROX-Clean Filter anschließen. (Adapter dazwischen schalten).
- ☞ Kompressorfüllschlauch am NITROX Clean Filter anschließen.
- ☞ Kompressor starten, und auf vollen Druck arbeiten lassen
- ☞ langsam Ventil der zu füllenden Flasche öffnen und bis zum gewünschten Enddruck auffüllen.
- ☞ Enddruck am Manometer ablesen!
- ☞ Ventil der zu füllenden Flaschen schließen und Kompressor ausschalten.
- ☞ System Druck entlasten, abmontieren und sauber, fett- und ölfrei aufbewahren.

- ☞ Flasche nun ca. 5 - 10 Minuten rollen, damit Gase sich komplett mischen oder mehr als 1 Stunde stehen lassen.
- ☞ Nun Gasanalyse durchführen und Werte dokumentieren.

ACHTUNG!!

Niemals den NITROX-Clean Filter beim Umfüllen von Sauerstoff verwenden. EXPLOSIONSGEFAHR!

Der Filter darf ausschließlich zur Reinigung von Druckluft (Kompressor) verwendet werden.

Störungen

Achtung! Bei folgenden Szenarien SOFORT Füllvorgang unterbrechen:

- ☞ Zu füllende Flasche wird heiß (Sauerstoffreaktion)
- ☞ Es knistert hörbar (Sauerstoffreaktion).
- ☞ Verbindung ist undicht - Gas tritt aus.

Zu füllende Flasche wird sehr warm!

- ☞ Strömgeschwindigkeit ist zu hoch. Schließen Sie das Gasflaschenventil etwas.

Gas gelangt nicht in die zu füllende Flasche!

- ☞ Gasflasche ist geschlossen.
- ☞ Verbindungsschlauch ist verkehrt herum angeschlossen

Druckluft gelangt nicht in die zu füllende Flasche!

- ☞ Verbindungsschlauch ist verkehrt herum angeschlossen

Hinweise: *Alle Teile des NITROX Sets müssen unbedingt öl- und fettfrei gelagert und gehalten werden. Niemals mit fettigen Fingern montieren.*

Anhang

Formellegende zum Mischgas berechnen

A	= Gas A im Korrekturblatt (Nitrox oder Luft)
akt	= aktueller Wert
B	= Gas B im Korrekturblatt (Helium oder Sauerstoff)
end	= Zustand am Ende eines Füll/Mischvorganges
F	= Teil einer Gasmischung (Fraktion)
G	= Gesamtgas
He	= Helium
L	= Flaschengröße
L_{luft}	= Luft (21/79)
m	= Gewicht in Gramm
mess	= analysierter Teil
misch	= benötigter Teil zum mischen
N₂	= Stickstoff
O₂	= Sauerstoff
P	= Gesamtdruck in bar
pp	= Partialdruck (partial pressure)
pV	= Volumenanteil
Restgas	= restliches Gasgemisch in einer Flasche
red	= reduzierender Wert
V	= expandiertes Volumen bei Umgebungsdruck
Zielgas	= gewünschtes Gasgemisch

Umrechnungstabelle Druck

von/in	atm	bar	kg/cm ²	psi - lb/in ²	mm Hg	kPa
atm	--	1.0133	1.0322	17.7	760	101.33
bar	0.9869	--	1.0197	14.504	750	100
kg/cm ²	0.9678	0.9807	--	14.22	735.5	98.07
lb/in ²	0.0680	0.0689	0.0703	--	51.7	6.89
mm Hg	1.316×10^{-3}	1.33×10^{-3}	1.36×10^{-3}	1.934×10^{-2}	--	0.133
kPa	9.869×10^{-3}	1×10^{-2}	1.02×10^{-2}	3.611×10^{-2}	7.50	--

Umrechnungstabelle Volumen

von/in	Liter	m ³	cm ³	ft ³	gal
Liter	--	1×10^3	1×10^3	3.532×10^{-2}	2.2×10^{-1}
m ³	1×10^3	--	1×10^6	35.32	220.0
cm ³	1×10^3	1×10^{-6}	--	3.532×10^{-5}	2.2×10^{-4}
ft ³	28.32	0.028	28.317	--	6.23
gal	4.546	4.546×10^{-3}	4.546	0.16	--

Umrechnungstabelle Temperatur

von/in	°C	°F	°K	°R
°C	--	$1.8(°C) + 32$	$°C + 273.2$	$1.8 (°C + 273.2)$
°F	$(°F - 32) / 1.8$	--	$(°F + 459.7) / 1.8$	$°F + 459.7$
°K	$°K - 273.2$	$1.8 (°K) - 459.7$	--	$1.8(°K)$
°R	$°R / 1.8 - 273.2$	$°R - 459.7$	$°R / 1.8$	--

Wichtige Einheiten und Abkürzungen

AC	Wechselstrom
atm	physikalische Atmosphäre
bar	Bar
BS	British Standard
cc	Kubikzentimeter
cm	Zentimeter
DIN	Deutsche Industrie Norm
ft	Fuß (feet - engl.)
g	Gramm
in, "	inch(es) (engl.)
kg	Kilogramm
kPA	Kilopascal
KW	Kohlenwasserstoff
l	Liter
lb	Pound (engl.)
l/min	Liter pro Minute
m	Meter
mg	Milligramm
ml	Milliliter
mm	Millimeter
MW	Molekulargewicht
mppm	Mol pro eine Millionen Mol
Nm ³ /h	Standard Kubikmeter pro Stunde
NPT	National Pipe Thread
ppb	Teile pro eine Billionen Teile
ppm	Teile pro eine Millionen Teile
psi	Pounds per square inch (lb/inch ²)
V	Volt
vol	Volumen
vol%	Volumenprozent
°C	Grad Celsius
°K	Grad Kelvin
°F	Grad Fahrenheit
°R	Grad Rankine

Nachweis Mischgasherstellung

Seite _____

Bitte sorgfältig ausfüllen und unterschreiben. Kontrollierte Mischung vom Taucher unterschreiben lassen! Alle Mischungsangaben in Prozent (%)

		O ₂	He	N ₂	Unterschrift
		Datum			
Flasche Serien#	gewünschte Mischung				
Name TaucherIn	erzielte Mischung				
	kontrollierte Mischung				
Flasche Serien#	gewünschte Mischung				
Name TaucherIn	erzielte Mischung				
	kontrollierte Mischung				
Flasche Serien#	gewünschte Mischung				
Name TaucherIn	erzielte Mischung				
	kontrollierte Mischung				
Flasche Serien#	gewünschte Mischung				
Name TaucherIn	erzielte Mischung				
	kontrollierte Mischung				
Flasche Serien#	gewünschte Mischung				
Name TaucherIn	erzielte Mischung				
	kontrollierte Mischung				

Lagerbuch Gasflaschen

Seite _____

Flasche Serien#	Lieferdatum	HZ
Lieferant	Einsatzdatum	HZ
Gasart / Qualität	Enddatum	HZ

Flasche Serien#	Lieferdatum	HZ
Lieferant	Einsatzdatum	HZ
Gasart / Qualität	Enddatum	HZ

Flasche Serien#	Lieferdatum	HZ
Lieferant	Einsatzdatum	HZ
Gasart / Qualität	Enddatum	HZ

Flasche Serien#	Lieferdatum	HZ
Lieferant	Einsatzdatum	HZ
Gasart / Qualität	Enddatum	HZ

Flasche Serien#	Lieferdatum	HZ
Lieferant	Einsatzdatum	HZ
Gasart / Qualität	Enddatum	HZ

Flasche Serien#	Lieferdatum	HZ
Lieferant	Einsatzdatum	HZ
Gasart / Qualität	Enddatum	HZ

HZ = Unterschrift / Handzeichen

Neue Farbkennzeichnung von Gasflaschen (DIN EN 1089-3)

technischer Sauerstoff blau blau   weiß blau (grau) Alt Neu	
Xenon, Krypton, Neon grau grau (schwarz)   leuchtend-grün grau (leuchtend-grün) Alt Neu	
Stickstoff dunkel-grün dunkel-grün   schwarz grau (dunkelgrün schwarz) Alt Neu	
Wasserstoff rot rot   rot rot Alt Neu	
Argon grau grau   dunkelgrün grau (dunkelgrün) Alt Neu	
Helium grau grau   braun grau Alt Neu	
Medizinischer Sauerstoff weiß blau   weiß weiß Alt Neu	
Gemisch Helium/Sauerstoff blau blau   weiß/braun weiß Alt Neu	
Luft / Synthetische Luft blau (schwarz) blau   weiß schwarz weiß Alt Neu	

Seit dem 1. Januar 1998 werden die farblichen Kennzeichnungen von Gasflaschen gegenüber dem bekannten Zustand geändert. Am 1. Juli 1997 wurde hierzu eine neue Euro-Norm (DIN EN 1089-3) veröffentlicht.

Zum Jahresende 1997 hatte die deutsche Gasindustrie im Rahmen der gegebenen Freiräume ergänzende Übereinkünfte getroffen. Zwar muss die Norm erst ab 1. Juli 2006 angewendet werden, wegen der großen Zahl umzustellender Druckgasflaschen wurde jedoch mit der Umstellung zum 1. Januar 1998 begonnen.

Um während der Übergangsphase Verwechslungen auszuschließen, werden Gasflaschen, die nach neuer Norm farblich gekennzeichnet sind, mit dem Großbuchstaben "N" versehen. Die einzig verbindliche Kennzeichnung des Flascheninhalts erfolgt nach wie vor jedoch durch den Gefahrgutaufkleber.

Die Farbkennzeichnung dient lediglich als ergänzende und unterstützende Information.

Im Prinzip gilt für die farbliche Kennzeichnung auf der Flaschenschulter:

innert = leuchtendgrün

brennbar = rot

oxidierend = hellblau

toxisch/korrosiv = gelb

Alte und neue Flaschenfarben:

Anmerkung:

Bei Reingase/Gasgemische für industriellen Einsatz kann der zylindrische Flaschenmantel verschiedene Farben aufweisen, von denen eine farblich dargestellt ist und die andere(n) in Klammern erwähnt ist (sind).

Bei Reingase / Gasgemische für medizinischen Gebrauch und Inhalation ist der zylindrische Flaschenmantel bei Gasen für medizinischen Gebrauch und Inhalation immer weiß.

Diese Veröffentlichung entspricht dem Stand des technischen Wissens zum Zeitpunkt der Herausgabe. Der Verwender muss die Anwendbarkeit auf seinen speziellen Fall und die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung in eigener Verantwortlichkeit prüfen. Eine Haftung des Autors und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

Literaturhinweis

Unfallverhütungsvorschrift VBG 62
Carl Heymanns Verlag KG - Köln

Merkblatt M 034, 2/95 ZH 1/307
Umgang mit Sauerstoff
Jedermann-Verlag - Heidelberg

Merkheft Gefahren durch Sauerstoff
BGI 644
Carl Heymanns Verlag KG - Köln

Braun: Druckgeräte
UB Media AG - Markt Schwaben

Druckbehälterverordnung mit Technische Regeln Druckgase und
Technische Regeln Druckbehälter
Carl Heymanns Verlag KG - Köln

Aspacher, 1996: "NITROX"

Rutkowski, 1994: "Blending and Partial Pressure Methods of
Mixing Nitrox"