

NITROX edition

replaced to maintain the analyzer's accuracy. Remove the two Phillips screws retaining the battery cover panel to access the batteries (near Sample gas line). Use only Cera alkaline batteries. A new set of batteries will last 150 hours. The Helium analyzer's Zero and Span should be calibrated every 30 days, or as required. Consult manual for calibration instructions.

Note: The gas sample must be flowing to accurately measure the Oxygen content.

Turn the OFF - ON - BATT. TEST switch to the ON position.

Span: span prior to use: Attach an air source to the gas sample line. The gas flow rate should be set to a very low rate (0.2 - 2 SLPM) to purge the cell holder with air and to establish the span. Adjust the Percent Oxygen display to 20.9% with the O2 span knob. Attach the Sample Gas line to the gas source. The gas flow rate must not exceed 2 SLPM. The Oxygen and the Helium displays will respond almost instantly to the change to establish them as valid.

CAUTION: THIS UNIT IS NOT WATER PROOF

Beckman Analytical Instruments 16630 Chestnut Street, PO Box 1586, City of Industry, CA 91744 - 11360, Telex: 7 676 11 881 - 8221, WWW.beckman.com

Table with 4 columns: Sample Gas, Oxygen, Helium, and Helium. The table contains calibration data for various gas mixtures.

Sample Gas	Oxygen	Helium	Helium
20.9% O2 in Air	20.9	0.0	0.0
21.0% O2 in Air	21.0	0.0	0.0
21.1% O2 in Air	21.1	0.0	0.0
21.2% O2 in Air	21.2	0.0	0.0
21.3% O2 in Air	21.3	0.0	0.0
21.4% O2 in Air	21.4	0.0	0.0
21.5% O2 in Air	21.5	0.0	0.0
21.6% O2 in Air	21.6	0.0	0.0
21.7% O2 in Air	21.7	0.0	0.0
21.8% O2 in Air	21.8	0.0	0.0
21.9% O2 in Air	21.9	0.0	0.0
22.0% O2 in Air	22.0	0.0	0.0
22.1% O2 in Air	22.1	0.0	0.0
22.2% O2 in Air	22.2	0.0	0.0
22.3% O2 in Air	22.3	0.0	0.0
22.4% O2 in Air	22.4	0.0	0.0
22.5% O2 in Air	22.5	0.0	0.0
22.6% O2 in Air	22.6	0.0	0.0
22.7% O2 in Air	22.7	0.0	0.0
22.8% O2 in Air	22.8	0.0	0.0
22.9% O2 in Air	22.9	0.0	0.0
23.0% O2 in Air	23.0	0.0	0.0
23.1% O2 in Air	23.1	0.0	0.0
23.2% O2 in Air	23.2	0.0	0.0
23.3% O2 in Air	23.3	0.0	0.0
23.4% O2 in Air	23.4	0.0	0.0
23.5% O2 in Air	23.5	0.0	0.0
23.6% O2 in Air	23.6	0.0	0.0
23.7% O2 in Air	23.7	0.0	0.0
23.8% O2 in Air	23.8	0.0	0.0
23.9% O2 in Air	23.9	0.0	0.0
24.0% O2 in Air	24.0	0.0	0.0
24.1% O2 in Air	24.1	0.0	0.0
24.2% O2 in Air	24.2	0.0	0.0
24.3% O2 in Air	24.3	0.0	0.0
24.4% O2 in Air	24.4	0.0	0.0
24.5% O2 in Air	24.5	0.0	0.0
24.6% O2 in Air	24.6	0.0	0.0
24.7% O2 in Air	24.7	0.0	0.0
24.8% O2 in Air	24.8	0.0	0.0
24.9% O2 in Air	24.9	0.0	0.0
25.0% O2 in Air	25.0	0.0	0.0
25.1% O2 in Air	25.1	0.0	0.0
25.2% O2 in Air	25.2	0.0	0.0
25.3% O2 in Air	25.3	0.0	0.0
25.4% O2 in Air	25.4	0.0	0.0
25.5% O2 in Air	25.5	0.0	0.0
25.6% O2 in Air	25.6	0.0	0.0
25.7% O2 in Air	25.7	0.0	0.0
25.8% O2 in Air	25.8	0.0	0.0
25.9% O2 in Air	25.9	0.0	0.0
26.0% O2 in Air	26.0	0.0	0.0
26.1% O2 in Air	26.1	0.0	0.0
26.2% O2 in Air	26.2	0.0	0.0
26.3% O2 in Air	26.3	0.0	0.0
26.4% O2 in Air	26.4	0.0	0.0
26.5% O2 in Air	26.5	0.0	0.0
26.6% O2 in Air	26.6	0.0	0.0
26.7% O2 in Air	26.7	0.0	0.0
26.8% O2 in Air	26.8	0.0	0.0
26.9% O2 in Air	26.9	0.0	0.0
27.0% O2 in Air	27.0	0.0	0.0
27.1% O2 in Air	27.1	0.0	0.0
27.2% O2 in Air	27.2	0.0	0.0
27.3% O2 in Air	27.3	0.0	0.0
27.4% O2 in Air	27.4	0.0	0.0
27.5% O2 in Air	27.5	0.0	0.0
27.6% O2 in Air	27.6	0.0	0.0
27.7% O2 in Air	27.7	0.0	0.0
27.8% O2 in Air	27.8	0.0	0.0
27.9% O2 in Air	27.9	0.0	0.0
28.0% O2 in Air	28.0	0.0	0.0
28.1% O2 in Air	28.1	0.0	0.0
28.2% O2 in Air	28.2	0.0	0.0
28.3% O2 in Air	28.3	0.0	0.0
28.4% O2 in Air	28.4	0.0	0.0
28.5% O2 in Air	28.5	0.0	0.0
28.6% O2 in Air	28.6	0.0	0.0
28.7% O2 in Air	28.7	0.0	0.0
28.8% O2 in Air	28.8	0.0	0.0
28.9% O2 in Air	28.9	0.0	0.0
29.0% O2 in Air	29.0	0.0	0.0
29.1% O2 in Air	29.1	0.0	0.0
29.2% O2 in Air	29.2	0.0	0.0
29.3% O2 in Air	29.3	0.0	0.0
29.4% O2 in Air	29.4	0.0	0.0
29.5% O2 in Air	29.5	0.0	0.0
29.6% O2 in Air	29.6	0.0	0.0
29.7% O2 in Air	29.7	0.0	0.0
29.8% O2 in Air	29.8	0.0	0.0
29.9% O2 in Air	29.9	0.0	0.0
30.0% O2 in Air	30.0	0.0	0.0

Manual

Gasmischer

NITROX
 + **TECHNICAL DIVING**
 Verband Deutscher Sporttaucher e.V.

OX

Jutta Arens
 Steffen G. Scholz

Gasmischer Manual

Copyright

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Autoren nach bestem Wissen erarbeitet und von ihnen selbst und dem Verband Deutscher Sporttaucher (VDST) mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Gleichwohl sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen. Daher erfolgen die Angaben ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des VDST oder der Autoren. Der Verband und die genannten Personen übernehmen deshalb keinerlei Verantwortung und Haftung für jegliche inhaltliche Unrichtigkeiten und daraus entstehende Schäden.

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, bleiben vorbehalten. Kein Teil des Werks darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der Autoren reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Copyright 2006 by Jutta Arens und Steffen G. Scholz

Printed in Germany

1. Auflage, Januar 2006

Impressum

Autoren:	Jutta Arens Steffen G. Scholz
Koautor:	Dr. Martin Steiner
Titelbild und Gestaltung	luzia schneider presentationen, Aichwald
Abbildungen:	Jutta Arens Volkmar Lehnen Dr. Martin Steiner Bauer Kompressoren
Lektorat:	Dr. Julia Becker, Cardiff Tom Karch, Münster Klaus Kisters, Neuss Jörg Schwerdtfeger, Aachen Dr. Martin Steiner, Kiel

Vorwort

Sicheres Tauchen mit Nitrox und Mischgas ist seit einigen Jahren Ziel der Ausbildungsbemühungen des VDST. Nitrox und andere Mischgase selber herzustellen ist dabei eine Facette, der eine wichtige Bedeutung zukommt.

Nitrox Tauchen ist mittlerweile weltweit ein fester Bestandteil der Tauchausbildung und auch das Mischgastauchen erfreut sich immer größerer Beliebtheit, erlaubt es uns doch, größere Tiefen sicher aufzusuchen. Der Tauchgang an sich ist in dieser Sportart oft nur der krönende Abschluss einer ganzen Reihe wichtiger Schritte. So stellt das Training im Team, der Bereich der Gasherstellung und Analyse sowie die Vorbereitung der Ausrüstung wichtige Ansprüche an Teamgeist und routiniertes Verhalten. Ziel der VDST Ausbildung in diesem Bereich ist es, Sicherheitsstandards zu etablieren, die Tauchgänge auch in größere Tiefen sicher möglich machen.

Über dieses Manual

Dieses Manual richtet sich an den interessierten Mischgas- und Nitrox-Taucher, der Ambitionen hat, seine Atemgase selber herzustellen. Es ist Leitlinie für Vereine, die Mischlogistik für ihre Mitglieder anbieten und soll Kurs begleitend zum Lehrgang Gasmischer im VDST eingesetzt werden. In den einzelnen Kapiteln wird umfassend auf alle relevanten Bereiche eingegangen und anhand vieler detaillierter Abbildungen die Vorgehensweisen illustriert. Alle Abbildungen des Manuals finden sich auf der CD "Lehrfoliensatz Gasmischer" des VDST, die eine Präsentation und zusätzliche Informationen für Tauchausbilder enthält. Grundlage für die Ausbildung Gasmischer des VDST ist die Ausbildungsordnung Nitrox und Technisches Tauchen des VDST in der jeweils gültigen Fassung.

Dank

Wir möchten uns an dieser Stelle bei allen Mitstreitern und insbesondere bei den Mitgliedern der TAK Nitrox und Technisches Tauchen bedanken, die uns bei der Erstellung dieses Manuals tatkräftig unterstützt haben. Insbesondere die Kommentare zu den in diesem Manual verwendeten Abbildungen waren von großem Wert.

Besonderer Dank gilt auch Dr. Martin Steiner, der die Kapitel Physik und das Kapitel zu der von ihm entwickelten Mischsoftware "Mischgas VDST" verfasst hat.

Luzia Schneider hat dankenswerterweise das Cover zu diesem Buch entworfen.

Vielen Dank auch der VDST Service GmbH für die zu leistenden Arbeiten im Bereich der Vertriebsvorbereitung.

Jutta Arens & Steffen G. Scholz

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	2
Inhaltsverzeichnis.....	3
Einleitung	5
Gasmischerkurs.....	6
Tauchgase	7
Luft.....	7
Nitrox	8
Trimix	9
Sauerstoff	11
Heliox.....	11
Argon	12
Andere	13
Gasgrenzwerte.....	15
Sauerstoffpartialdruck (pO ₂)	15
END – Equivalent Narcotic Depth (Äquivalente Narkosetiefe).....	15
Kohlendioxid	15
Reingase.....	16
Sauerstoff	16
Helium.....	21
Stickstoff	22
Argon	22
Allgemeines	23
Physikalische Grundlagen	
Autor: Dr. Martin Steiner.....	25
Ideale Gase	25
Reale Gase.....	29
Mischverfahren und -anlagen.....	34
Partialdruck-Verfahren	34
Nitrox-Membran-Verfahren	37
Konstantbeimischungsverfahren.....	40
Gravimetrisches Verfahren	41

Premix-Verfahren.....	42
Mischungsberechnung	43
Berechnungsformeln.....	43
PC-Programm "Mischgas VDST" Autor: Dr. Martin Steiner	46
Top Up Tabellen Nitrox und Trimix	55
Mischpraxis	60
Mischen von Nitrox	62
Mischen von Trimix.....	63
Umgang mit Kompressor und Personal Filter	65
Füllprotokoll	68
Gasanalyse	69
Analyse und Etikettierung	70
Analysegeräte.....	72
Vorschriften und Normen	75
Transport von Druckbehältern	75
Kennzeichnung von Druckgasbehältern	76
Prüffristen	78
Gewindenormen	78
Weiterführende Literatur im Internet.....	80

Einleitung

Nachdem schon seit einigen Jahren die Entwicklung zu beobachten ist, dass sich das Tauchen mit Nitrox besonders in Urlaubsgebieten immer größerer Beliebtheit erfreut und auch in Deutschland immer weiter Einzug hält, wird auch der Bedarf an Füllmöglichkeiten immer größer. Zusätzlich setzt eine, wenn auch langsame, Entwicklung ein Weg vom Tieftauchen mit Luft hin zum sichereren und erlebnisreicheren Tauchen mit Trimix auch im Sporttauchbereich. Da es bisher kaum Füllstationen gibt, die Trimix mischen können, ist der Bedarf groß, das Mischen selber zu erlernen und entweder im Verein oder auch privat zu Hause eine entsprechende Fülllogistik aufzubauen.

Dieses Manual soll eine Orientierungshilfe und Einführung in die verschiedenen Bereiche des Gase Mischens sein, kann und soll aber die Teilnahme an einem Gasmischerkurs und einem entsprechenden Nitrox-, Triox- und/oder Trimix-Kurs nicht ersetzen.

Achtung: Der Umgang mit Druckgasen insbesondere mit Sauerstoff ist ebenso wie das Tauchen mit Mischgasen gefährlich und sollte nicht ohne die entsprechende Fachkenntnis und Ausbildung durchgeführt werden.

Wann und wo solche Kurse stattfinden kann den entsprechenden Ausschreibungen im Sporttaucher und auf den VDST Webseiten Nitrox & Technisches Tauchen (www.vdstnitrox.de) entnommen werden. Auf den Webseiten finden sich auch die abnahmeberechtigten Tauchlehrer und weitere Infos zum Thema.

Alle Informationen in diesem Manual wurden von den Autoren mit größter Sorgfalt zusammengestellt, trotzdem können sich immer mal Fehler einschleichen. Da die Qualität eines solchen Manuals auch immer mit von den zurückfließenden Informationen der Leser und Nutzer abhängt, bitten die Autoren um jegliche Form der Rückmeldung, sei es Lob (wer hört das nicht gerne!), vor allem aber konstruktive Verbesserungsvorschläge und nötige Ergänzungen. Auf diese Art und Weise kann das Manual in den nächsten Auflagen stetig verbessert und an die Bedürfnisse seiner Nutzer angepasst werden.

Jegliche Anmerkungen bitte an die Adresse:

gasmischer@nitrox-tec.vdst.de

senden.

Gasmischerkurs

Voraussetzungen:

DTSA*; ersatzweise genügt eine vergleichbare Qualifikation entsprechend der VDST-Äquivalenzliste. DTSA Nitrox* wird empfohlen.
Mindestalter: 18 Jahre

Theorie:

Schriftliche Prüfung

Praxis:

Mischen einer Standardmischung in ein leeres DTG¹. Mischen in ein DTG mit Restdruck und abweichender Restmischung. Analysieren und Dokumentieren der Gemische.

Kursziel:

Der Bewerber soll in Theorie und Praxis mit dem sicheren Umgang von Gasen vertraut gemacht werden und Gasgemische unter Einhaltung der Vorschriften herstellen können

Die genauen Bedingungen sind der aktuellen Prüfungsordnung unter www.vdstnitrox.de (im Downloadbereich) zu entnehmen.

¹ DTG: DruckluftTauchGerät

Tauchgase

Es wurden und werden die verschiedensten Gase zum Tauchen verwendet. Hier soll zunächst ein kurzer Abriss der zum Tauchen nutzbaren Gase und Gasgemische gegeben werden, bevor auf die Herstellung dieser Gase eingegangen wird.

Luft

Luft ist auf Grund ihres natürlichen Vorkommens das am häufigsten von Tauchern verwendete Gasgemisch. Im Bereich des Sporttauchens wird vereinfachend davon ausgegangen, dass Luft aus 21 % Sauerstoff und 79 % Stickstoff besteht. Eine genaue Aufschlüsselung der Bestandteile liefert Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft (Quelle: Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, Abteilung Stadtklimatologie)

Gas	Chemisches Zeichen	Volumenanteil	Massenanteil
Stickstoff	N₂	78,084 %	75,51 %
Sauerstoff	O₂	20,946 %	23,01%
Argon	Ar	0,934 %	1,289 %
Kohlendioxid	CO ₂	0,035 % 0,026 %*	0,04 %
Neon	Ne	18,18 ppm	12 ppm
Helium	He	5,24 ppm	7 ppm
Methan	CH ₄	1,6 ppm 0,7 ppm*	9 ppm
Krypton	Kr	1,14 ppm	3 ppm
Wasserstoff	H ₂	0,5 ppm	0,04 ppm
Distickstoffoxid	N ₂ O	0,3 ppm	0,05 ppm
Kohlenmonoxid	CO	0,2 ppm	0,02 ppm
Xenon	Xe	0,087 ppm	0,4 ppm
Summe		99,998%	
* vorindustriell 1 ppm (part per million) = 10 ⁻⁴ Volumenprozent (Vol.-%)			

Der Verwendung von Luft als Atemgas sind aber durch die Narkosewirkung von Stickstoff und Sauerstoff und durch die toxische Wirkung des Sauerstoffs (siehe auch Kapitel "Gasgrenzwerte") Tiefengrenzen gesetzt.

Nitrox

Die Bezeichnung "Nitrox" ist ein Kunstwort, das sich aus den wissenschaftlichen Bezeichnungen für Stickstoff (**Nitrogenium**) und Sauerstoff (**Oxygenium**) zusammensetzt. Als Nitrox werden beim Sporttauchen Gasgemische bezeichnet, die aus Stickstoff und Sauerstoff in verschiedenen Mengenanteilen bestehen. Die Höhe des Sauerstoffanteils wird variabel gewählt in Abhängigkeit von Einsatztiefe und Einsatzdauer. Nitrox wird eingesetzt, um längere Nullzeiten zu erzielen oder um mit einer höheren Sicherheit innerhalb der Nullzeitgrenzen von Luft zu tauchen. Zudem wird es als Dekogas für eine effizientere Dekompression genutzt.

Durch die in etwa gleiche Narkosewirkung von Sauerstoff und Stickstoff ist Nitrox aber keine Lösung für das Problem des Tiefenrausches!

Die Bezeichnung der verschiedenen Nitrox-Gemische erfolgt nach den Schemata in Abbildung 1.

Reiner Sauerstoff zur Dekompression nimmt, was die Bezeichnung angeht, eine Sonderstellung ein: Er kann (z. B. auf Analyse-Etiketten) mit EAN 100 oder besser mit Oxy 100 bezeichnet werden.

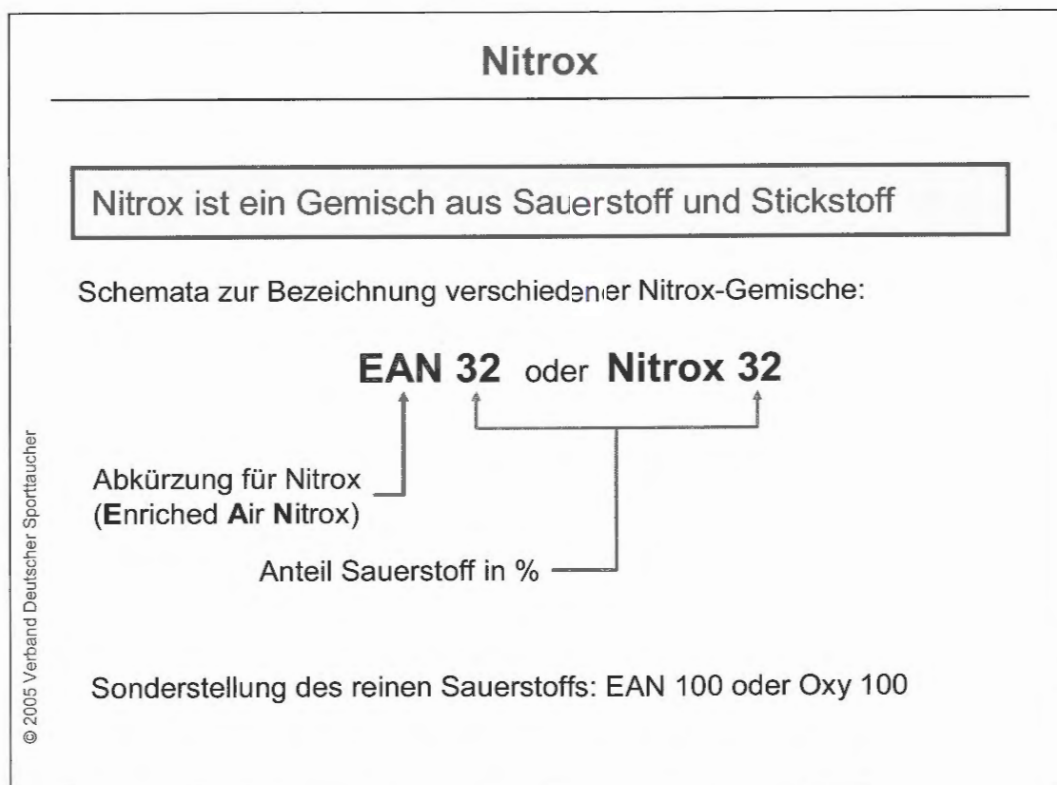


Abbildung 1: Bezeichnungsschemata Nitrox

Die gebräuchlichsten Nitrox-Gemische mit ihrer jeweiligen maximalen Einsatztiefe (MOD) und ihrem üblichen Einsatzzweck werden in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Gebräuchliche Nitrox-Gemische

Nitrox	O ₂ -Gehalt	N ₂ -Gehalt	MOD pO _{2, max} =1,6 bar	Einsatz als
Nitrox 21 / Luft	21 %	79 %	40 m (66 m)	Grundgemisch
Nitrox 28 / EAN 28	28 %	72 %	40 m (47 m)	
Nitrox 32 / EAN 32	32 %	68 %	40 m	
Nitrox 36 / EAN 36	36 %	64 %	34 m	
Nitrox 40 / EAN 40	40 %	60 %	30 m	
Nitrox 50 / EAN 50	50 %	50 %	21 m	Dekogemisch
Sauerstoff oder Oxy 100	100 %	0 %	6 m	

Die Werte in Klammern sind die rein nach dem maximalen Sauerstoffpartialdruck von 1,6 bar berechneten MOD-Werte, die aber auf Grund der Narkosewirkung des Gemisches und den empfohlenen Grenzwerten keinen Sinn machen.

Trimix

Als Trimix wird im Bereich des Tauchens ein Gemisch aus Sauerstoff, Helium und Stickstoff bezeichnet. Trimix wird eingesetzt, da durch den Einsatz von Helium die Narkosewirkung des Atemgases deutlich reduziert wird, also ohne Tiefenrausch auch auf größeren Tiefen getaucht werden kann. Das Trimix-Gemisch muss aber hinsichtlich der Narkosetiefe (END) und des Sauerstoffpartialdrucks auf die jeweilige Tiefe "eingestellt" werden (siehe Kapitel "Gasgrenzwerte").

Der VDST empfiehlt hierfür, ebenso wie viele andere Ausbildungsverbände, die Verwendung von Standardgemischen (Tabelle 3), da sie das Mischen, die Dekompressionsberechnung und das Tauchen im Team erleichtern:

Einerseits können so Standard-Mischtabellen für diese Standardgase genutzt werden, die ein jeweiliges erneutes Berechnen einer jeden Mischung unnötig machen. Andererseits können Dekompressionstabellen für die einzelnen Standardgase und entsprechende Tiefen erstellt werden, die immer wieder genutzt werden können und die so dazu beitragen, Erfahrungen in praktischer Dekompression aufzubauen. Wird dagegen mit jeweils anderen Gemischen getaucht, muss sowohl der Mischplan als auch der Dekoplan jedes Mal neu erstellt werden. Erfahrungswerte hinsichtlich der Dekompression sind auf Grund der immer wieder andersartigen Gase kaum vergleichbar.

Zudem ist beim konsequenten Einsatz von standardisierten Gasen sichergestellt, dass alle Tauchpartner im Team die gleichen Gase nutzen (sowohl Grundgemische als auch Dekogase), somit die gleichen Dekompressions-Voraussetzungen haben und in einem Notfall eine sinnvolle Gasspende an den Tauchpartner möglich ist.

Tabelle 3: Trimix-Standardgemische des VDST

MOD [m]	Gas	fO ₂ [%]	fHe [%]	fN ₂ [%]	Einsatz als
90	Tx 12/60	12	60	28	Grundgemisch
75	Tx 15/55	15	55	30	
60	Tx 18/45	18	45	37	
45	Tx 21/35	21	35	44	
36	Tx 30/30	30	30	40	
36	Tx 35/35	35	35	30	Dekogemisch
21	Tx 50/15	50	15	35	
6	Oxy 100	100	0	0	

Die Bezeichnung von Trimix (siehe Abbildung 2) nennt zuerst den Sauerstoffgehalt des Gemisches und an zweiter Stelle den Heliumgehalt:

Ein Tx 21/35 ist also ein Trimix mit 21 % Sauerstoff (1. Zahl) und 35 % Helium (2. Zahl).

Achtung: In manchen Ländern wird diese Konvention nicht eingehalten! Auch deshalb müssen alle Gemische vor dem Tauchen selber vom Taucher analysiert werden!

Das gleiche Bezeichnungsschema gilt auch für das so genannte Triox. Die Bezeichnung Triox wird üblicherweise für Trimix-Gemische verwendet, die im Sporttauchbereich zum Einsatz kommen und einen Sauerstoffgehalt von mindestens 21 % (norm- und hyperoxisches Trimix) haben.

Trimix sollte nicht zur Befüllung des Trockentauchanzuges genutzt werden, da es durch den Heliumanteil eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit aufweist und so zur schnelleren Auskühlung des Tauchers beiträgt. Es sollte stattdessen auf ein separates Tariergas wie Argon (siehe Kapitel "Argon") oder Luft zurückgegriffen werden.

Trimix

Trimix ist ein Gemisch aus Sauerstoff, Helium und Stickstoff

Schema zur Bezeichnung von Trimix-Gemischen:

Tx 18/45

Manchmal werden Sauerstoff- und Heliumgehalt vertauscht angegeben, deshalb:

Alle Gemische vor dem Tauchgang selbst analysieren!

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 2: Bezeichnungsschema Trimix

Sauerstoff

Sauerstoff kommt als Reingas zu Dekompressionszwecken und als Atemgasbestandteil, also zum Herstellen von Nitrox, Trimix und Heliox, zum Einsatz.

Sauerstoff gilt als etwa gleich narkotisch wie Stickstoff, obwohl das narkotische Potenzial, bestimmt über die Lipidlöslichkeit, eigentlich um ca. Faktor 1,7 höher liegt. Mögliche Erklärungen für die trotzdem in etwa vergleichbare Narkosewirkung sind die unterschiedlichen Transportmechanismen von Stickstoff (geht im Blut physikalisch in Lösung) und Sauerstoff (chemische Bindung an Hämoglobin) im Körper und die teilweise Verstoffwechslung des Sauerstoffs.

Heliox

Heliox ist ein Gasgemisch, das nur aus Sauerstoff und Helium besteht. Dieses Gasgemisch ist auf Grund des hohen Helium-Preises recht teuer und wird daher eher selten, hauptsächlich für sehr tiefe Tauchgänge mit langen Grundzeiten eingesetzt, bei denen der Einfluss der geringen Dichte des Heliums auf die Atemarbeit der Taucher unerlässlich ist.

Argon

Argon findet bei Tauchern auf Grund seiner niedrigen Wärmeleitfähigkeit Anwendung als Tarier- bzw. Isolationsgas für Trockentauchanzüge. Es hat einen um ca. Faktor 9 geringeren Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten als Helium (Abbildung 3) und kann so gerade auch in Hinblick auf lange Tauchgänge maßgeblich zur Verringerung des Wärmeverlustes des Tauchers beitragen.

Argon	
Gas	Wärmeleitfähigkeitskoeffizient (bei 1 bar, 20° C)
Helium	0,144
Stickstoff	0,026
Sauerstoff	0,026
Argon	0,016
CO ₂	0,016

Unterschied:
Faktor 9!

Argon: niedrige Wärmeleitfähigkeit
➔ gutes Isolationsgas im Trockentauchanzug

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 3: Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten von Gasen

Beste Isolations-Ergebnisse mit einem Argon-gefüllten Trockentauchanzug erhält man, wenn vor dem Tauchgang der Anzug mehrmals nacheinander komplett mit Argon befüllt und wieder entleert wird. So wird auch die im Unterzieher befindliche Luft durch Argon ausgespült und ersetzt.

Achtung: Auf Grund seiner sehr hohen Narkosewirkung (ca. 2,3-mal höher als die von Stickstoff (Abbildung 4)) sollte Argon niemals als Atemgasbestandteil eingesetzt werden!

Zudem weist Argon eine deutlich höhere Dichte als Sauerstoff, Stickstoff und Helium auf, wodurch bei Argon als Atemgasbestandteil die Atemarbeit und das Risiko des Esoufflements erhöht würden.

Kommt Argon als Tariergas zum Einsatz, muss die Argon-Flasche deutlich sichtbar mit der Aufschrift "Argon" gekennzeichnet werden, um ein versehentliches Atmen von Argon zu verhindern.

Argon		
Gas	Relatives Narkotisches Potenzial	Dichte [kg/m ³] (bei 1 bar, 0° C)
Helium	0,2	0,1785
Stickstoff	1,0	1,250
Sauerstoff *	1,7	1,429
Argon	2,3	1,784
CO ₂	20,0	1,977

Argon: hohes narkotisches Potenzial
hohe Dichte (Atemarbeit!)
➔ niemals als Atemgasbestandteil nutzen

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 4: Narkotisches Potenzial und Dichte von Gasen

Andere

Weitere Gase mit denen experimentiert wurde, sind zum Beispiel:

- **Argox**, ein Gemisch aus Argon und Sauerstoff. Wegen der hohen Narkosewirkung von Argon, wurde mit Argox nur als Dekogas experimentiert. Allerdings stellte die COMEX² Versuche mit Argox als Dekogas ein, nachdem bei einigen Probanden nicht erklärbare Effekte auftraten und eine Verbesserung der Dekoqualität gegenüber anderen Gasen nicht feststellbar waren.
- **Neox** wurde ebenfalls von der COMEX getestet. Es fand seinen Einsatz bei Tests jenseits der 400 m, da Neon eine ähnlich niedrige Narkosewirkung hat, wie Helium. Aber auch hier klagten die

² COMEX: Forschungsgruppe im Bereich Tiefseetauchen, gegründet 1961 in Marseille von Henri G. Delauze.

1972: Gründung der Comex Pro: Schwerpunkte Hyperbare Technologien und Tiefsee Tauchen (bemannt und unbemannt)

Probanden über verschiedene Beschwerden, die mal auftraten, mal nicht und es wurde von weiteren Tests abgesehen. Zusätzlich ist Neon in der Beschaffung extrem teuer.

- **Hydreliox** ist ein Gasgemisch aus Wasserstoff und Sauerstoff. Auf Grund der sehr geringen Dichte von Wasserstoff, ist dieses Gas besonders in großen Tiefen leichter zu atmen als alle anderen Gase. Die geringe Dichte stellt aber auch extrem hohe Ansprüche an die Dichtung von jeglichen Behältern. Zudem sollte der Sauerstoffgehalt einer Hydreliox-Mischung aus Sicherheitsgründen 2,5 % nicht überschreiten, da ansonsten mit einer sehr heftigen explosionsartigen Reaktion gerechnet werden muss.

Achtung: Die Gefahr einer solchen so genannten Knallgasreaktion ist zwar unter sehr hohen Sicherheitsvorkehrungen in einer Druckkammer beherrschbar, jedoch keines Falls im Sporttauchbereich!

- **HeliAir** ist ein Gemisch aus Helium und Luft und damit eine Sonderform des Trimix, das aber in der Herstellung von den üblichen Trimix-Gemischen abweicht.

Die Herstellung von HeliAir erfolgt durch das Mischen von Helium mit Luft, es wird also kein zusätzlicher reiner Sauerstoff beigemischt. Da hierdurch zu keiner Zeit mit einer Sauerstoffmischung über 21 % umgegangen wird, stellt dieses Verfahren keinerlei Anspruch auf Sauerstoffreinheit oder Sauerstoffverträglichkeit.

Allerdings lassen sich mit diesem Verfahren nur Gemische mit einem sehr geringen Heliumgehalt in Relation zum Sauerstoffgehalt herstellen, da der enthaltene Sauerstoff ausschließlich durch die Luft zugeführt wird. Dadurch führt das Tauchen mit HeliAir zu Tauchgängen mit inakzeptabler Narkosetiefe.

Beispiel: ein HeliAir mit 15 % Sauerstoff würde bei einem Enddruck von 220 bar nur 28 % Helium enthalten. Bei einer maximalen Tauchtiefe von 75 m ($\Rightarrow p_{O_2} = 1,275 \text{ bar}$) entspräche das einer Narkosetiefe von 51 m!

Es wird daher von der Verwendung von HeliAir abgeraten! Es sollte stattdessen ein geeignetes Trimix-Gemisch zur Anwendung kommen (siehe Tabelle 3)!

Gasgrenzwerte

Die folgenden Gasgrenzwerte müssen unbedingt in die Tauchgangsplanung und die Herstellung des dafür vorgesehenen Gasgemisches mit einbezogen werden. Alle Grenzwerte verstehen sich als Obergrenzen, die immer zur sicheren Seite gerundet werden müssen bzw. bei langen Grundzeiten deutlich unterschritten werden sollten.

Sauerstoffpartialdruck (pO₂)

- 0,16 bar als absolute Untergrenze in allen Situationen
- 1,30 bar beim Grundgemisch bei Tauchgängen mit Gaswechsel
- 1,40 bar bei Tauchgängen ohne Gaswechsel und nicht idealen Bedingungen oder bei Nutzung von Triox
- 1,60 bar auf Dekompressionsstopps und bei Tauchgängen mit idealen Bedingungen

END – Equivalent Narcotic Depth (Äquivalente Narkosetiefe)

$$\text{END} = ((f\text{O}_2 + f\text{N}_2) \cdot p_{\text{Umgebung}} - 1\text{bar}) \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{bar}}$$

- 30 m → es ist sicher mit Narkose-Symptomen zu rechnen!
Empfohlene Obergrenze für anspruchsvolle Tauchgänge
- 40 m empfohlene Obergrenze für Sporttauchgänge

Die END sollte immer auf Basis der Narkosewirkung von Stickstoff und Sauerstoff berechnet werden (siehe Kapitel "Reingase" → "Sauerstoff")!

Kohlendioxid

Max. 0,05 bar im arteriellen Blut (≥ 0,06 bar = Hyperkapnie)

Reingase

Hier sollen kurz die Reingase, die zur Herstellung der beschriebenen Tauchgase benötigt werden, ihre Besonderheiten und der Umgang mit ihnen beschrieben werden.

Sauerstoff

(Engl. oxygen, von griech. oxýs "scharf, sauer" und genes "erzeugend")

Sauerstoff wurde 1774 unabhängig voneinander durch den Engländer Joseph Priestley und den deutsch-schwedischen Apotheker Carl Wilhelm Scheele entdeckt. Allerdings konnten sie die Rolle des Sauerstoffs bei der Verbrennung nicht erklären. Dafür sorgte der Franzose Antoine Lavoisier. Er kam bei Experimenten zu dem Ergebnis, dass sich ein Stoff bei der Verbrennung mit Sauerstoff verbindet. Er wies mit einer Waage nach, dass ein Stoff beim Brennen nicht leichter, sondern schwerer wird. Der Grund hierfür ist das Gewicht des Sauerstoffs, der während der Verbrennung aufgenommen wird.

Sauerstoff stellt in der Erdhülle mit 49,4 Masse-% das häufigste, im Weltall das dritthäufigste Element dar.

Eine bedeutende Form des Sauerstoffs ist der molekulare Sauerstoff, eine Verbindung zweier Sauerstoffatome (chemische Summenformel: O_2). Unter Normalbedingungen handelt es sich um ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas. Es findet sich als Bestandteil der Luft und in Gewässern gelöst. Häufig kommt Sauerstoff aber auch in Verbindungen mit anderen Elementen als Oxid vor (z. B. als Sand (SiO_2) oder Wasser (H_2O)). Atomarer Sauerstoff, also Sauerstoff in Form freier, einzelner Sauerstoffatome, kommt unter natürlichen Bedingungen nicht oder nur sehr kurzfristig vor.

Industriell hergestellter Sauerstoff kann auf zwei Arten gewonnen werden:

1. aus Luft mittels des Verfahrens der Luftverflüssigung nach Linde
Professor Dr. Carl Paul Gottfried von Linde entdeckte 1901, dass durch Ausnutzung des Joule-Thomson-Effekts mittels einer Drosseldüse und mit Hilfe eines nachgeschalteten Gegenströmers auf wirtschaftliche Weise Luft verflüssigt werden kann. Auf Grund der unterschiedlichen Siedepunkte der Luftbestandteile können diese durch eine fraktionierte Destillation der verflüssigten Luft voneinander getrennt und nacheinander abgepumpt werden. So kann nicht nur Sauerstoff sondern auch Stickstoff und Argon etc. aus der Luft gewonnen werden.
2. aus Wasser mittels Elektrolyse
Zur Aufspaltung von Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) durch Elektrolyse wird Gleichstrom an Wasser

angelegt. Dies geschieht mittels eines Minuspols aus Eisen (Katode) und eines Pluspols (Anode) aus Nickel und einer Erhöhung der Leitfähigkeit des Wassers durch Zugabe von Natrium- oder Kaliumhydroxid. Durch die anliegende Spannung scheiden sich der Wasserstoff an der Katode und der Sauerstoff an der Anode ab. Die beiden Gase müssen sehr sorgfältig getrennt werden, um eine so genannte Knallgasreaktion (Wasserstoff und Sauerstoff reagieren explosionsartig wieder zu Wasser) zu vermeiden.

Wie bereits im Kapitel Tauchgase aufgeführt, wird Sauerstoff sowohl als Dekompressionsgas als auch als Bestandteil von Mischungen wie Nitrox und Trimix verwendet.

Sauerstoff ist ein stark oxidierendes also ein Brand förderndes Gas. Materialien, die an atmosphärischer Luft brennen, brennen unter Sauerstoff-Einfluss um ein vielfaches schneller. Dies gilt umso mehr, je höher der Sauerstoffpartialdruck und je höher die Temperatur ist.

Sauerstoff ist aber selber nicht brennbar sondern es ist das Zusammenspiel von Brennstoff, Sauerstoff und einer Zündenergie nötig (Abbildung 5). Unter entsprechenden Voraussetzungen kann es dann nicht nur zur Verbrennung sondern auch zur Explosion kommen.

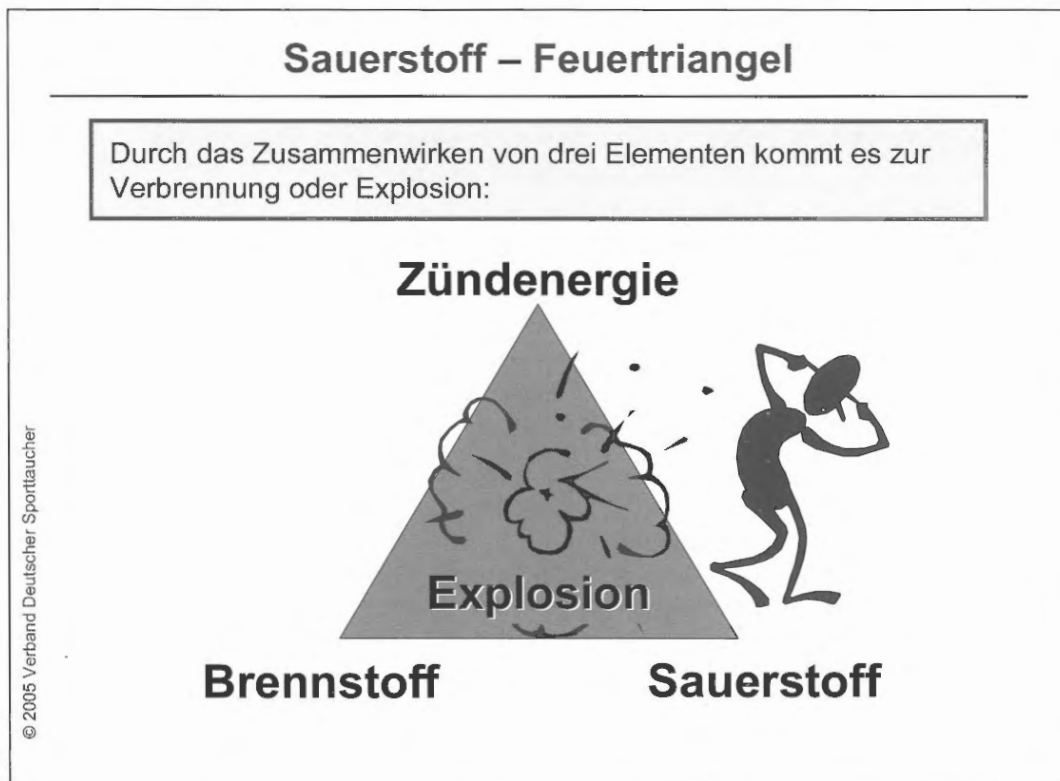


Abbildung 5: Feuertriangel

Als Brennstoff im Sinne der Feuertriangel müssen alle nicht O₂-kompatiblen Materialien und Verschmutzungen betrachtet werden. Je

größer die Oberfläche der Materialien ist, desto größer ist die Fläche, die oxidiert werden kann und dementsprechend anfälliger ist das Material für eine Verbrennung.

Je höher dann der herrschende Sauerstoff-Partialdruck ist, desto intensiver fällt die Verbrennung aus.

Den eigentlichen Startschuss für die Verbrennungsreaktionen gibt aber die Zündenergie. Sie kann aus verschiedensten Quellen stammen: aus Kompressionswärme, Druckstößen, Reibungswärme in Folge hoher Strömungsgeschwindigkeiten, einer chemischen Reaktion, einer elektrostatischen Entladung oder Funkenflug z. B. durch das Anschlagen von Rostpartikeln an der Flaschenwandung.

Daher stellt die Verwendung sowohl von reinem Sauerstoff als auch von sauerstoffangereicherten Gemischen besondere Anforderungen an die verwendete Ausrüstung (Abbildung 6).

In Deutschland müssen alle Gase mit einem Sauerstoffgehalt von über 22 % wie reiner Sauerstoff³ gehandhabt werden!

Sauerstoff – Tauglichkeit

sauerstofftauglich = sauerstoffverträglich + sauerstoffrein

O₂-verträglich: **Materialien, die unter Druck und Temperatur nicht mit Sauerstoff reagieren.**

Beispiele:

- Messing, Edelstahl, Kupfer
- Viton-O-Ringe (FKM/FPM: Fluorkarbon-Elastomer)
- Spezielle Schmiermittel (Chistolube, Krytox GPL204)

O₂-rein: **Alle verwendeten Gegenstände müssen frei von brennbaren Verunreinigungen sein.**

Beispiele:

- Öle und Fette (auch normale Fingerabdrücke!)
- Reinigungsmittelrückstände
- Rostpartikel
- Farbe (Markierungsstifte)

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 6: Sauerstofftauglichkeit

Alle Werkstoffe, die mit Sauerstoff oder Gemischen, die wie Sauerstoff gehandhabt werden müssen, in Berührung kommen, müssen sauerstoff-

³ Im Gegensatz zu der Regelung in Deutschland gilt in vielen anderen Ländern ein Grenzwert von 40 % Sauerstoffanteil.

tauglich sein. Dies bedeutet, dass sie aus sauerstoffverträglichen Werkstoffen bestehen und sauerstoffrein sein müssen.

Sauerstoffverträglich sind solche Materialien, die auch unter erhöhtem Druck und erhöhter Temperatur nicht mit Sauerstoff reagieren.

Dies sind:

- bei den Metallen z. B. Edelstahl, Kupfer und Messing,
- bei den Kunststoffen z. B. Viton® (FKM/FPM (Fluor-Kautschuk)) und Hart-Teflon und
- bei den Schmiermitteln z. B. Christolube, Krytox Typ GPL 204 und Halocarbon Typ 25-10M Konsistenz NGLI 1

Normale O-Ringe aus NBR (Acrylnitril-Butadien-Kautschuk) sind nicht sauerstoffverträglich, d. h. sie altern schneller und verspröden.

Achtung: Die Farbe eines O-Rings erlaubt keinen Rückschluss auf das Material!

Alle Materialien sind aber nur dann auch sauerstoffrein, wenn sie frei von jeglichen brennbaren Stoffen oder Verunreinigungen sind.

Dies beinhaltet sowohl:

- die meisten Öle und Fette,
- Reinigungsmittelrückstände,
- Farbpartikel oder auch
- völlig normale Fingerabdrücke, da die menschliche Haut immer von einem minimalen Fettfilm überzogen ist, selbst wenn gerade die Hände gewaschen wurden.

Sauerstoffreinigung

Um z. B. einen Automaten oder ein Ventil in einen sauerstoffreinen Zustand zu bringen empfiehlt sich folgendes Vorgehen:

- Bauteile vollständig zerlegen
- Erst oberflächlich von grobem Fett reinigen, dann mit Aceton, Waschbenzin oder Silikonentferner gründlich entfetten.
- (Kalk-)Verkrustungen mit geeigneter Reinigungslösung z. B. mit Zitronensäurelösung oder 5%iger Essigsäurelösung im Ultraschallbad entfernen oder, falls kein Ultraschallgerät greifbar, einweichen und Verkrustungen mit Bürste entfernen.
- Danach alle Teile in heißer Waschmittel- oder Spülmaschinenreinigungslösung (ca. 60° C) im Ultraschallbad oder ebenfalls mit einer Bürste 10-15 min gründlich reinigen.
- Teile mehrfach nacheinander gründlich mit jeweils frischem Wasser abspülen, bis sich absolut keine Rückstände mehr auf den Bauteilen

befinden. Zur Kontrolle kann das Wasserbad überprüft werden und die Bauteile können unter einer UV-Lampe auf Rückstände untersucht werden.

- Ersetzen der aus nicht sauerstoffverträglichen Materialien hergestellten Bauteile durch verträgliche (NBR- durch Viton-O-Ringe)
- Auftragen von sauerstoffverträglichem Schmiermittel auf den erforderlichen Teilen
- Zusammenbau

Generell gilt bei der Reinigung und beim Zusammenbau:

- Puderfreie Handschuhe anziehen!
- Bei Verwendung von Lappen oder Wattestäbchen zur Reinigung auf anschließende Fussfreiheit der Bauteile achten!
- Erfolgt das Reinigen und Zusammenbauen zeitlich versetzt, alle Bauteile staubfrei Verpacken (z. B. Zipp-Lock-Beutel)!

Um bei allen sauerstofftauglichen Ausrüstungsgegenständen diesen Zustand aufrecht zu erhalten, muss an allen Kompressoren und Füllstationen, über deren einwandfreien Zustand Zweifel bestehen könnten, ein so genannter Personal Filter eingesetzt werden (Abbildung 7, siehe auch Kapitel "Mischpraxis").



Abbildung 7: Aufrechterhaltung der Sauerstofftauglichkeit

Generell gilt, dass der Filter aus Sicherheitsgründen bei jedem Füllvorgang zum Einsatz kommen sollte, um eine Kontamination der Tauchflasche und damit zwangsläufig auch der Lungenautomaten und anderer Ausrüstungsgegenstände zu vermeiden.

Helium

(engl. helium, griech. von hélios = Sonne)

Erste Hinweise auf Helium wurden 1868 von dem französischen Astronomen Pierre Janssen entdeckt. Bei Untersuchungen des Lichtspektrums der Chromosphäre der Sonne fand er die bis dahin unbekannte gelbe Spektrallinie von Helium.

Helium ist nach Wasserstoff das zweithäufigste Element des Periodensystems im Universum. In der Erdatmosphäre befinden sich aber nur ca. 0,0005 Vol.-%.

Helium ist ein farbloses, geruchloses, geschmackloses, ungiftiges, Edelgas, ist praktisch inert und liegt bei fast allen Bedingungen einatomar vor. Es ist nach Wasserstoff das chemische Element mit der geringsten Dichte. Es bleibt bis zu sehr tiefen Temperaturen gasförmig, erst bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (0 K oder -273,15 C) wird es flüssig. Es ist die einzige Substanz, die bei Normaldruck selbst am absoluten Nullpunkt nicht fest wird!

Unter normalen Bedingungen verhält es sich fast wie ein ideales Gas (siehe auch Kapitel "**Physikalische Grundlagen**") und hat einen negativen Joule-Thomson-Koeffizienten, erwärmt sich also bei Ausdehnung. Helium weist nach Wasserstoff die größte thermische Leitfähigkeit unter allen Gasen auf

Helium entsteht als Abfallprodukt der Kernfusion von Wasserstoff in Sternen. Auf der Erde entsteht es beim Zerfall verschiedener radioaktiver Elemente wie z. B. Uran oder Radium. Das so entstandene Helium sammelt sich in natürlichen Erdgas-Vorkommen in Konzentrationen von bis zu 7 Vol.-%. Aus Erdgas kann das Helium dann durch das Verfahren der fraktionierten Destillation extrahiert werden.

Achtung: Wurde ein Raum versehentlich mit Helium geflutet, muss vor Betreten des Raumes gelüftet werden. Helium sammelt sich in Räumen zunächst unter der Decke, da es eine geringere Dichte als Luft aufweist. Das Einatmen von reinem Helium führt auf Grund des fehlenden Sauerstoffs zu sofortiger Bewusstlosigkeit und in kurzer Folge zum Tod.

Auf Grund seiner geringen Dichte stellt Helium einen hohen Anspruch an alle Dichtungen.

Durch das Einatmen von Helium ändert sich die eigene Stimme deutlich hin zu einer Art Mickymaus-Piepsen. Das liegt daran, dass die Klangfarbe

einer Stimme von der Lage der Resonanzfrequenzen im Mundraum abhängt. Die Lage dieser Resonanzfrequenzen ist wiederum abhängig von der Schallgeschwindigkeit ($c_{\text{Luft}} = 350 \text{ m/s}$, $c_{\text{Helium}} = 1030 \text{ m/s}$) und verschiebt sich unter Einfluss von Helium hin zu höheren Frequenzbereichen. Hieraus ergibt sich das veränderte Stimmbild, das der Stimme von Mickeymaus ähnelt. Je mehr Helium sich im eingeatmeten Gas befindet, desto "piepsiger" klingt die Stimme also.

Dieser Umstand kann in Form eines Stimmtests zur Kontrolle eines Gas-Gemisches auf seinen Helium-Gehalt hin genutzt werden (siehe auch Kapitel "Gasanalyse").

Stickstoff

(engl. Nitrogen, von altgriech. nitron "Laugensalz" und genes "erzeugend")

1771 wies Carl Wilhelm Scheele (einer der Entdecker des Sauerstoffs) Stickstoff als Bestandteil der Luft nach.

In der Erdatmosphäre sind 78,7 Vol.-% Stickstoff bzw. 75,5 Masse-% enthalten. In der Erdkruste kommt Stickstoff nur zu 0,03 % vor.

In der Natur gibt es zahlreiche wichtige organische Stickstoffverbindungen, wie beispielsweise Eiweiße und Nukleinsäuren, stickstoffhaltige Mineralien sind aber relativ selten.

Die industrielle Gewinnung erfolgt primär durch die fraktionierte Destillation von verflüssigter Luft (Linde-Verfahren).

Stickstoff tritt nur in molekularer Form auf, also als Verbindung zweier Stickstoffatome (Summenformel N_2), und ist ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas, welches bei tiefen Temperaturen zu einer farblosen Flüssigkeit kondensiert.

Stickstoff ist Hauptbestandteil der Pressluft. Da er jedoch unter erhöhtem Druck eine starke narkotische Wirkung entwickelt, wird er je nach geplanter Tauchtiefe teilweise (oder u. U. auch gänzlich) durch Helium ersetzt. Als Reingas zur Herstellung von Atemgasgemischen wird er von Tauchern im Allgemeinen nicht genutzt, da dies deutlich teurer wäre als die Nutzung von Pressluft.

Argon

(griechisch: das träge [Element])

Argon wurde im Jahre 1894 durch Lord Rayleigh und Sir William Ramsay entdeckt. Ihrer Entdeckung ging voraus, dass Henry Cavendish bereits im Jahre 1785 die Existenz dieses Elements vermutete.

Argon ist mit etwa 0,933 Vol.-% das am häufigsten in der Atmosphäre vorkommende Edelgas. Es wird ebenfalls bei der fraktionierten Destillation verflüssigter Luft gewonnen.

Ebenfalls fällt Argon als Nebenprodukt bei der Ammoniak-Synthese an, da es sich mit ca. 10 % im Gasgemisch anreichert.

Argon kann als Inertgas betrachtet werden, da es unter fast keinen Umständen mit andern Elementen reagiert. Als solches wird es zum Schweißen, in automatischen Feuerlöschanlagen und vielen weiteren Anwendungen, die eine Schutzgasatmosphäre erfordern, genutzt. Auf Grund seiner niedrigen Wärmeleitfähigkeit kommt Argon in Isolierglasscheiben und eben in Trockentauchanzügen zum Einsatz.

Achtung: Wurde ein Raum versehentlich mit Argon geflutet, muss vor Betreten des Raumes gelüftet werden. Argon sammelt sich in Räumen zunächst in Bodennähe, da es eine höhere Dichte als Luft aufweist. Das Einatmen von reinem Argon führt auf Grund des fehlenden Sauerstoffs zu sofortiger Bewusstlosigkeit und in kurzer Folge zum Tod.

Allgemeines

Alle hier aufgeführten Reingase werden von der Gaseindustrie in verschiedenen Flaschengrößen und üblicherweise in 200 bar Technik, von einigen Herstellern aber auch in 300 bar Technik angeboten. Zudem gibt es die Gase für verschiedenste Anwendungsbereiche in unterschiedlichen Reinheitsgraden (Abbildung 8).

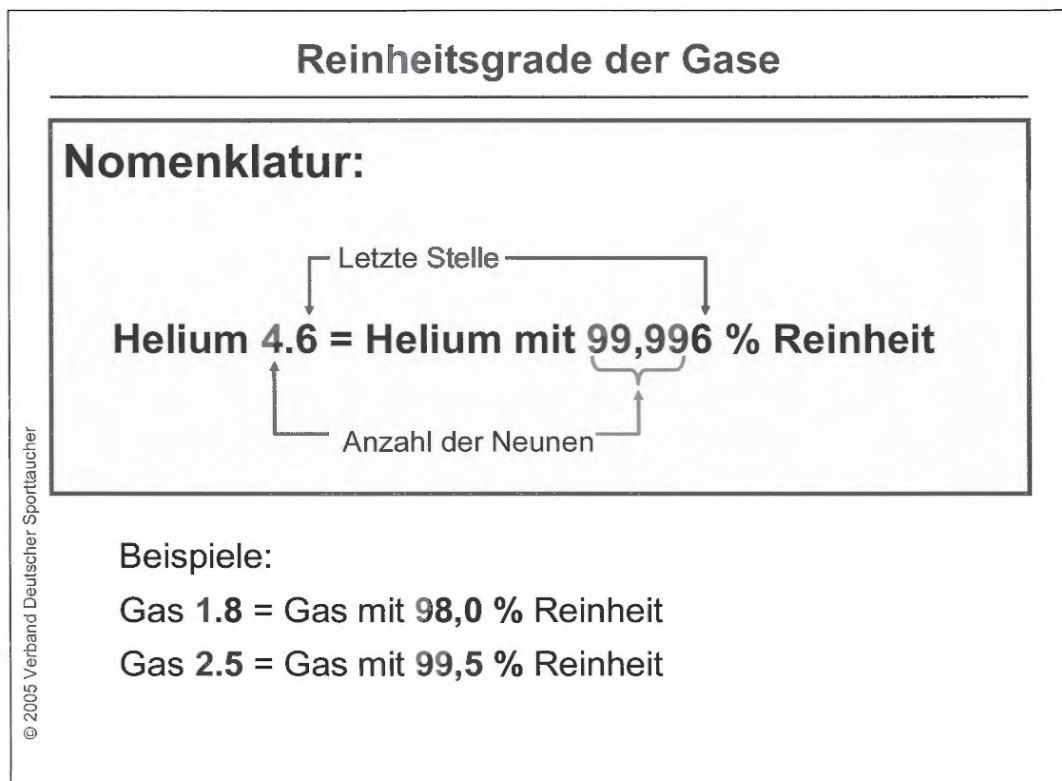


Abbildung 8: Übliche Nomenklatur der Reinheitsgrade von Gasen

Aus rechtlicher Sicht ist für die Herstellung von Atemgemischen medizinischer Sauerstoff zu nutzen. Medizinischer Sauerstoff hat zwar nur einen Reinheitsgrad von 2.5, also von mind. 99,5 %. Es wird aber garantiert, dass der medizinische Sauerstoff weniger als 5 ppm Kohlenmonoxid (CO), 300 ppm Kohlendioxid (CO₂), 67 ppm Wasser und keine Kohlenwasserstoffe enthält.

Von manchen Tauchern wird technischer Sauerstoff mit einem Reinheitsgrad von mind. 3.5 (also 99,95 %) verwendet. Bei technischem Sauerstoff ist aber die Restgaszusammensetzung nicht garantiert. Aus Sicherheitsgründen ist die Verwendung daher unzulässig.

Helium und Argon werden nicht in medizinischer Qualität angeboten. Daher muss zwangsläufig auf technische Gase zurückgegriffen werden. Um hierbei das Risiko zu minimieren, die Gase aber trotzdem bezahlbar zu halten, sollten Gase mit einem Reinheitsgrad von mind. 4.6 genutzt werden.

Der Bezug aller Gase kann entweder individuell privat erfolgen (Preisvergleiche zwischen den einzelnen Gasanbietern lohnen sich auf jeden Fall!) oder über bereits ausgehandelte Rahmenverträge des VDST (nähere Informationen hierzu finden sich auf www.vdstnitrox.de unter der Rubrik Gaslogistik) oder anderer Einkaufsgemeinschaften.

Im Hinblick auf die ökonomische Nutzung ist ein Bezug der Gase in 300 bar Speicherflaschen sehr empfehlenswert, da so länger hohe Vordrücke in den Speicherflaschen zur Verfügung stehen.

Die Anschlussgewinde für die verschiedenen Gase und Lieferformen finden sich in einer Tabelle im Kapitel "Vorschriften und Normen" Abbildung 36.

Physikalische Grundlagen

Autor: Dr. Martin Steiner

Ideale Gase

Im Gegensatz zur geordneten Kristallstruktur eines Festkörpers besteht zwischen den einzelnen Atomen oder Molekülen eines Gases keine geordnete räumliche Anordnung. Sie bewegen sich, ebenfalls anders als bei einer Flüssigkeit, überwiegend ohne direkten Kontakt geradlinig durch das von ihnen eingenommene Volumen. Man nennt diesen Zustand auch den dritten Phasen- oder Aggregatzustand eines Stoffes, bei dem dieser eine relativ hohe innere Energie (ungefähr gleichbedeutend mit der Temperatur) hat. Ein Gas nimmt dabei immer den ihm maximal zur Verfügung stehenden Raum ein.

In einer ersten Näherung kann man davon ausgehen, dass die Teilchen, aus denen das Gas besteht, selbst keine räumliche Ausdehnung besitzen und zwischen ihnen, bis auf die Kollisionen bei direktem Kontakt, keine Kräfte wirken. Man spricht dann von einem idealen Gas (da es aus „idealen“, punktförmigen Teilchen besteht).

Der Zustand einer bestimmten Menge eines solchen Gases unter einer bestimmten Temperatur, in einem bestimmten Volumen, bei einem bestimmten Druck lässt sich mit folgender Gleichung exakt bestimmen:

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

Druck p
Volumen V

Stoffmenge n
Allgemeine Gaskonstante $R = 8,314 \text{ J / mol}\cdot\text{K}$
Absolute Temperatur T

Dies ist die so genannte ideale Gasgleichung. Kennt man die Größe von drei der notwendigen Variablen so kann man mit ihr sehr einfach den fehlenden Parameter berechnen. Hält man zwei Parameter konstant und verändert einen dritten um einen bekannten Wert, dann kann man die Änderung des vierten exakt berechnen.

Die ideale Gasgleichung entstand, nachdem die einzelnen Parameter-Gleichungen in unabhängigen Experimenten gefunden wurden. Deshalb gibt es für diese Spezialfälle auch eigenständige Namen, die im Folgenden beschrieben werden sollen.

Das Gesetz von Boyle-Mariotte

Das Gesetz von Boyle-Mariotte sagt aus, dass der Druck idealer Gase bei gleich bleibender Temperatur und gleich bleibender Stoffmenge umgekehrt proportional zum Volumen ist. Erhöht man also den Druck auf

Gasmischer Manual Physikalische Grundlagen

eine abgeschlossene Gasmenge bei konstanter Temperatur, zieht sich diese zusammen - verringert man den Druck, so dehnt sie sich aus. Dieser Zusammenhang wurde von zwei Physikern unabhängig voneinander in kurzer Folge entdeckt, dem Engländer Robert Boyle (1662) und dem Franzosen Edme Mariotte (1676).

Für $T = \text{konstant}$ und $n = \text{konstant}$ gelten also folgende Zusammenhänge:

$$p \sim \frac{1}{V} \quad p \cdot V = \text{const} \quad p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Beim Tauchen sind die Auswirkungen des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes wohl die, die am ehesten wahrgenommen werden. So lernt eigentlich jeder Taucher in seinen ersten Theorie-Stunden, dass sich ein Luftvolumen beim Verdoppeln des Umgebungsdrucks auf die Hälfte zusammenziehen möchte und er deshalb Druckausgleich in seinem Mittelohr herbeiführen muss, damit ihm nicht das Trommelfell reißt. Genauso darf beim Auftauchen unter Druckluftatmung auf keinen Fall der Atem über einen zu langen Zeitraum angehalten werden, da es sonst durch die sich ausdehnende Luft zu einem Lungenriss kommen kann.

Im Allgemeinen nicht so bekannt sind die Auswirkungen beim Mischen oder beim reinen Überströmen von Gasen. Hat man z. B. eine 50 l Vorratsflasche mit 220 bar Pressluft und eine bis auf 40 bar leer geatmete 10 l Tauchflasche, dann erreicht man nach dem Überströmen in der Tauch- und in der Vorratsflasche einen Enddruck von 190 bar.

Das Gesetz von Gay-Lussac

Das Gesetz von Gay-Lussac sagt aus, dass das Volumen idealer Gase bei gleich bleibenden Druck und gleich bleibender Stoffmenge direkt proportional zur Temperatur ist. Eine abgeschlossene Gasmenge bei konstantem Druck dehnt sich also bei einer Erwärmung aus und zieht sich bei einer Abkühlung zusammen. Dieser Zusammenhang wurde 1787 von Jacques Charles und 1802 von Joseph Louis Gay-Lussac erkannt, weshalb man es häufig auch unter dem Namen *Gesetz von Charles* beschrieben findet.

Für $p = \text{konstant}$ und $n = \text{konstant}$ gelten also folgende Zusammenhänge:

$$V \sim T \quad \frac{V}{T} = \text{const} \quad \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Das 2. Gesetz von Gay-Lussac

Dieses Gesetz beschreibt, dass der Druck idealer Gase bei gleich bleibenden Volumen und gleich bleibender Stoffmenge direkt proportional zur Temperatur ist. Der Druck einer abgeschlossenen Gasmenge bei

Gasmischer Manual Physikalische Grundlagen

konstantem Volumen steigt also bei Erwärmung an und er sinkt, wenn sich das Gas abkühlt. Eigentlich wurde dieser Zusammenhang zuerst von Guillaume Amontons beschrieben und obwohl es damit eigentlich als Gesetz von Amontons benannt ist, wird es im allgemeinen Gebrauch häufig ebenfalls als das (2.) Gesetz von Gay-Lussac betitelt.

Für $V = \text{konstant}$ und $n = \text{konstant}$ gelten somit folgende Zusammenhänge:

$$p \sim T \quad \frac{p}{T} = \text{const} \quad \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Beim Sporttauchen sind eher die Auswirkungen des 2. Gesetzes von Gay-Lussac bekannt. Jeder der sein Tauchgerät schon einmal selber gefüllt hat weiß, dass dieses dabei warm wird. Andererseits ist es ebenfalls nicht ungewöhnlich, wenn das Finimeter nach dem Eintauchen in das meist kältere Wasser einen geringeren Fülldruck der Flasche angibt, als noch kurz zuvor in der relativ warmen Luft an Land. Wichtig hierbei ist, dass die Gasmenge, also die Anzahl der Luftmoleküle dabei immer gleich bleibt und somit dem Taucher auch immer die gleiche Luftmenge zur Verfügung steht. Möchte man wissen, wie lange man nun mit diesem Luftvorrat auskommt, muss man eigentlich den Druck auf eine Temperatur von knapp 30°C umrechnen, da die Einatemluft in der Lunge angewärmt wird. (Einige luftintegrierte Tauchcomputer berücksichtigen dieses z. B. bei ihren Berechnungen der verbleibenden Grundzeit).

Ideale Gase

Aus der idealen Gasgleichung lassen sich folgende Gesetze ableiten:

- **BOYLE-MARIOTTE:** Bei konstanter Temperatur steht für eine gleich bleibende Gasmenge der Druck im umgekehrten Verhältnis zum Volumen.

$$p \cdot V = \text{konst.} \Rightarrow p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

und

- **GAY-LUSSAC:** Bei konstantem Volumen wächst der Druck einer gleich bleibenden Gasmenge im gleichen Verhältnis wie die absolute Temperatur.

$$\frac{p}{T} = \text{konst.} \Rightarrow \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 9: Gesetze, die sich aus der idealen Gasgleichung ableiten

Partialdrücke und das Gesetz von Dalton

Bei einem Gemisch von verschiedenen Gasen kann man den Begriff des Partialdrucks definieren. Geht man von idealen Gasen aus, dann durchmischen sich die einzelnen Komponenten ohne gegenseitige Beeinflussung. Jedes Einzelgas nimmt also den gesamten Raum ein, als ob die anderen Gase nicht vorhanden wären. Dementsprechend kann man dem einzelnen Gasanteil einen Einzeldruck zuordnen, der einem Gesamtdruck entspräche, den die Komponente beim alleinigen ausfüllen des Volumens haben würde.

Der wirkliche Gesamtdruck der von dem Gasgemisch in dem Volumen ausgeübt wird, setzt sich dabei natürlich aus der Summe der verschiedenen Einzeldrücke der Gasanteile zusammen, die deshalb auch Teil- oder Partialdrücke genannt werden.

John Dalton formulierte 1805 als erster diesen Zusammenhang in das nach ihm benannte Gesetz, das besagt, dass die Summe aller Partialdrücke p_i gleich dem Gesamtdruck des Gasgemisches p_{gesamt} ist:

$$p_{\text{gesamt}} = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i$$

Der Gesamtdruck eines Trimixgemisches setzt sich demnach aus den einzelnen Partialdrücken seiner drei Bestandteile Sauerstoff, Helium und Stickstoff zusammen (Abbildung 10).

Gesetz von Dalton

Der Gesamtdruck p eines Gasgemisches ist gleich der Summe der Teildrücke p_{Gas} (= Partialdrücke) seiner Gaskomponenten:

$$p = p_{\text{Gas},1} + p_{\text{Gas},2} + \dots + p_{\text{Gas},n} = \sum_{i=1}^n p_{\text{Gas},i}$$
$$p_{\text{Trimix}} = p_{\text{O}_2} + p_{\text{He}} + p_{\text{N}_2}$$

Beispiele :

$$200 \text{ bar}_{\text{Tx 21/35}} = 42 \text{ bar}_{\text{O}_2} + 70 \text{ bar}_{\text{He}} + 88 \text{ bar}_{\text{N}_2}$$
$$200 \text{ bar}_{\text{EAN 36}} = 72 \text{ bar}_{\text{O}_2} + 128 \text{ bar}_{\text{N}_2}$$

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 10: Das Gesetz von Dalton – die Summe der Teildrücke

Gasmischer Manual Physikalische Grundlagen

Da das Molvolumen, also das Volumen für 1 Mol (das entspricht $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen/mol), eines idealen Gases immer gleich ist (z. B. 22,4 l bei Normbedingungen, also 0°C und 1,013 bar) lässt sich aus dem Gesetz von Dalton ableiten, dass für ein einzelnes Gas das Verhältnis von Stoffmengen-Anteil zu Gesamtstoffmenge und von Partialdruck zu Gesamtdruck gleich sein muss:

$$\frac{n_i}{n_{\text{gesamt}}} = f_i = \frac{p_i}{p_{\text{gesamt}}} \longrightarrow p_i = f_i \cdot p_{\text{gesamt}}$$

Umgekehrt kann man sagen, dass man den Partialdruck eines Gases ausrechnen kann, indem man den Gesamtdruck mit dem entsprechenden relativen Anteil des Einzelgases an der Gesamtgasmenge multipliziert. So kann man z. B. den Sauerstoffpartialdruck in einem Trimix-Gemisch errechnen (Abbildung 11).

Gesetz von Dalton

Damit gilt umgekehrt:
Der Partialdruck p_{Gas} ist gleich dem Gesamtdruck des Gasmisches p mal dem Anteil f_{Gas} (= Fraktion) des Gases.

$$p_{\text{Gas}} = p \cdot f_{\text{Gas}}$$
$$p_{\text{O}_2} = p_{\text{Trimix}} \cdot f_{\text{O}_2}$$

Beispiel:

$$\begin{aligned} p_{\text{O}_2} &= p_{\text{T}_{x\ 21/35}} \cdot 0,21 \\ &= 200 \text{ bar}_{\text{T}_{x\ 21/35}} \cdot 0,21 \\ &= 42 \text{ bar}_{\text{O}_2} \end{aligned}$$

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 11: Das Gesetz von Dalton – Anteil und Partialdruck

Reale Gase

Während das ideale Gas als so genanntes „Billiardkugelmodell“ aus Teilchen besteht, die untereinander ausschließlich über elastische Stöße wechselwirken und keine Ausdehnung besitzen (Punktmass), sind diese

Gasmischer Manual Physikalische Grundlagen

Idealisierungen bei real vorkommenden Gasen nicht mehr haltbar. Es zeigen sich unter bestimmten Bedingungen zum Teil erhebliche Abweichungen vom Verhalten, welches nach der Idealen Gasgleichung zu erwarten wäre, bzw. einige Effekte aus unserer ‚normalen‘ Umwelt würden bei idealen Gasen gar nicht stattfinden – z. B. die Kondensation von Wasserdampf zu Wasser, also der Phasenübergang zur Flüssigkeit.

Bei der Beschreibung des Verhaltens von realen Gasen wird deshalb berücksichtigt, dass reale Gasmoleküle oder -atome über eine eigene Ausdehnung verfügen und dass häufig zwischen ihnen durch Ladungen oder Massen hervorgerufene anziehende oder abstoßende elektrische oder gravitonische Kräfte wirken.

Dass wir im Normalfall trotzdem mit der idealen Gasgleichung das Verhalten von Gasen ausreichend genau beschreiben können, liegt vor allem daran, dass die Dichte eines Gases bei Normalbedingungen (20° C, 1,013 bar) so gering ist, dass ihr eigenes Volumen nur einen Bruchteil des Gesamtvolumens ausmacht und die Moleküle des Gases die meiste Zeit relativ weit voneinander entfernt umherfliegen und somit die Einflüsse von Eigenvolumen und zwischenmolekularen Kräften vernachlässigbar ist. Dies ändert sich aber, sobald man z. B. die Dichte der Gase massiv erhöht.

Van-der-Waals Korrektur

Ein Ansatz um die Ideale Gasgleichung in Hinblick auf das reale Verhalten von Gasen anzupassen, wurde von Johannes Diderik van der Waals (1873) gemacht. Er berücksichtige das Eigenvolumen der Gasteilchen in Form des sog. Kovolumens V_E und die zwischenmolekularen Kräfte in Form des sog. Binnendruckes p_B . Eingesetzt in die Ideale Gasgleichung ergibt dies die Van-der-Waals-Gleichung realer Gase:

$$(p + p_B) \cdot (V - V_E) = n \cdot R \cdot T$$

$$\left(p + \frac{a \cdot n^2}{V^2}\right) \cdot (V - n \cdot b_{\text{Vol}}) = n \cdot R \cdot T$$

Druck p , Binnendruck p_B
Volumen V , Kovolumen V_E
Realgasfaktoren a , b

Stoffmenge n
Allgemeine Gaskonstante $R = 8,314 \text{ J/mol K}$
Absolute Temperatur T

Die beiden Werte a und b , die sog. Realgasfaktoren, sind dabei aus Messungen ermittelte Werte, die für jedes Gas und vor allem auch für jedes Gasgemisch anders sind. Die Realgasfaktoren für das Gasgemisch können dabei aus den empirisch ermittelten a - und b -Werten der Einzelgase errechnet werden. Dies macht die Van-der-Waals-Gleichung relativ aufwändig zu berechnen. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Ko-Faktoren für beim Tauchen eingesetzte Gase.

Gasmischer Manual Physikalische Grundlagen

Tabelle 4: Überblick über die Ko-Faktoren ausgewählter Gase

Gas	a	b	Molgewicht [g]
Sauerstoff	1,382	0,03186	31,9988
Helium	0,0346	0,0387	28,01348
Stickstoff	1,37	0,0238	4,0020602
Luft (berechnet)	13,725	0,0372	28,85

Auswirkungen der Realgasfaktoren

Die Berücksichtigung des Kovolumens eines realen Gases bedeutet im Prinzip nichts anderes, als dass dieses bei der gleichen Teilchenanzahl, gleicher Temperatur und gleichem Druck ein größeres Volumen als ein ideales Gas einnimmt. Andersherum ausgedrückt ist der Druck eines realen Gases mit einer bestimmten Teilchenzahl im gleichen Volumen bei der gleichen Temperatur eingesperrt, größer als bei einem idealen Gas, da den Teilchen weniger Platz für ihre Bewegung zur Verfügung steht.

Der Binnendruck, also die Kräfte die zwischen den Teilchen des realen Gases wirken, hebt sich im Gas selbst auf, da die Kräfte hier von allen Seiten auf das Teilchen wirken. Erst an der Oberfläche des Gases am Gefäßrand haben die Kräfte eine gerichtete Wirkung.

Sind die Kräfte anziehend, so erniedrigt sich der von außen messbare Druck, da die Teilchen zurückgehalten werden und nicht so stark gegen die Außenwand prallen als es ihrer inneren Geschwindigkeit entspricht. Sind die Kräfte abstoßend, so werden die Teilchen am Rand sogar noch beschleunigt. Genauso könnte man sagen, dass es bei sich abstoßenden Teilchen schwieriger ist, weitere Atome oder Moleküle der Gasmenge hinzuzufügen.

Für das Tauchen hat das zum Teil wichtige Folgen:

Füllmengen

Immer höhere Fülldrücke bei den Tauchflaschen machen keinen Sinn! Auch wenn nach Idealer Rechnung der Luftvorrat in der Flasche linear mit dem Fülldruck steigt, ist das bei einem realen Gas nicht der Fall (Abbildung 12 und Abbildung 13).

In Wirklichkeit hat man in einem 10 l DTG schon bei einem Fülldruck von 300 bar im Vergleich zu 200 bar nicht das 1,5 fache (2000 : 3000 l) an Luftmenge, sondern nur noch ca. das 1,4 fache (2000 : 2700 l), also 10 % weniger als erwartet. Dieser Verlust wird mit höheren Fülldrücken noch größer, so dass mit 300 bar eine sinnvolle Obergrenze erreicht ist und mit 200 bar Systemen eine optimale Ausnutzung des Flaschenvolumens gegeben ist.

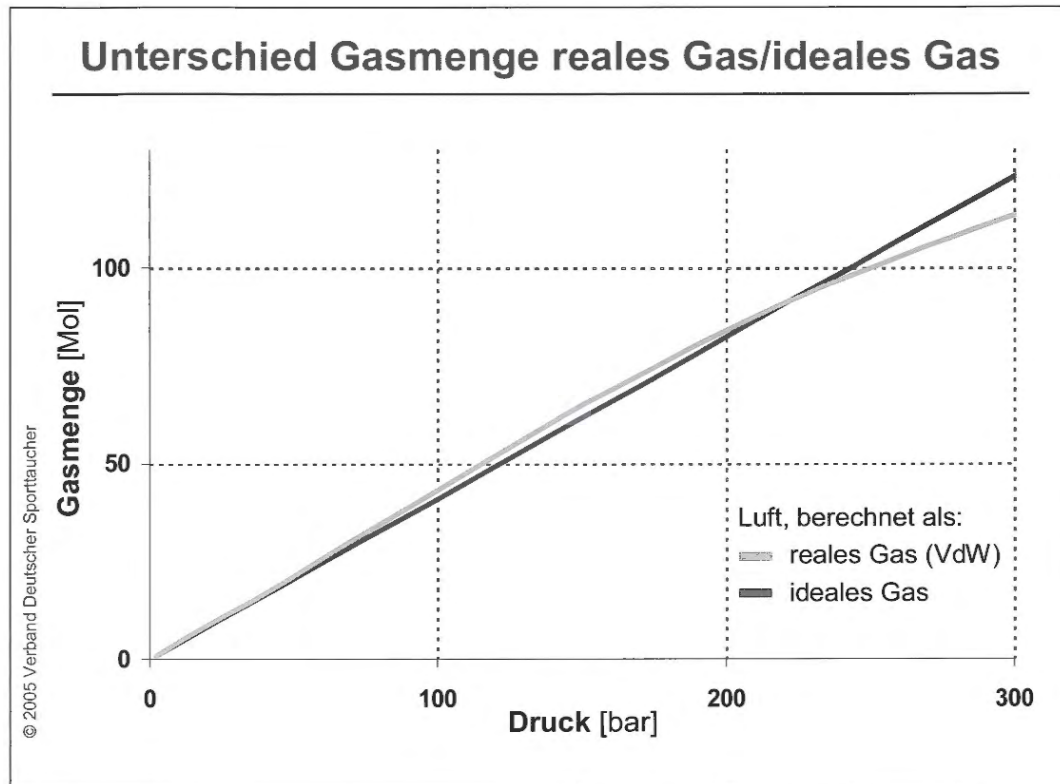


Abbildung 12: Unterschied der Gasmengen bei idealen Gasen im Vergleich zu realen Gasen, berechnet mit der Van-der-Waals-Gleichung (VdW)

Reale Gase

Reale Gase und das Gesetz von Boyle-Mariotte:
 Bei realen Gasen besteht kein direkt linearer Zusammenhang zwischen Fülldruck und Inhalt einer Tauchflasche!

Fülldruck (Luft)	Realer Inhalt 10 l-Flasche	Idealer Inhalt 10 l-Flasche	Abweichung real zu ideal
100 bar	1050 l	1000 l	+ 5 %
200 bar	2000 l	2000 l	± 0 %
300 bar	2700 l	3000 l	- 10 %

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

- ➔ Höhere Fülldrücke sinnlos
- ➔ Im Mischgasbereich Probleme durch Diffusionsgradienten und unterschiedliche Ausdehnung (bei Helium besonders hohe Abweichung)

Abbildung 13: Reale Gase und das Gesetz von Boyle-Mariotte

Gasmischer Manual Physikalische Grundlagen

Joule-Thomson-Effekt

Verändert man das Volumen eines idealen Gases und gibt den Teilchen somit mehr freien Raum, so verlängert man den Weg, den sich die Teilchen voneinander entfernen können. Dabei wird sich aber ihre Geschwindigkeit, also die Temperatur des Gases, nicht ändern.

Macht man das Gleiche mit einem realen Gas, so ergibt sich eine Energiedifferenz, wenn man die Teilchen mit den abstoßenden oder gegen die anziehenden Kräfte voneinander weg bewegt. Das ist vergleichbar mit dem Versuch, zwei Magneten weiter auseinander zu ziehen. Die Energie die für diese Arbeit notwendig ist (und bei den Magneten aus unserer Armmuskulatur kommt), wird bei einem Gas aus seiner Temperatur entnommen, was dazu führt, dass sich ein reales Gas bei Volumenvergrößerung (z. B. beim Abströmen aus einer Flasche) abkühlt und bei Volumenverkleinerung aufheizt. Sind die Kräfte abstoßend und nicht anziehend, so ist es genau andersherum.

Man nennt dieses Phänomen auch den Joule-Thomson-Effekt, der erstmalig von James Prescott Joule und Sir William Thomson (später Lord Kelvin) 1852 beschrieben wurde.

Diese Eigenschaft von realen Gasen ist der Hauptgrund für die Vereisung von Atemreglern beim Tauchen, da am Ventilsitz des Druckminderers (1. Stufe) ein Gas (z. B. Luft) mit meist anziehenden zwischenmolekularen Kräften stark entspannt wird. Es kommt hierbei zu Temperaturdifferenzen von bis zu -50°C , die evt. vorhandenes Wasser gefrieren lassen und somit die beweglichen Teile im Atemregler blockieren können.

Außerdem wird der Effekt der Abkühlung eines Gases bei Entspannung im sog. Lindeverfahren (siehe Kapitel "Reingase") zur technischen Herstellung von Reingasen angewendet.

Der Joule-Thomson-Koeffizient, also der Wert um wie viel Grad sich die Temperatur eines Gases bei einer bestimmten Druck- oder Volumenänderung verändert, kann auch positiv sein. Z. B. wird Helium, wenn man es von 200 bar auf 15 bar entspannt (!), um 11°C wärmer und nicht kälter.

Tabelle 5: Temperaturänderung von Gasen bei Entspannung (mit Joule-Thomson-Koeffizient (bei 0°C): Luft: $0,266\text{ K/bar}$; Helium: $-0,062\text{ K/bar}$)

Gas	Anfangsdruck bei 0°C	Enddruck	Endtemperatur	Abkühlung um
Luft	200 bar	1 bar	-53°C	53°C
Luft	200 bar	15 bar	-49°C	49°C
Helium	200 bar	1 bar	12°C	-12°C
Helium	200 bar	15 bar	11°C	-11°C

Mischverfahren und -anlagen

Im Folgenden sollen verschiedene Methoden zur Herstellung von Gasgemischen und die dafür benötigten Anlagen vorgestellt werden.

In Frage kommen alle Mischmethode, die es erlauben Gasgemische unter hohem Druck in Tauchflaschen abzufüllen. Die für das Tauchen wichtigsten Verfahren sind das Partialdruck-Verfahren, das Nitrox-Membran-Verfahren, das Konstantbeimischungsverfahren, das Gravimetrische Verfahren und das Premix-Verfahren.

Partialdruck-Verfahren

Bei diesem Verfahren wird der Druckanstieg in der zu füllenden Tauchflasche während und nach der Zugabe jeder Gemischkomponente mittels eines Manometers gemessen. Dies sollte immer bei der gleichen Temperatur geschehen. Die Menge eines jeden Gases im Gemisch entspricht der gemessenen Druckdifferenz (Abbildung 14). Dieses Verfahren ist gut geeignet zur Herstellung von Standardgemischen, wie der VDST sie empfiehlt.

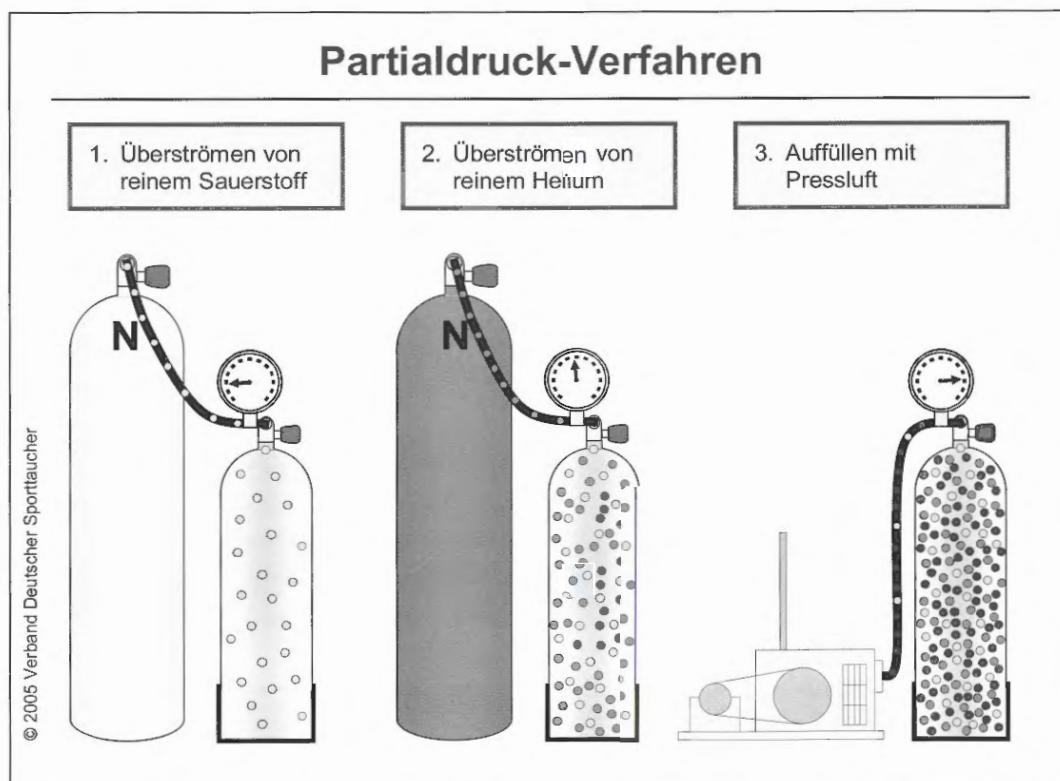


Abbildung 14: Partialdruckverfahren

Gasmischer Manual Mischverfahren und -anlagen

Soll Nitrox nach der Partialdruckmethode gemischt werden, wird zunächst eine vorher berechnete Menge reinen Sauerstoffs aus einer Speicherflasche in die Tauchflasche übergeströmt und dann die Flasche mit Luft aufgefüllt. Theoretisch könnte Nitrox auch aus reinem Sauerstoff und reinem Stickstoff gemischt werden, dies ist aber deutlich teurer und aufwändiger, da der Stickstoff ebenfalls flaschenweise gekauft werden müsste, während ein Atemluftkompressor meist schon vorhanden ist oder über eine Füllstation in der Nähe verfügbar ist.

Soll Trimix nach der Partialdruckmethode gefüllt werden, wird nacheinander zunächst reiner Sauerstoff, dann reines Helium in die Tauchflasche gefüllt und diese dann mit Luft aufgefüllt.

Der größte Vorteil der Partialdruckmethode ist, dass sie mit sehr einfachen Mitteln angewendet werden kann und das Mischen von Gasen so für jeden Taucher durchführbar ist. Sollen allerdings große Mengen an Tauchflaschen gefüllt werden, ist dies mit relativ hohem Zeitaufwand verbunden.

In der einfachsten Variante wird lediglich ein Füllschlauch (Abbildung 15) benötigt, der sauerstofftauglich ist und über folgende, natürlich ebenfalls sauerstofftaugliche Komponenten verfügt:

- **Rückschlagventil**

Das Rückschlagventil verhindert, dass ein bereits in der Tauchflasche befindliches Gasgemisch in die Speicherflasche zurückströmt und das Reingas verunreinigt. Dies sollte zwar bereits durch die Verwendung von Speicherflaschen mit ausreichend hohem Druck vermieden werden, das Rückschlagventil stellt aber eine zusätzliche Sicherheit dar.

- **Nadelventil**

Mit dem Nadelventil wird die Strömungsgeschwindigkeit des Gases reguliert. Zudem verringert es das Risiko von sich fortpflanzenden Druckstößen auf den Füllschlauch und die Tauchflasche, da es bei schwergängigen Speicherflaschenventilen dazu kommen kann, dass sich das Ventil erst gar nicht und dann sehr plötzlich öffnen lässt. Ist ein Nadelventil installiert, wird der entstehende Druckstoß hierdurch abgefangen bzw. verringert.

- **Manometer**

Das Manometer dient u. a. dem Ablesen des Druckes der Tauchflasche während des Füllvorgangs. Um ein genaues Mischen gewährleisten zu können, muss daher ein Manometer mit hoher Genauigkeitsklasse, also geringer Messwert-Abweichung, verwendet werden. Aber auch die Ablesegenauigkeit sollte beachtet werden.

Als Genauigkeitsklasse wird 1.6 oder besser empfohlen. Die Genauigkeitsklasse wird in Prozent des Messbereichsendwertes angegeben. Je kleiner also die Zahl der Genauigkeitsklasse ist, desto höher ist die Genauigkeit.

Beispiel:

Ein Manometer mit einem Messbereichsendwert von 300 bar mit einer Genauigkeitsklasse 1.6 hat über den gesamten Messwertbereich eine maximale Messwertabweichung von $300 \text{ bar} \cdot 1,6 \% = 4,8 \text{ bar}$.

Schlussfolgernd sollte im Sinne der Messgenauigkeit der Messbereichsendwert des verwendeten Manometers nicht überproportional über dem maximal zu handhabenden Druck liegen.

▪ Druckentlastungsschraube

Es sollte immer darauf geachtet werden, dass der Überströmschlauch und auch eventuelle Einzelkomponenten mit einer Druckentlastungsschraube statt mit einem Druckentlastungsdruckknopf ausgestattet sind. Mit einer Druckentlastungsschraube kann der Druck langsam und dosiert abgelassen werden, während mit einem Druckknopf nur eine schlagartige Entlastung möglich ist.

Beim Kauf eines Überströmschlauches sollte zusätzlich darauf geachtet werden, dass der angeschlossene Schlauch vom Speicherflaschenventil bis zu einer liegenden Tauchflasche reicht. Er sollte ca. 2 m lang sein.

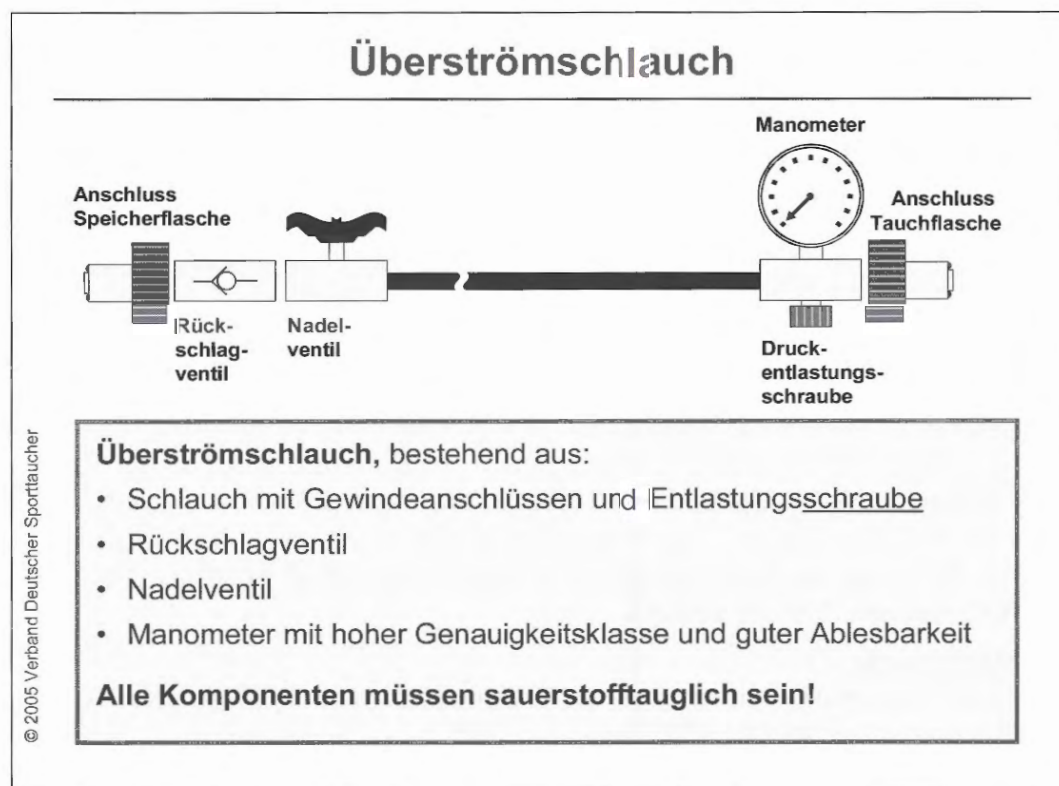


Abbildung 15: Schema eines Überströmschlauches

In Vereinen und Füllstationen wird neben dem einfachen Überströmschlauch häufig mit so genannten Mischpanels gearbeitet. Hiermit lässt sich eine fest mit den Speicherflaschen und dem Kompressor verbundene Anlage zum Mischen von Nitrox und/oder Trimix installieren

Gasmischer Manual Mischverfahren und -anlagen

(Abbildung 16). Das Vorgehen zum Mischen der Gase erfolgt analog zum Mischen mit Überströmschlauch, allerdings ist das Mischen deutlich komfortabler und schneller, da das recht zeitaufwändige Umschrauben des Überströmschlauches von einer Speicherflasche an die nächste entfällt.

Ein Mischpanel ist üblicherweise mit separaten Manometern zum Ablesen des aktuellen Drucks der Speicherflaschen und der Luftversorgung (Kompressor und/oder Speicherbatterie) und einem gut ablesbaren Manometer mit hoher Genauigkeitsklasse zum Ablesen des Drucks der Tauchflasche ausgestattet. Alle Zugänge zum Mischpanel können separat verschlossen werden und verfügen über Rückschlagventile. An dem oder den Abgängen zu den Tauchflaschen kann die Strömungsgeschwindigkeit eingestellt werden. Je nach Mischpanel ist ein Analysegerät direkt integriert, so dass das fertige Gemisch nach dem Füllvorgang direkt vor Ort analysiert werden kann.

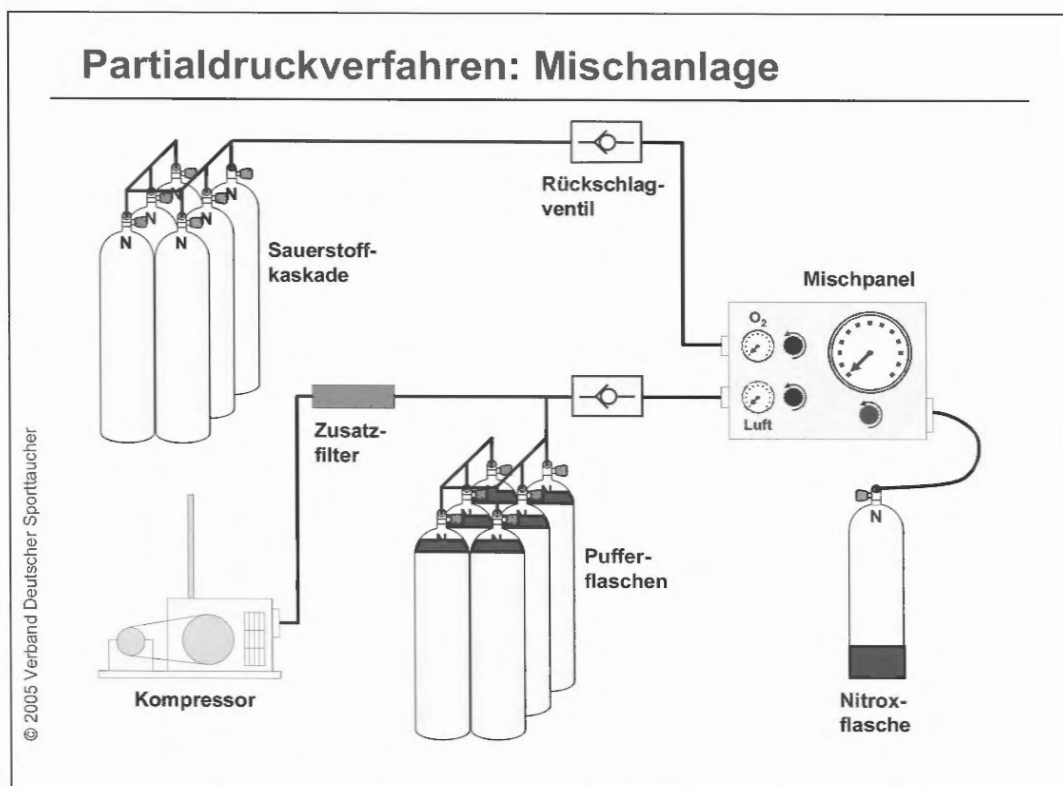


Abbildung 16: Schema einer Nitrox-Füllanlage nach Partialdruck-Verfahren

Nitrox-Membran-Verfahren

Wie der Name schon sagt, kann mit diesem Verfahren Nitrox hergestellt werden. Da es sich um ein Verfahren zur Trennung von Stickstoff aus Luft handelt, eignet es sich nicht zur Herstellung von Trimix.

Gasmischer Manual Mischverfahren und -anlagen

Die generelle Funktionsweise einer Nitrox-Membran (Abbildung 17) sieht so aus, dass vorkomprimierte Luft (je nach Membrantyp auf einen Vordruck von 2-11 bar) durch ein Bündel aus teildurchlässigen (semi-permeablen) Hohlfasermembranen geleitet wird. Sauerstoff diffundiert schneller durch diese Membranen als Stickstoff. So bildet sich im Inneren der Hohlfasern ein sauerstoffreduziertes Gemisch (Stickstoffanteil: ca. 95-99 %) während sich außerhalb ein stickstoffreduziertes Gemisch (Sauerstoffanteil: max. 40 %) ansammelt. Diese Gemische können getrennt abgeleitet und weiter komprimiert werden.

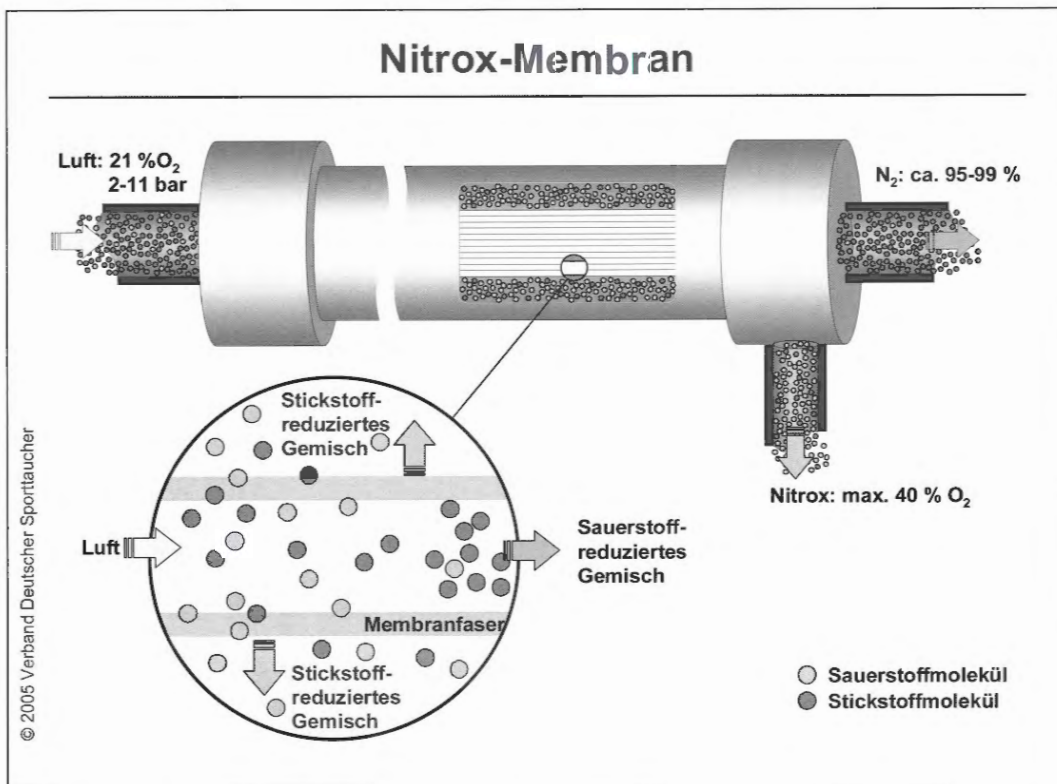


Abbildung 17: Schema einer Nitrox-Membran

Die Funktionsweise der Nitrox-Membran macht bereits deutlich, dass zum betreiben dieser Membran eine komplette Anlage nötig ist (Abbildung 18).

Diese besteht aus:

- **Niederdruckkompressor**
Dieser liefert die auf den Arbeitsdruck der Nitrox-Membran vorkomprimierte Luft.
- **Vorfilter**
Da die Nitrox-Membran sehr sensibel auf Verunreinigungen reagiert, wird die vorkomprimierte Luft aus dem Niederdruckkompressor nochmals gefiltert.

Gasmischer Manual Mischverfahren und -anlagen

- **Pressluft-Speicherbank** (optional)
Speicher für die vorkomprimierte Luft, um nicht für jeden Füllvorgang den Kompressor starten zu müssen.
- **Nitrox-Membran**
Diese befindet sich in Form eines Hohlfaser-Bündels in einem Gehäuse, das es erlaubt, den Sauerstoffanteil des stickstoffreduzierten Nitrox-Gemisches über ein Regelventil stufenlos von 21 % bis ca. 40 % einzustellen und direkt mit dem integrierten Analysegerät zu analysieren.
- **Nitrox-geeigneter Hochdruckkompressor**
Hiermit wird das erzeugte Nitrox-Gemisch vom Arbeitsdruck der Membran auf den Zieldruck (z. B. 200 bar) komprimiert.
- **Füllpanel**
Fest mit der Anlage verbundene Analyse- und Abfüllstation - hier wird das fertige Gemisch noch mal analysiert (integriertes Analysegerät) und dann entweder in Tauchflaschen oder in einen angeschlossenen Nitrox-Speicher gefüllt.

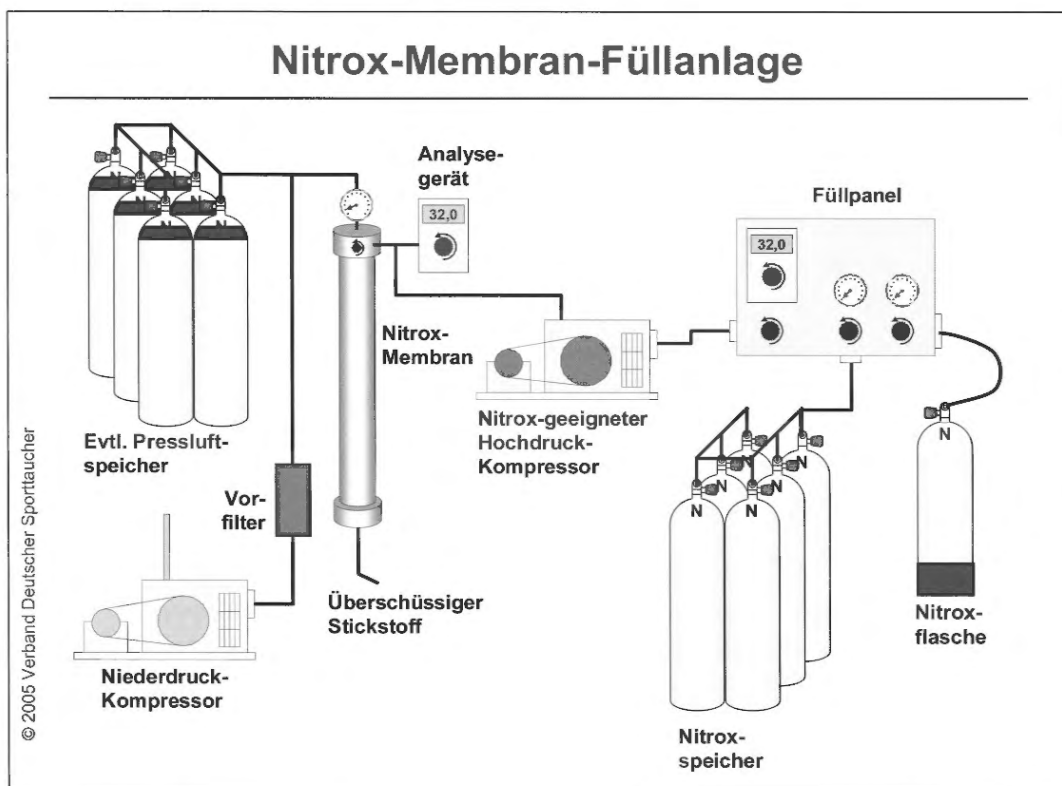


Abbildung 18: Schema einer Nitrox-Membran-Füllanlage

Gasmischer Manual Mischverfahren und -anlagen

Besonders für Tauchbasen und Füllstationen bietet eine Nitrox-Membran-Füllanlage Vorteile:

- Kein Umgang mit reinem Sauerstoff, da die Nitrox-Gemische aus Luft hergestellt werden.
- Einfach anwendbar
- Sehr genaue Gemische (Abweichung ca. 0,3 %)
- Auch große Flaschenmengen sind schnell befüllbar
- Membran-Lebensdauer von ca. 30 Jahren. Damit sind die Verbrauchskosten kaum höher als bei einem Kompressor.

Allerdings bringt eine solche Anlage auch Nachteile mit sich:

- Hohe Anschaffungskosten
- Nitrox-geeigneter Kompressor notwendig, da Gemische mit einem Sauerstoffanteil größer als 22 % komprimiert werden müssen
- Es sind nur Nitrox-Gemische bis 40 % O₂-Anteil herstellbar.

Konstantbeimischungsverfahren

Mittels eines computergesteuerten Injektionssystems und Verwirbelungsspiralen werden bei Umgebungsdruck im richtigen Verhältnis die benötigten Reingase (Sauerstoff und/oder Helium) mit Luft gemischt und direkt analysiert. Die fertige Mischung wird dann auf den Zieldruck verdichtet, noch mal analysiert und über ein Füllpanel abgefüllt (Abbildung 19).

Die Vorteile dieses Mischverfahrens sind:

- Kein Umgang mit reinem Sauerstoff unter hohem Druck
- Einfach anwendbar
- Sehr genaue Gemische
- Auch große Flaschenmengen sind schnell befüllbar
- Füllen mit sehr niedrigem Vordruck der Reingase möglich. Damit können Speicherflaschen fast vollständig entleert werden bzw. in Ländern, in denen nur Speicherflaschen mit niedrigem Druck erhältlich sind, können trotzdem alle Gemische hergestellt werden.

Nachteilig sind die

- hohen Anschaffungskosten für die Füllanlage und
- die Notwendigkeit eines Nitrox-geeigneten Kompressors, da Gemische mit einem Sauerstoffanteil größer als 22 % komprimiert werden müssen.

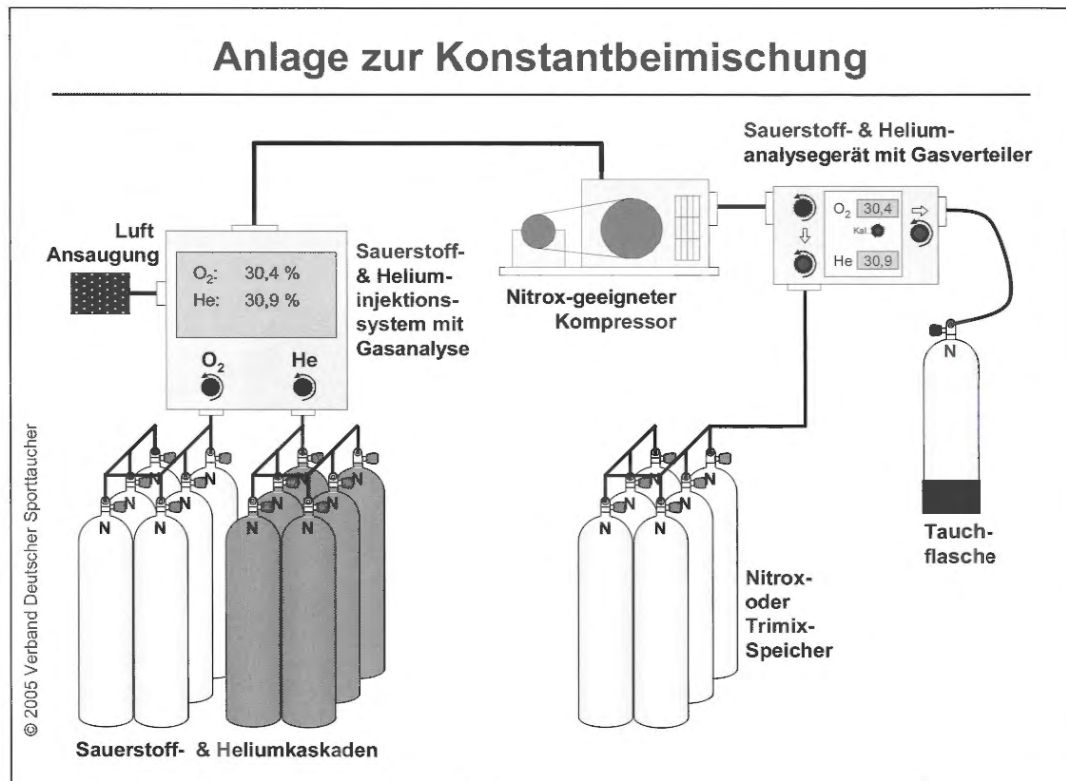


Abbildung 19: Schema einer Anlage zur Konstantbeimischung

Gravimetrisches Verfahren

Das gravimetrische Verfahren ist dem Partialdruckverfahren nicht unähnlich. Die zu füllende Gasmenge wird aber nicht anhand des Druckes sondern während und nach dem Füllen durch Wägung also anhand des Gasgewichtes bestimmt (Abbildung 20).

Vorteil:

- Mit der richtigen Ausrüstung sind sehr genaue Gemische auch in großen Mengen herstellbar, da bei dieser Methode die Auswirkungen der realen Gase nicht ins Gewicht fallen.

Nachteil:

- Sehr genaue (= teure) Wiegeeinrichtung erforderlich
- Nur für industrielle Anwendung sinnvoll

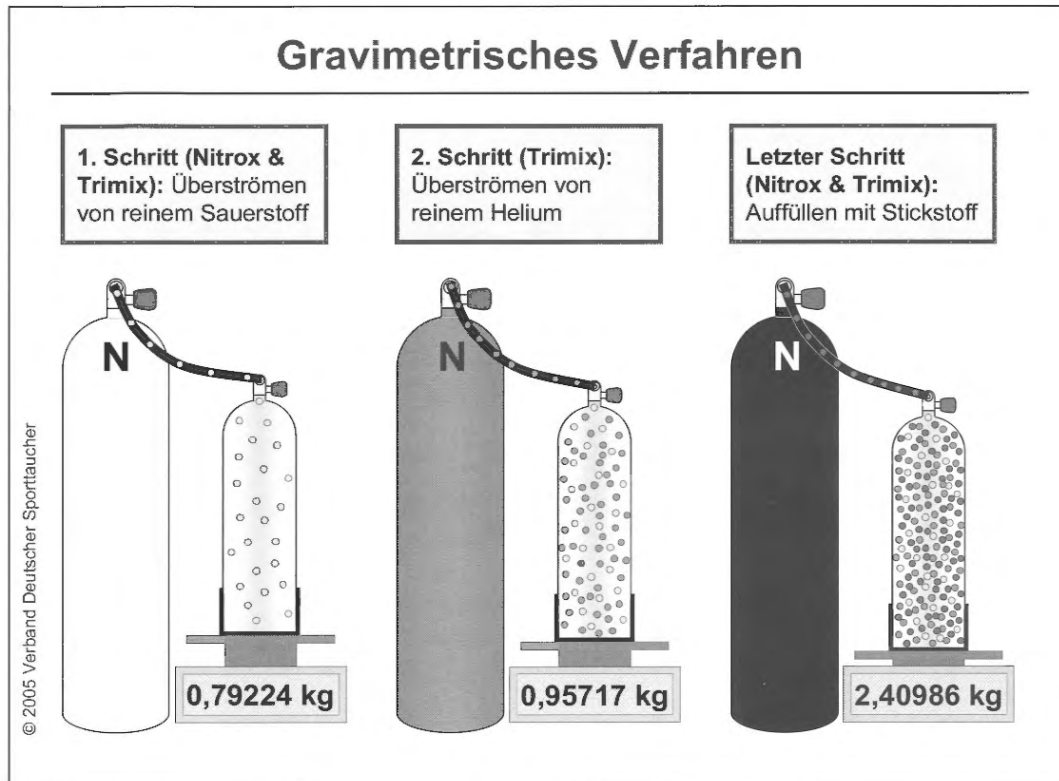


Abbildung 20: Gravimetrisches Verfahren

Premix-Verfahren

Das Premix-Verfahren ist nur bedingt als Methode zum Herstellen von Mischgasen zu betrachten, da es darauf beruht, bereits fertige Gasmische in Speicherflaschen zu kaufen und in Tauchflaschen überzuströmen. Erhältlich sind verschiedene Nitrox-Gemische, z. B. EAN 32, EAN 36, EAN 40 und EAN 60. Diese fertigen Nitrox-Gemische können aber natürlich auch mit Luft verdünnt werden, um andere Nitrox-Gemische herzustellen, oder an Stelle von reinem Sauerstoff und Luft auch zur Herstellung von Trimix-Gemischen genutzt werden. Hierbei gestaltet sich dann aber die Berechnung der Gemische etwas komplizierter als bei den anderen Verfahren.

Mischungsberechnung

Für Gasgemisch muss zunächst die Zusammensetzung berechnet werden, bevor es hergestellt werden kann. Hierfür gibt es verschiedene Vorgehensweisen, die aber alle auf den Gasgleichungen beruhen. Meist ist die ideale Gasgleichung Basis der Berechnungen, da damit einfacher zu rechnen ist und die Berechnungen im Bereich bis 200 bar hinreichend genau sind.

Im Folgenden sollen zunächst die benötigten Formeln für die Berechnung von Nitrox- und Trimix-Gemischen an Hand von Beispielen erklärt und dann die Handhabung sowohl des PC-Programms "Mischgas VDST" als auch von so genannten Top Up Tabellen vorgestellt werden.

Berechnungsformeln

Nitrox

Da Nitrox nur aus einem Reingas und Luft gemischt wird gestaltet sich die Berechnung um einiges einfacher als die Berechnung von Trimix-Gemischen. Soll eine leere Flasche mit einem Nitrox gefüllt werden, kann dies mit Hilfe nur einer Formel berechnet werden:

$$\Delta p_{\text{O}_2, \text{Reingas}} = \frac{f_{\text{O}_2} - 0,21}{0,79} \cdot p_{\text{End}}$$

Diese Gleichung erhält man aus der Überlegung, dass beim Mischen von Nitrox ein Teil des Sauerstoffs über die Luft mit gefüllt wird. Daher gestaltet sich die Herleitung der obigen Gleichung zur Bestimmung des als Reingas zu füllenden Sauerstoffs auf den ersten Blick etwas kompliziert:

1. Berechnen, wie viel bar Sauerstoff hinterher im fertig gemischten Nitrox sind. $p_{\text{O}_2, \text{gesamt}} = p_{\text{gesamt}} \cdot f_{\text{O}_2}$
2. Berechnen, wie viel hiervon aus der Luft kommt: Hier ist ein Umweg über den enthaltenen Stickstoff nötig: Der Partialdruck des Stickstoff im fertig gemischten Nitrox ergibt den Sauerstoffpartialdruck aus der Luft. $p_{\text{O}_2, \text{Luft}} = p_{\text{N}_2} \cdot 0,21/0,79$
3. Der Sauerstoff, der als Reingas gefüllt werden muss, ergibt sich aus dem Gesamt-Sauerstoffdruck (Punkt 1) minus dem Sauerstoffpartialdruck aus der Luft (Punkt 2): $p_{\text{O}_2, \text{Reingas}} = p_{\text{O}_2, \text{gesamt}} - p_{\text{O}_2, \text{Luft}}$
4. Fasst man jetzt diese Schritte zusammen und setzt die Gleichungen ineinander ein erhält man obige Gleichung.

Man kann sie aber auch einfach nur benutzen!

Beispiel: Mischen von EAN 32 mit 220 bar Enddruck

$$\Delta p_{O_2} = \frac{0,32 - 0,21}{0,79} \cdot 220 \text{ bar} = 30,6 \text{ bar} \approx 31 \text{ bar}$$

Der Füllplan würde also folgendermaßen aussehen:

1. Die leere Flasche mit 31 bar reinem Sauerstoff vorfüllen und
2. mit Luft bis 220 bar auffüllen.

Wenn ein Rest-Gemisch aufgetoppt werden soll, muss zunächst auf gleiche Art bestimmt werden, wie viel Sauerstoff aus Reinsauerstoff in dem Rest-Gemisch vorhanden ist, dann die Berechnung für das neue Gemisch wie oben durchgeführt und beide Werte voneinander abgezogen werden:

$$\Delta p_{O_2} = \left(\frac{f_{O_2, \text{neu}} - 0,21}{0,79} \cdot p_{\text{End}} \right) - \left(\frac{f_{O_2, \text{Rest}} - 0,21}{0,79} \cdot p_{\text{Rest}} \right)$$

Beispiel: Mischen von EAN 32 mit 220 bar Enddruck in eine Flasche mit EAN 50 und 60 bar Restdruck

$$\begin{aligned} \Delta p_{O_2} &= \left(\frac{0,32 - 0,21}{0,79} \cdot 220 \text{ bar} \right) - \left(\frac{0,50 - 0,21}{0,79} \cdot 60 \text{ bar} \right) \\ &= 30,6 \text{ bar} - 22,0 \text{ bar} = 8,6 \text{ bar} \approx 9 \text{ bar} \end{aligned}$$

Die Berechnung wird "zu Fuß" so recht aufwändig. Daher ist es deutlich einfacher mit PC-Programm oder Top Up Tabellen und Standardgasen zu arbeiten.

Trimix

Auch beim Mischen von Trimix wird ein Teil des Sauerstoffs über die Luft mit gefüllt. Daher ist die Berechnung des als Reingas zu füllenden Sauerstoffs etwas komplizierter als die Berechnung des benötigten Heliums (Die Herleitung der Formel zur Berechnung des Sauerstoffs aus Reingas ist analog zur Herleitung der Formel unter dem Kapitel Nitrox):

$$\begin{aligned} \Delta p_{O_2, \text{Reingas}} &= \frac{f_{O_2} - 0,21 \cdot (1 - f_{He})}{0,79} \cdot p_{\text{End}} \\ \Delta p_{He} &= f_{He} \cdot p_{\text{End}} \end{aligned}$$

Beispiel: Mischen von Tx 30/30 mit 220 bar Enddruck

$$\begin{aligned}\Delta p_{O_2} &= \frac{0,30 - 0,21 \cdot (1 - 0,3)}{0,79} \cdot 220 \text{ bar} \\ &= 42,6 \text{ bar} \approx 43 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\Delta p_{He} = 0,3 \cdot 220 \text{ bar} = 66 \text{ bar}$$

Der Füllplan würde also folgendermaßen aussehen:

1. Die leere Flasche mit 43 bar reinem Sauerstoff vorfüllen,
2. mit 66 bar Helium (bis 43 bar + 66 bar = 109 bar) vorfüllen und
3. bis 220 bar mit Luft auffüllen.

Wenn ein Rest-Gemisch aufgetoppt werden soll, muss zunächst auf gleiche Art bestimmt werden, wie viel Sauerstoff aus Reinsauerstoff und wie viel Helium in dem Rest-Gemisch vorhanden ist, dann die Berechnung für das neue Gemisch wie oben durchgeführt und beide Werte voneinander abgezogen werden:

$$\begin{aligned}\Delta p_{O_2} &= \left(\frac{f_{O_2, \text{neu}} - 0,21 \cdot (1 - f_{He, \text{neu}})}{0,79} \cdot p_{\text{End}} \right) \\ &\quad - \left(\frac{f_{O_2, \text{Rest}} - 0,21 \cdot (1 - f_{He, \text{Rest}})}{0,79} \cdot p_{\text{Rest}} \right)\end{aligned}$$

$$\Delta p_{He} = (f_{He, \text{neu}} \cdot p_{\text{End}}) - (f_{He, \text{Rest}} \cdot p_{\text{Rest}})$$

Beispiel: Mischen eines Tx 30/30 mit 220 bar Enddruck in eine Flasche mit Tx 18/45 mit 60 bar

$$\begin{aligned}\Delta p_{O_2} &= \frac{0,30 - 0,21 \cdot (1 - 0,3)}{0,79} \cdot 220 \text{ bar} \\ &\quad - \frac{0,18 - 0,21 \cdot (1 - 0,45)}{0,79} \cdot 60 \text{ bar} \\ &= 42,6 \text{ bar} - 4,9 \text{ bar} = 37,7 \text{ bar} \approx 38 \text{ bar}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta p_{He} &= 0,3 \cdot 220 \text{ bar} - 0,45 \cdot 60 \text{ bar} \\ &= 66 \text{ bar} - 27 \text{ bar} = 39 \text{ bar}\end{aligned}$$

Dieser Füllplan würde also so aussehen:

1. Die Flasche mit den 60 bar Tx 18/45 mit 38 bar reinem Sauerstoff bis zu einem Druck von 98 bar (= 60 bar + 38 bar) vorfüllen,
2. mit 39 bar Helium (bis 98 bar + 39 bar = 137 bar) vorfüllen und
3. bis 220 bar mit Luft auffüllen.

Auch hier zeigt sich, dass die Berechnung "zu Fuß" sehr aufwändig wird. Daher ist es deutlich einfacher und damit auch sicherer mit einem PC-Programm oder Top Up Tabellen und Standardgasen zu arbeiten.

PC-Programm "Mischgas VDST"

Autor: Dr. Martin Steiner

Das im Folgenden vorgestellte PC-Programm "Mischgas VDST" steht auf der VDST-Nitrox-Webseite (www.vdstnitrox.de) im Bereich Download zur freien Verfügung.



Abbildung 21: Programminformation

Mischgas VDST ist so geschrieben worden, das eine möglichst einfache Bedienung und eine gute Übersichtlichkeit der wichtigen Werte gewährleistet ist. Es existieren keine unnötigen Menüs und es gibt keine versteckten oder erst zu öffnenden Fenster, sondern man hat fünf verschiedene Ansichten zur Auswahl, deren Funktion in den einzelnen,

folgenden Abschnitten erklärt werden. Anwählen kann man die Funktionsfenster durch einen Mausklick auf die Karteireiter oder die Schnellwahl über die Funktionstasten F1 bis F5.

Allen Funktionsfenstern gemeinsam ist, dass durch die einzelnen Eingabefelder entweder per Maus oder aber auch mit der TABULATOR-Taste navigiert werden kann. Um eine Eingabe in die einzelnen Felder zu machen, kann man aus den aufklappbaren Listen einen der Vorschläge auswählen oder die Werte direkt per Tastatur in die Felder eingeben. Das Programm berechnet bei jeder veränderten Eingabe sofort automatisch neu und setzt die entsprechenden Ergebnisse in die Felder ein. Da hier teilweise Querbezüge nicht zu vermeiden sind, gibt es immer eine bestimmte Rangfolge der Vorgabewerte, so dass einige Eingaben auch bestimmte Vorgabewerte verändern dürfen, um ein entsprechend sicheres Gemisch zu berechnen. Diese Reihenfolge wird in den einzelnen Abschnitten näher erläutert. Obwohl im Normalfall ein geeignetes Gasgemisch für die jeweilige Tiefe vorgeschlagen wird, ist es natürlich auch möglich eigene Wünsche einzugeben und somit die momentan anerkannten Grenzen für Tauchtiefen und Partialdrücke von Atemgasen zu überschreiten.

Deshalb sei hier noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dieses Programm nur eine Hilfestellung bieten soll und nicht den gesunden Menschenverstand und die entsprechende Ausbildung des Benutzers ersetzen kann!

Das Programm weist auf diesen Fall immer durch eine ROTE Schrift in dem jeweiligen Feld hin. Liegen die Werte in den heute üblichen Grenzen, ist die Schrift GRÜN. Schließen kann man das Programm entweder wie üblich mit einem Klick auf das Kreuz in der rechten oberen Ecke oder man drückt die Taste ESCAPE. Um die Eingabe von Daten zu erleichtern, speichert das Programm bei jedem Schließen die eingegebenen Werte und lädt sie beim nächsten Start wieder. Ist ein Element im Programm mit einer speziellen Funktion ausgestattet, dann verändert sich beim darauf Zeigen der Mauszeiger in eine Hand, wie zum Beispiel bei der Internetadresse des VDST e.V. auf der Informationsseite (Abbildung 21) oder dem VDST Logo.

Nitrox

Mischgas VDST © VDST e.V. Autor: Dr. Martin Steiner

Nitrox (F1) | Trimix (F2) | Kosten (F3) | Liste (F4) | Information (F5)

Tauchtiefe: Meter

Nitrox-Gemisch mit: % O₂

Max. erlaubter ppO₂: bar

Anfangsdruck: bar

Anfangsgemisch: % O₂
 % N₂

Erreichter ppO₂: bar

CNS O₂: %/min

MOD: m

EAD: m

Erst bar O₂ auffüllen
bis bar

Dann bar Pressluft
bis bar

VDST
Verband Deutscher Sporttaucher

NITROX
+ TECHNICAL DIVING
Verband Deutscher Sporttaucher e.V.

Abbildung 22: Seite zur Berechnung von Nitrox-Gemischen

Auf dieser Seite (Abbildung 22) kann man sich die Werte für ein Nitrox-Gemisch ausrechnen lassen.

Vorgehensweise

- Man wählt die gewünschte maximale Tauchtiefe oben links. Das Programm schlägt automatisch abhängig vom gewählten maximal zulässigen Sauerstoff-Partialdruck ein geeignetes Gemisch vor.
- Man wählt im linken Kasten den noch vorhandenen Restdruck und Sauerstoffgehalt in der Tauchflasche.
- Man gibt im rechten Kasten den Enddruck an, bis zu welchem die Tauchflasche letztendlich aufgefüllt wird.

Nach jeder Eingabe sollte das Programm die Werte neu berechnet haben und im rechten Kasten anzeigen, bis zu welchem Druck man um wie viel bar reinen Sauerstoff vorfüllen muss, damit man durch Restfüllung mit Pressluft das gewünschte Gemisch erreicht.

Das Programm geht davon aus, dass zum Herstellen des Nitrox-Gemisches nur reiner Sauerstoff und Pressluft benutzt werden.

Bei den Berechnungen werden aus Effizienzgründen nur die Idealen Gasgesetze berücksichtigt und keinerlei Auswirkungen realer Gase. Der

maximale hieraus resultierende Fehler liegt im ungünstigsten Falle bei knapp 1 % und ist somit vertretbar. Außerdem zeigt die Praxis, dass selbst bei vorsichtigem und möglichst genauem Füllen die auftretenden Fehler von Equipment und Benutzer weitaus höher liegen. Und natürlich ist es Pflicht jedes Gemisch vor seinem Einsatz mittels eines geeigneten Analysegeräts auf seine Zusammensetzung hin zu kontrollieren!

Weitere Daten

In der unteren Felder-Zeile werden die weiteren Eckdaten für dieses Gemisch bzw. diesen Tauchgang angezeigt.

- **Erreichter pO_2**
ist der auf der angegebenen Tiefe erreichte Sauerstoff-Partialdruck.
- **CNS O_2**
ist der Multiplikator (nach der NOAA⁴-Tabelle), um mit der Tauchzeit multipliziert die neuronale Sauerstoffbelastung nach dem Tauchgang auszurechnen.
- **MOD** (Maximum Operating Depth , Maximale Einsatztiefe)
ist die für dieses Gemisch maximal zulässige Einsatztiefe bezüglich der Gefahr eines Sauerstoffkrampfes, entsprechend des gewählten maximal zulässigen Sauerstoffpartialdrucks.
- **EAD** (Equivalent Air Depth, Äquivalente Lufttiefe)
beschreibt die Tauchtiefe, die man mit Pressluft haben müsste, um denselben Stickstoffpartialdruck wie mit der gewählten Tiefe und dem entsprechenden Gemisch zu haben.

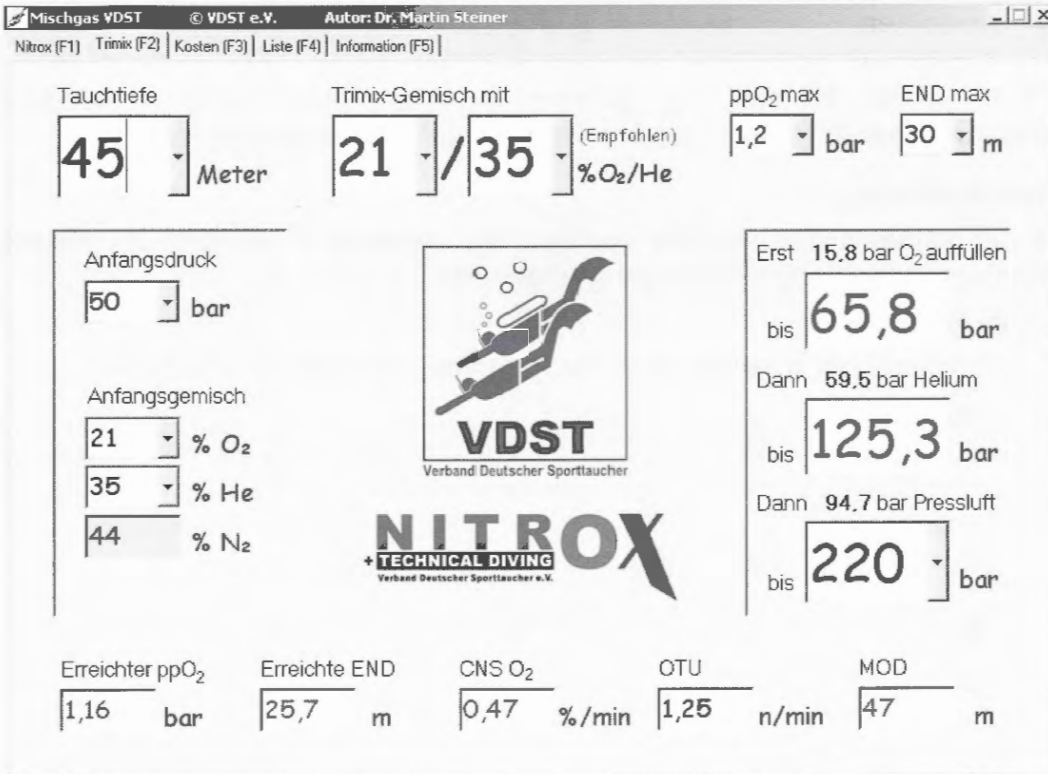
Hierarchie

Eine Eingabe der Tauchtiefe ändert die Auswahl des Gemisches und schlägt je nach Tiefe und maximalem pO_2 übliche Nitrox-Gemische für diese Tiefe vor (EAN 28, EAN 32, EAN 36 oder EAN 40; siehe auch Tabelle 2, Seite 9).

Eine Eingabe des maximalen pO_2 ändert die Auswahl des Gemisches und schlägt ein nach dem 'Best-Mix-Verfahren' berechnetes Gemisch vor.

⁴ NOAA: National Oceanic & Atmospheric Administration.
Nationales Amt für Ozeanographie und Klimatologie der USA. Die NOAA wurde im Oktober 1970 als Zusammenschluss verschiedener Forschungseinrichtungen und Wetterdienste gegründet, um deren Aktivitäten zu koordinieren. Sie ist eine Einrichtung des US Handelsministeriums und betreibt u. a. Forschung und Ausbildung im Bereich Tauchen.

Trimix



Mischgas VDST © VDST e.V. Autor: Dr. Martin Steiner

Nitrox (F1) Trimix (F2) Kosten (F3) Liste (F4) Information (F5)

Tauchtiefe: 45 Meter

Trimix-Gemisch mit: 21 / 35 (Empfohlen) % O₂/He

ppO₂ max: 1,2 bar

END max: 30 m

Anfangsdruck: 50 bar

Anfangsgemisch: 21 % O₂, 35 % He, 44 % N₂

Erst: 15,8 bar O₂ auffüllen bis 65,8 bar

Dann: 59,5 bar Helium bis 125,3 bar

Dann: 94,7 bar Pressluft bis 220 bar

Erreichter ppO₂: 1,16 bar

Erreichte END: 25,7 m

CNS O₂: 0,47 %/min

OTU: 1,25 n/min

MOD: 47 m

Abbildung 23: Seite zur Berechnung von Trimix-Gemischen

Auf dieser Seite kann man sich die Werte für ein Trimix-Gemisch ausrechnen lassen.

Vorgehensweise

- Man wählt die gewünschte maximale Tauchtiefe oben links. Das Programm schlägt automatisch abhängig vom gewählten maximal zulässigen Sauerstoff-Partialdruck und der gewählten äquivalenten Narkosetiefe ein geeignetes Gemisch vor.
- Man wählt im linken Kasten den noch vorhandenen Restdruck, den Sauerstoff- und den Heliumgehalt in der Tauchflasche.
- Man gibt im rechten Kasten den Enddruck an, bis zu welchem die Tauchflasche letztendlich aufgefüllt wird.

Nach jeder Eingabe sollte das Programm die Werte neu berechnet haben und im rechten Kasten anzeigen, bis zu welchem Druck man um wie viel bar zunächst reinen Sauerstoff und danach reines Helium vorfüllen muss, damit man durch Restfüllung mit Pressluft das gewünschte Gemisch erreicht.

Das Programm geht davon aus, dass zum Herstellen des Trimix-Gemisches nur reiner Sauerstoff, reines Helium und Pressluft benutzt werden.

Bei den Berechnungen werden aus Effizienzgründen nur die Idealen Gasgesetze berücksichtigt und keinerlei Auswirkungen realer Gase. Der maximale hieraus resultierende Fehler liegt im ungünstigsten Falle bei knapp 2 %. Ob dieser Fehler vertretbar bzw. durch eine entsprechende Erfahrung vermeidbar ist, muss jeder Anwender für sich selbst entscheiden. Häufig zeigt die Praxis auch, dass selbst bei vorsichtigem und möglichst genauem Füllen die auftretenden Fehler von Equipment und Benutzer höher liegen. Und natürlich ist es Pflicht, jedes Gemisch vor seinem Einsatz mittels eines geeigneten Analysegeräts auf seine Zusammensetzung hin zu kontrollieren!

Weitere Daten

In der unteren Felder-Zeile werden die weiteren Eckdaten für dieses Gemisch / diesen Tauchgang angezeigt.

- **Erreichter pO_2**
ist der auf der angegebenen Tiefe erreichte Sauerstoff-Partialdruck.
- **Erreichte END** (Equivalent Narcosis Depth)
ist die erreichte Äquivalente Narkosetiefe, also die Tiefe die derselben narkotischen Wirkung bei einem Tauchgang mit Pressluft entspricht.
Sauerstoff wird hier immer als narkotisch angesehen!
- **CNS O_2**
ist der Multiplikator (nach der NOAA-Tabelle), um mit der Tauchzeit multipliziert die neuronale Sauerstoffbelastung nach dem Tauchgang auszurechnen.
- **OTU** (Oxygen Tolerance Unit)
ist der Multiplikator, um mit der Tauchzeit multipliziert die pulmonale Sauerstoffbelastung nach dem Tauchgang auszurechnen.
- **MOD** (Maximum Operating Depth, Maximale Einsatztiefe)
ist die für dieses Gemisch maximal zulässige Einsatztiefe bezüglich der Gefahr eines Sauerstoffkrampfes, entsprechend des gewählten maximal zulässigen Sauerstoffpartialdrucks.

Hierarchie

Eine Eingabe der Tauchtiefe ändert die Auswahl des Gemisches und schlägt je nach Tiefe, maximalem pO_2 und END die entsprechenden VDST Trimix-Standardgemische (siehe Tabelle 3, Seite 10) für diese Tiefe vor.

- Eine Eingabe des maximalen pO_2 ändert den Sauerstoffgehalt des Gemisches und schlägt ein nach dem 'Best-Mix-Verfahren' berechnetes Gemisch vor.
- Eine Eingabe der END ändert den Heliumgehalt des Gemisches und schlägt ein nach dem 'Best-Mix-Verfahren' berechnetes Gemisch vor.

Kosten

The screenshot shows a software window titled 'Mischgas VDST' with the author 'Dr. Martin Steiner'. It features three main sections for cost calculation:

- Kosten (pro bar liter):** Lists gas prices: Sauerstoff at 0,50 Cent, Helium at 1,00 Cent, and Pressluft at 0,10 Cent.
- Kosten für das Nitroxgemisch:** Shows a calculation for a 10-liter bottle. It includes 667 barl O2 (3,33 €) and 833 barl Luft (0,83 €), totaling 4,17 €.
- Kosten für das Trimixgemisch:** Shows a calculation for a 24-liter bottle. It includes 380 barl O2 (1,90 €), 1428 barl He (14,28 €), and 2272 barl Luft (2,27 €), totaling 18,45 €.

Abbildung 24: Seite zur Berechnung der Füllkosten

Auf dieser Seite (Abbildung 24) werden die Kosten für die aktuellen Gemische ausgegeben.

Vorgehensweise

Man wählt in den beiden unteren Kästen die gewünschte Flaschengröße aus. Das Programm berechnet dann automatisch abhängig von den eingegebenen Literpreisen die Kosten für die Gasmischung. Die Preise der Gase verstehen sich als Euro-Cent pro Liter Gas.

Beispiel: Eine Vorratsflasche medizinischer Sauerstoff kostet 35,00 €.

Sie enthält 50 l bei 200 bar \Rightarrow 10.000 l

Also kostet ein Liter Sauerstoff in diesem Falle

$35,00 \text{ €} / 10.000 \text{ l} = 0,0035 \text{ €} = 0,35 \text{ Euro-Cent}$.

Liste

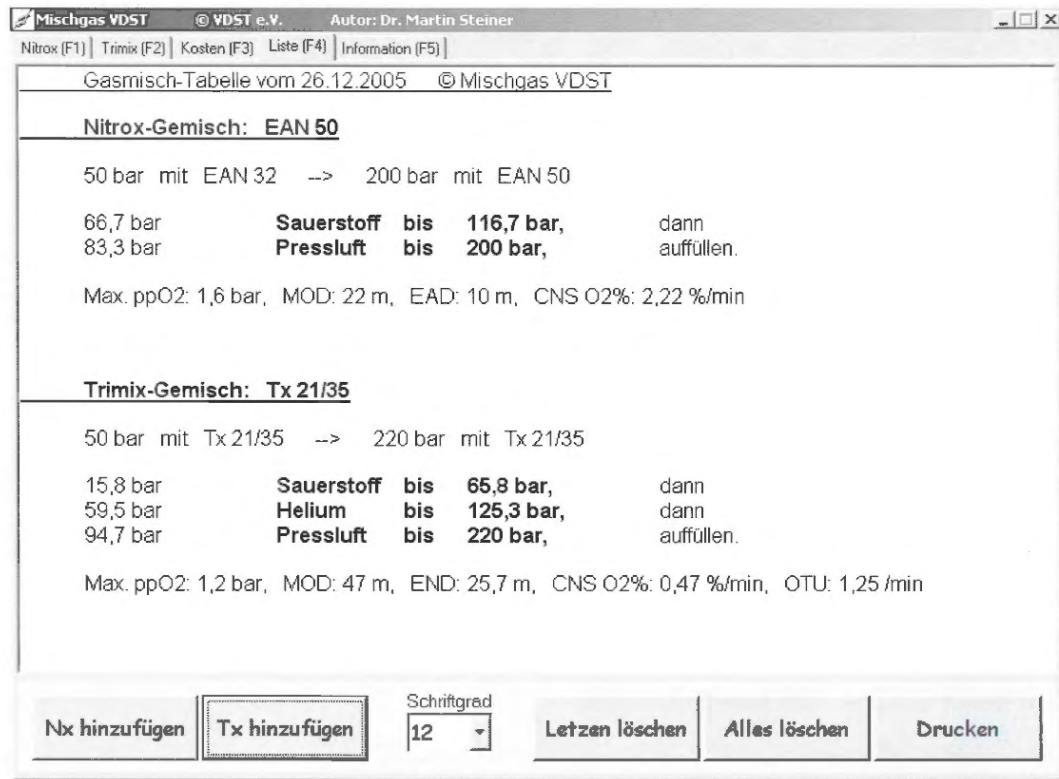


Abbildung 25: Seite zur Erstellung einer ausdrückbaren Liste mit Füllplänen

Auf dieser Seite (Abbildung 25) kann man die ausgerechneten Gemische eintragen und danach ausdrucken lassen.

Vorgehensweise

- Man klickt auf die Knöpfe "Nx hinzufügen" oder "Tx hinzufügen". Das Programm trägt die aktuellen Gemische in die Liste ein.
- Man klickt auf den Knopf "Drucken". Das Programm gibt einem eine Auswahlmöglichkeit der auf dem System vorhandenen Drucker und druckt nach der Bestätigung die Liste.

Man kann jederzeit die letzte Eingabe ("Letzten Löschen") oder das gesamte Blatt ("Alles Löschen") widerrufen.

Um ein besseres Druckergebnis zu erzielen, kann durch das mittlere Auswahlm Menü die Schriftgröße nahezu beliebig verändert werden.

Zusätzlich kann der Benutzer in dem Textfeld auch Änderungen vornehmen bzw. Kommentare einfügen, die natürlich auch so mit ausgedruckt werden.

Da der benötigte Speicherplatz zu groß wäre, wird der Inhalt der Liste beim Beenden des Programms nicht mit abgespeichert.

Methode der Berechnung: Partialdruck-Methode

Bei dieser Methode zur Herstellung von Gasmischen unterschiedlicher Zusammensetzung werden die einzelnen Komponenten nach ihren Partialdruckanteilen am Gesamtdruck der Tauchflasche berechnet.

Beispiel:

Eine Tauchflasche ist mit 40 bar normaler Pressluft (wir nehmen vereinfacht an: 21 % Sauerstoff + 79 % Stickstoff, die restlichen Edelgase werden dem Stickstoff zugerechnet) gefüllt. Das entspricht vorhandenen Partialdrücken (IST) von

$$40 \text{ bar} \cdot 0,21 = 8,4 \text{ bar Sauerstoff}$$

$$40 \text{ bar} \cdot 0,79 = 31,6 \text{ bar Stickstoff}$$

Man möchte nun für den nächsten Tauchgang in dieser Flasche 200 bar Nitrox 32 benutzen, also ein Atemgasgemisch, welches bis zu einem Anteil von 32 % mit Sauerstoff angereichert wurde und dementsprechend nur noch einen Stickstoffanteil von 68 % hat. Das entspricht gewollten Partialdrücken (SOLL) von

$$200 \text{ bar} \cdot 0,32 = 64 \text{ bar Sauerstoff}$$

$$200 \text{ bar} \cdot 0,68 = 136 \text{ bar Stickstoff}$$

Die Differenzen (DIFF) sind also (SOLL - IST = DIFF)

$$64 \text{ bar} - 8,4 \text{ bar} = 55,6 \text{ bar Sauerstoff}$$

$$136 \text{ bar} - 31,6 \text{ bar} = 104,4 \text{ bar Stickstoff}$$

die es nun aufzufüllen gilt. Hätten wir dafür reinen Sauerstoff und reinen Stickstoff zur Verfügung, wäre das ein leichtes, denn dann müsste man lediglich zu dem aktuellen Druck in der Flasche diese Differenz auffüllen, also

$$40 \text{ bar (RESTDRUCK)} + 55,6 \text{ bar (DIFF Sauerstoff)} =$$

$$95,6 \text{ bar (AKT. DRUCK)} + 104,4 \text{ bar (DIFF Stickstoff)} = 200 \text{ bar (ENDDRUCK)}.$$

Leider ist dies nicht so einfach, da wir im Allgemeinen zwar reinen Sauerstoff zur Verfügung haben, aber eigentlich nie reinen Stickstoff. Die einzige Möglichkeit, unser Gemisch mit Stickstoff anzureichern besteht im Auffüllen von Pressluft. Hierbei kommt aber immer auch ein Anteil Sauerstoff dazu, der also vorher von der Differenz des aufzufüllenden reinen Sauerstoffs abgezogen werden muss. Auf gut deutsch, wir brauchen vorher weniger reinen Sauerstoff 'vorzudrücken'. Um also 136 bar Stickstoffdifferenz aufzufüllen, muss man

$$104,4 \text{ bar (DIFF Stickstoff)} / 0,79 \text{ (Anteil Stickstoff in Pressluft)} = 132,2 \text{ bar (DIFF Pressluft)}$$

auffüllen. Das wiederum entspricht einer Sauerstoffmenge in der Pressluft von

132,2 bar (DIFF Pressluft) • 0,21 (Anteil Sauerstoff in Pressluft) = 27,8 bar (ZUSATZ Sauerstoff).

welche wiederum von der gesamten Sauerstoffdifferenz abgezogen werden muss

55,6 bar (DIFF Sauerstoff) - 27,8 bar (ZUSATZ Sauerstoff) = 27,8 bar (DIFF Sauerstoff korrigiert).

Letztendlich kommt also heraus, dass man, um auf das gewünschte Gemisch zu kommen, folgende Füllvorschrift einhalten muss:

Gasmisch-Tabelle vom 26.12.2005 © Mischgas VDST		
<u>Nitrox-Gemisch: EAN 32</u>		
40 bar mit EAN 21 --> 200 bar mit EAN 32		
28,0 bar	Sauerstoff bis 68 bar,	dann
132,0 bar	Pressluft bis 200 bar,	auffüllen.
Max. pO ₂ : 1,6 bar, MOD: 40 m, EAD: 29 m, CNS O ₂ %: 0,83 %/min		

Top Up Tabellen Nitrox und Trimix

Die folgenden Top Up Tabellen für Nitrox- (Abbildung 26) und Trimix-Gemische (Abbildung 27) wurden mit Sorgfalt erstellt. Die Verfasserin übernimmt aber für die Werte keine Gewähr und es entbindet den Gasmischer auch nicht davon, die fertigen Mischungen bezüglich des Sauerstoff- bzw. Heliumgehaltes zu überprüfen.

Die Top Up Tabellen beruhen auf Berechnungen zur Anwendung mit der Partialdruckmethode auf Basis der Idealen Gasgleichung. Sie können sowohl zum Befüllen von leeren Flaschen als auch zum Auftoppen von Restgemischen genutzt werden.

Erklärung zur Handhabung der Mischtabellen

Für Flaschen ohne Restdruck

Soll eine leere Flasche gefüllt werden, sucht man die Zeile mit dem gewünschten Gemisch und die Spalte mit dem gewünschten Zieldruck und erhält den Wert des Sauerstoffs und Heliums, der in die Flasche gefüllt werden muss, bevor mit Luft aufgetoppt werden kann.

Beispiele:

1. Eine leere Flasche soll mit Nitrox 50 auf 230 bar gefüllt werden.

Sauerstoffanteil	MOD ppO ₂ max = 1,3 bar	MOD ppO ₂ max = 1,4 bar	Füllung in bar												
			30	40	50	60	70	80	90	...	200	210	220	230	
21%	51 m	56 m	0	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31%	31 m	35 m	4	5	6	8	9	10	11	...	25	27	28	29	
32%	30 m	33 m	4	6	7	8	10	11	13	...	28	29	31	32	
33%	29 m	32 m	5	6	8	9	11	12	14	...	30	32	33	35	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	
49%	16 m	18 m	11	14	18	21	25	28	32	...	71	74	78	82	
→ 50%	16 m	18 m	11	15	18	22	26	29	33	...	73	77	81	84	

Die Zeile „Sauerstoffanteil 50 %“ und Spalte „230 bar“ ergeben den Wert 84 bar.

D. h. die Flasche muss mit reinem Sauerstoff bis 84 bar gefüllt und dann mit Luft bis 230 bar aufgetoppt werden.

2. Ein leeres Doppel-12 l Gerät soll mit Trimix 21/35 auf 200 bar gefüllt werden.

Sauerstoffanteil	Heliumanteil	max. Einsatztiefe	Füllung in bar												Einsatz als
			...	50		...	200		210		220				
				O ₂	He		O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He			
12%	60%	90 m	...	2	30	...	9	120	10	126	10	132			
15%	55%	75 m	...	4	28	...	14	110	15	116	15	121	Bottom-gas		
18%	45%	60 m	...	4	23	...	16	90	17	95	18	99			
→ 21%	35%	45 m	...	5	18	...	19	70	20	74	20	77			
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		

Die Zeile „Sauerstoffanteil 21 % und Heliumanteil 35 %“ und die Spalte „200 bar“ ergibt einen Sauerstoffdruck von 19 bar und einen Heliumdruck von 70 bar.

D. h. das Doppel-12 l Gerät wird zunächst bis 19 bar mit Sauerstoff gefüllt und dann 70 bar Helium zugefügt, also bis zu einem Gesamtdruck von 89 bar (Sauerstoff plus Helium). Danach wird das Gerät bis 200 bar mit Luft aufgefüllt.

Für Flaschen mit Restdruck

Soll ein bestehendes Gemisch aufgefüllt werden, müssen zwei Werte beachtet werden: Zunächst sucht man in der Tabelle nach der schon in der Flasche befindlichen Gemisch-/Druck-Paarung (Ist-Wert), dann nach dem gewünschten Gemisch inkl. Zieldruck (= Zielwert). Vom Ziel-Wert wird der Ist-Wert abgezogen und ergibt damit die aufzufüllende Gasmenge.

Beispiele:

3. Eine 10 l Flasche mit Nitrox 32 hat einen Restdruck von 50 bar und soll mit einem Nitrox 50 bis 200 bar gefüllt werden.

Sauerstoff-anteil	MOD ppO ₂ max = 1,3 bar	MOD ppO ₂ max = 1,4 bar	Füllung in bar											
			30	40	50	60	70	80	90	...	200	210	220	230
21%	51 m	56 m	0	0	0	0	0	0	0	...	0	0	0	0
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
31%	31 m	35 m	4	5	6	8	9	10	11	...	25	27	28	29
→ 32%	30 m	33 m	4	6	7	8	10	11	13	...	28	29	31	32
33%	29 m	32 m	5	6	8	9	11	12	14	...	30	32	33	35
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
49%	16 m	18 m	11	14	18	21	25	28	32	...	71	74	78	82
→ 50%	16 m	18 m	11	15	18	22	26	29	33	...	73	77	81	84

Der Sauerstoffgehalt von 32 % und der Restdruck von 50 bar ergeben abgelesen einen Wert von 7 bar und der Zielwert Nitrox 50 bei 200 bar einen Wert von 73 bar.

D. h. die Flasche muss mit 73 bar - 7 bar = 66 bar reinem Sauerstoff auf einen Druck von 116 bar (= 50 bar Restdruck + 66 bar O₂) und dann mit Luft auf 200 bar aufgefüllt werden.

4. Ein Doppel-7 l Gerät mit Trimix 21/35 und einem Restdruck von 50 bar soll mit einem Trimix 21/35 auf 220 bar gefüllt werden.

Sauerstoff-anteil	Helium-anteil	max. Einsatz-tiefe	Füllung in bar										Einsatz als
			50		200		210		220				
			O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He			
12%	60%	90 m	...	2	30	...	9	120	10	126	10	132	Bottom-gas
15%	55%	75 m	...	4	28	...	14	110	15	116	15	121	
18%	45%	60 m	...	4	23	...	16	90	17	95	18	99	
→ 21%	35%	45 m	...	5	18	...	19	70	20	74	20	77	
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	

In der Tabelle abgelesen Trimix 21/35 bei 50 bar ergibt für Sauerstoff den Wert 5 bar, für Helium 18 bar.

Trimix 21/35 bei 220 bar abgelesen ergibt 20 bar für Sauerstoff und 77 bar für Helium.

Das Gerät muss also zunächst mit (20 - 5) bar = 15 bar Sauerstoff auf 65 bar (= 50 bar Restdruck + 15 bar O₂) Enddruck gefüllt werden.

Danach werden (77 - 18) bar = 59 bar Helium bis zu einem Enddruck von 124 bar gefüllt und das Ganze dann mit Luft bis zum Zieldruck von 220 bar aufgefüllt.



Nitrox Top Up Chart

Sauerstoff- anteil	MOD ppO ₂ max = 1,3 bar	MOD ppO ₂ max = 1,4 bar	Füllung in bar																				
			30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230
21%	51 m	56 m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
22%	49 m	53 m	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3
23%	46 m	50 m	1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3	4	4	4	4	5	5	5	6	6	6
24%	44 m	48 m	1	2	2	2	3	3	3	4	4	5	5	6	6	6	7	7	8	8	8	9	9
25%	42 m	46 m	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	8	9	9	10	10	11	11	12
26%	40 m	43 m	2	3	3	4	4	5	6	6	7	8	8	9	9	10	11	11	12	13	13	14	15
27%	38 m	41 m	2	3	4	5	5	6	7	8	8	9	10	11	11	12	13	14	14	15	16	17	17
28%	36 m	40 m	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	13	14	15	16	17	18	19	19	20
29%	34 m	38 m	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
30%	33 m	36 m	3	5	6	7	8	9	10	11	13	14	15	16	17	18	19	21	22	23	24	25	26
31%	31 m	35 m	4	5	6	8	9	10	11	13	14	15	16	18	19	20	22	23	24	25	27	28	29
32%	30 m	33 m	4	6	7	8	10	11	13	14	15	17	18	19	21	22	24	25	26	28	29	31	32
33%	29 m	32 m	5	6	8	9	11	12	14	15	17	18	20	21	23	24	26	27	29	30	32	33	35
34%	28 m	31 m	5	7	8	10	12	13	15	16	18	20	21	23	25	26	28	30	31	33	35	36	38
35%	27 m	30 m	5	7	9	11	12	14	16	18	19	21	23	25	27	28	30	32	34	35	37	39	41
36%	26 m	28 m	6	8	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27	28	30	32	34	36	38	40	42	44
37%	25 m	27 m	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	41	43	45	47
38%	24 m	26 m	6	9	11	13	15	17	19	22	24	26	28	30	32	34	37	39	41	43	45	47	49
39%	23 m	25 m	7	9	11	14	16	18	21	23	25	27	30	32	34	36	39	41	43	46	48	50	52
40%	22 m	25 m	7	10	12	14	17	19	22	24	26	29	31	34	36	38	41	43	46	48	51	53	55
41%	21 m	24 m	8	10	13	15	18	20	23	25	28	30	33	35	38	41	43	46	48	51	53	56	58
42%	20 m	23 m	8	11	13	16	19	21	24	27	29	32	35	37	40	43	45	48	51	53	56	58	61
43%	20 m	22 m	8	11	14	17	19	22	25	28	31	33	36	39	42	45	47	50	53	56	58	61	64
44%	19 m	21 m	9	12	14	17	20	23	26	29	32	35	38	41	44	47	49	52	55	58	61	64	67
45%	18 m	21 m	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	43	46	49	52	55	58	61	64	67	70
46%	18 m	20 m	9	13	16	19	22	25	28	32	35	38	41	44	47	51	54	57	60	63	66	70	73
47%	17 m	19 m	10	13	16	20	23	26	30	33	36	39	43	46	49	53	56	59	63	66	69	72	76
48%	17 m	19 m	10	14	17	21	24	27	31	34	38	41	44	48	51	55	58	62	65	68	72	75	79
49%	16 m	18 m	11	14	18	21	25	28	32	35	39	43	46	50	53	57	60	64	67	71	74	78	82
50%	16 m	18 m	11	15	18	22	26	29	33	37	40	44	48	51	55	59	62	66	70	73	77	81	84

© J. Arens

Abbildung 26: Nitrox Top Up Tabelle

Die Nitrox und Trimix Top Up Tabellen können als pdf-Datei unter www.vdstnitrox.de herunter geladen und ausgedruckt werden.



Trimix Top Up Chart

Abbildung 27: Trimix Top Up Tabelle

Sauerstoffanteil	Heliumanteil	max. Einsatztiefe	Füllung in bar																								Einsatz als
			10		20		30		40		50		60		70		80		90		100		110		120		
			O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	
12%	60%	90 m	0	6	1	12	1	18	2	24	2	30	3	36	3	42	4	48	4	54	5	60	5	66	5	72	Bottomgas
15%	55%	75 m	1	6	1	11	2	17	3	22	4	28	4	33	5	39	6	44	6	50	7	55	8	61	8	66	
18%	45%	60 m	1	5	2	9	2	14	3	18	4	23	5	27	6	32	7	36	7	41	8	45	9	50	10	54	
21%	35%	45 m	1	4	2	7	3	11	4	14	5	18	6	21	7	25	7	28	8	32	9	35	10	39	11	42	
30%	30%	36 m	2	3	4	6	6	9	8	12	10	15	12	18	14	21	15	24	17	27	19	30	21	33	23	36	
32%	0%	30 m	1	0	3	0	4	0	6	0	7	0	8	0	10	0	11	0	13	0	14	0	15	0	17	0	
35%	35%	33 m	3	4	5	7	8	11	11	14	14	18	16	21	19	25	22	28	24	32	27	35	30	39	32	42	Dekogas
50%	0%	21 m	4	0	7	0	11	0	15	0	18	0	22	0	26	0	29	0	33	0	37	0	40	0	44	0	
50%	15%	21 m	4	2	8	3	12	5	16	6	20	8	24	9	28	11	33	12	37	14	41	15	45	17	49	18	
50%	25%	21 m	4	3	9	5	13	8	17	10	22	13	26	15	30	18	35	20	39	23	43	25	48	28	52	30	

Sauerstoffanteil	Heliumanteil	max. Einsatztiefe	Füllung in bar																								Einsatz als
			130		140		150		160		170		180		190		200		210		220		230		240		
			O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	O ₂	He	
12%	60%	90 m	6	78	6	84	7	90	7	96	8	102	8	108	9	114	9	120	10	126	10	132	10	138	11	144	Bottomgas
15%	55%	75 m	9	72	10	77	11	83	11	88	12	94	13	99	13	105	14	110	15	116	15	121	16	127	17	132	
18%	45%	60 m	11	59	11	63	12	68	13	72	14	77	15	81	16	86	16	90	17	95	18	99	19	104	20	108	
21%	35%	45 m	12	46	13	49	14	53	15	56	16	60	17	63	18	67	19	70	20	74	20	77	21	81	22	84	
30%	30%	36 m	25	39	27	42	29	45	31	48	33	51	35	54	37	57	39	60	41	63	43	66	45	69	46	72	
32%	0%	30 m	18	0	19	0	21	0	22	0	24	0	25	0	26	0	28	0	29	0	31	0	32	0	33	0	
35%	35%	33 m	35	46	38	49	41	53	43	56	46	60	49	63	51	67	54	70	57	74	59	77	62	81	65	84	Dekogas
50%	0%	21 m	48	0	51	0	55	0	59	0	62	0	66	0	70	0	73	0	77	0	81	0	84	0	88	0	
50%	15%	21 m	53	20	57	21	61	23	65	24	69	26	73	27	77	29	81	30	85	32	90	33	94	35	98	36	
50%	25%	21 m	56	33	61	35	65	38	69	40	74	43	78	45	82	48	87	50	91	53	95	55	100	58	104	60	

© J. Arens

Mischpraxis

Gewissenhaftes, methodisches Vorgehen ist unerlässlich für das sichere Mischen von Atemgasen!

- Jede Flasche bekommt vor dem Füllen ein detailliertes Füll-Etikett (siehe Abbildung 28).
- Jeder abgeschlossene Schritt wird auf dem Füll-Etikett abgehakt.
- Das Füll-Etikett wird erst entfernt, wenn es durch ein Analyse-Etikett ersetzt wird.
- Nur leere Flaschen dürfen ohne Etikett bleiben.
- Vor jedem Füllvorgang wird der Druck der Speicherflasche überprüft.
- Auf der Speicherflasche wird nach jedem Füllvorgang der Restdruck auf einem Etikett vermerkt.

Mischpraxis – Füll-Etikett

50 bar
Tx 21/35

+ 15 bar O₂
→ 65 bar

+ 59 bar He
→ 124 bar

Top Air
→ 220 bar

→ Tx 21/35

- Restinhalt der zu füllenden Flasche
Tx 21/35 mit 50 bar Restdruck
- Aufzufüllende Menge Sauerstoff
- Gesamtdruck nach Sauerstofffüllung
- Aufzufüllende Menge Helium
- Gesamtdruck nach Heliumfüllung
- Abhaken des bereits durchgeführten Teilschritts
- Gesamtdruck nach dem
Auffüllen der Flasche mit Luft
- Angestrebtes Gemisch
Tx 21/35 mit 220 bar

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Abbildung 28: Fülletikett

Das Fülletikett dient dem Gasmischer dazu, seinen Füllplan schriftlich festzuhalten, und stellt so während des gesamten Füllvorgangs eine klare, eindeutige Referenz dar. Durch das Abhaken der erfolgten Schritte ermöglicht es auch nach einer eventuellen Ablenkung oder Pause, das sichere und richtige Weiterführen des Füllvorganges. Wenn das Mischen

und das Auftoppen mit Luft nicht am selben Ort und am selben Tag durchgeführt werden oder mehrere Flaschen parallel gefüllt werden, ist der Status der Flasche jederzeit auf jedem Fülletikett ablesbar. Daher sollte vor jedem Füllvorgang jede Flasche als erstes mit einem entsprechenden Fülletikett versehen werden, auch wenn in mehrere Flaschen das gleiche Gemisch gefüllt werden soll.

Das Fülletikett wird erst entfernt, wenn es durch ein Analyse-Etikett ersetzt wird. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass immer der aktuelle Status der Flasche schriftlich auf dieser fixiert ist und keine undefinierten Gemische/Gemischreste herumstehen. Um Verwechslungen zu vermeiden ist es hilfreich, Fülletiketten und Analyseetiketten aus unterschiedlich farbigem Klebeband zu nutzen,

Bevor Gas von einer Speicherflasche in eine Tauchflasche übergeströmt wird, muss sichergestellt sein, dass die Speicherflasche einen höheren Startdruck aufweist als die Tauchflasche. Hiermit wird vermieden, dass ein Gasgemisch aus der Tauchflasche in die Speicherflasche zurückströmt und diese damit verunreinigt. Prinzipiell soll dieses durch ein Rückschlagventil am Füllschlauch vermieden werden, das beschriebene Vorgehen dient aber der zusätzlichen Sicherheit.

Bei der Verwendung von 300 bar Speicherflaschen müssen unbedingt die maximal zulässigen Arbeitsdrücke aller zum Füllen verwendeten Komponenten (Überströmschlauch, Nadelventil etc.) überprüft werden.

Achtung: Viele Manometern sind für den Gebrauch mit Sauerstoff nur bis 200 bar zugelassen, auch wenn der zulässige Arbeitsdruck 300 bar beträgt.

Werden mehrere Speicherflaschen eines Gases für die Füllvorgänge verwendet ("Kaskadieren von Speicherflaschen") ist es hilfreich nach jedem Füllvorgang auf jeder Speicherflasche mittels eines Etiketts den aktuellen Restdruck zu vermerken. Dies erleichtert beim nächsten Füllvorgang die Auswahl der geeigneten Speicherflasche.

Es wird immer wieder über eine Art Schichtung der Gase in der Flasche berichtet, die direkt nach dem Füllen zu unsinnigen Analyseergebnissen führt. Daher empfiehlt es sich, bei allen Füllvorgängen die Flasche liegend zu lagern, da dies zu einer schnelleren, besseren Durchmischung der Gase beiträgt, und sie nach dem letzten Füllvorgang zu schütteln oder zu rollieren bevor sie analysiert wird.

Mischen von Nitrox

Im Folgenden wird der Ablauf und das methodische Vorgehen beim Mischen von Nitrox bzw. im darauf folgenden Abschnitt auch von Trimix vorgestellt. Exemplarisch wird jeweils das Mischen mittels Überströmschlauch erläutert, da dies die einfachste Installation darstellt und von vielen Tauchern privat so genutzt wird.

Kommt eine Mischkonsole oder ein mobiler Mischkoffer zum Einsatz, ist das prinzipielle Vorgehen identisch, allerdings werden die Speicherflaschen fest mit der Mischkonsole verbunden, die benötigten Manometer und häufig auch ein Analysegerät sind in die Konsole integriert. Da jeder Hersteller seine Mischkonsole etwas anders aufbaut, muss die Bedienungsanleitung sorgfältig gelesen und befolgt werden.

1. Startdruck und -gemisch (analysieren) der zu füllenden Tauchflasche ermitteln
2. Füllplan festlegen (Berechnen oder mittels Top Up Tabelle ermitteln)
3. Flasche mit Füll-Etikett versehen
4. Sauerstoff-Speicherflaschendruck ermitteln
5. Tauchflasche mit der Sauerstoff-Speicherflasche, die den geringsten nutzbaren Druck hat, verbinden und Tauchflaschenventil ganz öffnen.
6. Sauerstoff langsam bis zum Zieldruck gemäß Füll-Etikett überströmen. Das Speicherflaschenventil dabei sehr langsam und vorsichtig öffnen, um Druckstöße im System zu vermeiden.
7. Ggf. Speicherflasche wechseln, falls der Druck der ersten Speicherflasche nicht ausreicht
8. Füllschritt auf dem Füll-Etikett abhaken
9. Beschriften der Speicherflasche mit dem neuen Restdruck
10. Auffüllen der Tauchflasche mit Luft auf berechneten Enddruck

Nitrox-Gemische lassen sich relativ exakt auftoppen, d. h. befindet sich ein Rest eine Nitrox-Mischung in der Flasche, muss diese nicht zwangsläufig abgelassen werden, bevor die Flasche erneut gefüllt wird. Dies gilt auch, wenn ein von der vorigen Mischung abweichendes Nitrox-Gemisch hergestellt werden soll. Sicherer ist es aber generell beim Mischen von Gasen mit einer leeren Flasche zu beginnen.

Mischen von Trimix

Die ersten Schritte (1.-9.) zum Mischen von Trimix sind analog zur Herstellung von Nitrox, danach kommt dann zusätzlich zum Sauerstoff noch das zweite Reingas Helium mit ins Spiel:

1. Startdruck und -gemisch (analysieren!) der zu füllenden Tauchflasche ermitteln
2. Füllplan festlegen (Berechnen oder mittels TopUp-Tabelle ermitteln)
3. Flasche mit Füll-Etikett versehen
4. Sauerstoff-Speicherflaschendruck ermitteln
5. Tauchflasche mit der Sauerstoff-Speicherflasche, die den geringsten nutzbaren Druck hat, verbinden und Tauchflaschenventil ganz öffnen.
6. Sauerstoff langsam bis zum Zieldruck gemäß Füll-Etikett überströmen. Das Speicherflaschenventil dabei sehr langsam und vorsichtig öffnen, um Druckstöße im System zu vermeiden.
7. Ggf. Speicherflasche wechseln, falls der Druck der ersten Speicherflasche nicht ausreicht
8. Füllschritt auf dem Füll-Etikett abhaken
9. Beschriften der Speicherflasche mit dem neuen Restdruck
10. Druck der Helium-Speicherflasche bestimmen
11. Tauchflasche mit der Helium-Speicherflasche, die den geringsten nutzbaren Fülldruck hat, verbinden
12. Helium bis zum Zieldruck gemäß Füll-Etikett überströmen
13. Ggf. Speicherflasche wechseln, falls der Druck der ersten Speicherflasche nicht ausreicht
14. Füllschritt auf dem Füll-Etikett abhaken
15. Beschriften der Helium-Speicherflasche(n) mit dem neuen Restdruck
16. Auffüllen der Flasche mit Luft auf berechneten Enddruck

Es sollte immer in der Reihenfolge: zuerst Sauerstoff, dann Helium, gefüllt werden. Auf diese Weise wird generell nur mit relativ niedrigen Sauerstoffdrücken gearbeitet. Dies bedeutet einen deutlichen Sicherheitsgewinn beim Füllen, da ja die Brennbarkeit von Materialien unter Sauerstoffeinfluss mit dem Druck (und der Temperatur) deutlich ansteigt.

Wird allerdings mit Hilfe eines manuellen Manometers gemischt und soll zudem ein Gasgemisch hergestellt werden, das nur einen geringen Anteil an reinem Sauerstoff erfordert, sollte die Reihenfolge getauscht werden: Da die Ablesegenauigkeit gerade im unteren Bereich einer 300 bar Skala relativ schlecht ist, würde ansonsten die gefüllte Sauerstoffmenge eher der Schätzung als einer exakten Messung unterliegen.

Trimix-Gemische aufzutoppen gestaltet sich um einiges schwieriger, als dies bei Nitrox-Gemischen der Fall ist. Dies hängt mit der doch recht großen Abweichung vom idealen Gasverhalten der Trimix-Gemische zusammen und erfordert daher sehr viel Erfahrung und das Analysieren von Helium- und Sauerstoffanteil sowohl im Start- als auch im fertigen Zielgemisch. Zudem wird eine jede Abweichung bei Gasen, die für tiefe Tauchgänge eingesetzt werden sollen, um einiges kritischer als bei Gasen, die im Bereich bis 40 m zum Einsatz kommen. Es wird daher dringend dazu geraten, vor dem Mischen von Trimix, die zu füllende Flasche vollständig zu leeren!

Alle im Kapitel "Mischungsberechnung" vorgestellten Verfahren zur Berechnung eines Gasgemisches beruhen auf dem Gesetz der idealen Gase, da so eine einfache Berechnung möglich ist und diese Berechnungen im Allgemeinen hinreichend genau sind. Beim Mischen von Trimix merkt man aber schnell, dass je nach Füllgeschwindigkeit und damit einhergehender Erwärmung des Gases, das erzeugte Gasgemisch nur bedingt mit der Berechnung übereinstimmt. Um diesem umstand Rechnung zu tragen gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Es wird sehr langsam gefüllt und dem Gas zwischen den einzelnen Füllschritten Zeit zum Abkühlen gegeben. Der Druck wird jeweils nach dem Abkühlen nochmals kontrolliert und bei Bedarf Gas nachgefüllt.
2. Es wird etwas schneller gefüllt (unter Beachtung der Sicherheitsaspekte im Umgang mit Sauerstoff) und dem Gas keine Zeit zum Abkühlen gelassen. Zum Ausgleich wird mit so genannten Korrekturfaktoren gearbeitet. D. h. es wird nicht exakt die berechnete Gasmenge gefüllt sondern bis zu einem um einen gewissen Faktor höheren Druck. Diese Korrekturfaktoren sind aber abhängig von:
 - der jeweiligen Füllgeschwindigkeit und der daraus resultierenden Temperaturänderung des Gases
 - der Umgebungstemperatur
 - der Reihenfolge in der die Gase Sauerstoff und Helium gefüllt werden.

Mit anderen Worten, jeder muss seine persönlich funktionierenden Korrekturfaktoren selber herausfinden. Als Startwerte, wenn Sauerstoff zuerst gefüllt wird, kann mit folgenden Werten experimentiert werden: Für Sauerstoff 5 % mehr als der nach idealer Gasgleichung berechnete Wert vorgibt und für Helium 10 % mehr als der nach idealer Gasgleichung berechnete Wert vorgibt.

Im Grundsatz gilt für das Mischen von Trimix, dass der durch die Tauchgangsplanung festgelegte Sauerstoff- und Heliumanteil so genau wie möglich stimmen sollte. Ein abweichender Sauerstoffanteil (> 1 %-Punkt) im Gas hat bei tiefen Tauchgängen eine erhebliche Auswirkung auf den geplanten Tauchgangsverlauf, was maximale Tauchtiefe und Dekoplanung angeht. In der Tauchpraxis kann dagegen


ein geringfügig nach oben abweichender Heliumanteil (≤ 5 %-Punkte) toleriert werden, da die Verschiebung, die sich für die Dekompression hieraus ergibt, nicht signifikant ist.

Umgang mit Kompressor und Personal Filter

Der Umgang mit einem Kompressor ist eigentlich nicht Gegenstand eines Gasmischerkurses sondern sollte in einem gesonderten Bedienerkurs erlernt werden. Trotzdem soll im Folgenden kurz auf die wichtigsten Punkte bei der Bedienung eines Kompressors im Allgemeinen eingegangen werden.

Atemluft-Kompressor

Kompressor: Verdichtung von Umgebungsluft auf Zieldruck, z. B. 230 bar oder 300 bar



- Betrieb nur durch eingewiesene Personen
- Ansaugung schadstofffreier Umgebungsluft sicherstellen
- Regelmäßig Kondensat ablassen
- Filterstandzeit immer einhalten, bei feuchter oder warmer Luft: Filter früher wechseln
- Sicherstellen, dass kein Gemisch in Kompressor zurückströmen kann

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher
Bildquelle: © Bauer Kompressoren

Abbildung 29: Umgang mit dem Atemluft-Kompressor

Ein Kompressor sollte nur von eingewiesenen Personen bedient werden, um einen fachgerechten Betrieb des Kompressors zu gewährleisten. Besonders bei der Nutzung eines Kompressors, der von einem Benzinmotor angetrieben wird, muss darauf geachtet werden, dass schadstofffreie Luft angesaugt wird (Gefahr einer CO/CO₂-Vergiftung). Aber auch bei einem Elektromotor-getriebenen Kompressor muss darauf geachtet werden, dass keine Schadstoffe (z. B. Autoabgase) angesaugt werden können.

Bei vielen Kompressoren muss regelmäßig das entstehende Kondensat abgelassen werden (ca. alle 15 min), um eine Verunreinigung des Filters

und auch der Flasche mit einem Wasser/Öl-Gemisch zu vermeiden. Ebenso muss die Filterstandzeit immer eingehalten werden. Aber es ist zu beachten, dass warme und feuchte Ansaugluft und ein warmer Aufstellungsort des Kompressors die Filterstandzeit deutlich verringert. Die Angaben des Herstellers hierzu müssen eingehalten werden.

Bei allen Füllvorgängen, auch wenn ausschließlich Luft gefüllt wird, muss sichergestellt sein, dass kein Gas zurück in den Kompressor bzw. die Filterpatrone strömen kann (Brand bzw. Explosionsgefahr), dies gilt aber besonders beim Auffüllen von Mischgasflaschen, die einen erhöhten Sauerstoffanteil enthalten. Am Füllschlauch des Kompressors muss also immer ein höherer Druck als in der Flasche anliegen, bevor diese geöffnet wird. Zur Sicherheit muss ein zusätzliches Rückschlagventil verwendet werden, da die meisten Kompressoren zwar mit einem Druckhalteventil, nicht aber mit einem Rückschlagventil ausgestattet sind.

Umgang mit dem Personal Filter

Nur der richtige Umgang mit einem Personal Filter gewährleistet sichere saubere Luft!



© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

- Gebrauchsanweisung beachten
- Rückschlagventil verwenden
- Maximal zulässige Durchflussmenge nicht überschreiten
- Vom Filter benötigten Mindestdruck einhalten
- Filternutzung protokollieren (Etikett auf Filter)
- Filterstandzeit immer einhalten,
bei feuchter oder warmer Luft:
Filter früher wechseln

Bildquelle: © Jutta Arens

Abbildung 30: Umgang mit dem Personal Filter

Wenn nicht sichergestellt werden kann, dass ein Kompressor saubere Luft liefert, muss mit einem Zusatzfilter, dem so genannten Personal Filter, gefüllt werden. Dies gilt natürlich nicht nur dann, wenn ein hoch sauerstoffhaltiges Gemisch mit Luft aufgefüllt werden soll sondern generell, da die Tauchflasche ja prinzipiell sauerstoffrein gehalten werden soll.

Aber auch im Umgang mit einem Zusatzfilter müssen gewisse Maßnahmen getroffen werden, um ein einwandfreies Funktionieren des Filters zu gewährleisten.

Die handelsüblichen Filter werden direkt in das Ventil der Tauchflasche geschraubt und auf der anderen Seite mit dem Füllschlauch des Kompressors verbunden. Da hier ebenfalls die Gefahr des Rückströmens von hoch sauerstoffhaltigen Gasen aus der Tauchflasche in den u. a. mit Aktivkohle gefüllten Filter (Explosionsgefahr) besteht, sollte ein Rückschlagventil zwischen Filter und Tauchflasche zum Einsatz kommen. Zudem muss wieder darauf geachtet werden, dass der von der Kompressorseite anliegende Druck immer höher ist als der aktuelle Flaschendruck.

Ein Zusatzfilter kann nur dann einwandfrei funktionieren, also Feuchtigkeit etc. aus der Pressluft herausfiltern, wenn die vom Hersteller angegebene maximale Durchflussmenge nicht überschritten wird. Es muss also überprüft werden, ob der verwendete Kompressor eine unter der Durchflussmenge des Filters liegende Luftlieferleistung aufweist. Ist dies nicht der Fall muss mit einer geeigneten Drossel sichergestellt werden, dass die maximal zulässige Durchflussmenge nicht überschritten wird.

Achtung: Wenn die maximal zulässige Durchflussmenge überschritten wird, kann es passieren, dass Aktivkohlestaub aus dem Filter in die Tauchflasche gelangt. In Kombination mit Sauerstoff ergibt das ein hochentzündliches Gemisch.

Jeder Filter braucht einen gewissen Mindestdruck, um ordnungsgemäß zu arbeiten. Soll also eine leere oder fast leere Flasche mit Hilfe eines Filters mit Luft gefüllt werden, muss sichergestellt sein, dass der Filter immer unter einem Mindestdruck von ca. 70-80 bar steht. Dieser Mindestdruck kann (durch Ablesen des Druckes am Manometer des Füllschlauches) über das Tauchflaschenventil oder aber über ein geeignetes Nadelventil geregelt werden, das zwischen Filter und Flasche installiert ist.

Um auch beim Zusatzfilter die Standzeit der Filterpatrone nicht zu überschreiten, muss die Filternutzung gewissenhaft protokolliert werden. Dies geschieht am Besten nach jedem Füllvorgang mittels einer Etikette auf dem Filter selber, da so alle relevanten Informationen fest mit dem Filter verbunden sind.

Auch bei einem Zusatzfilter gilt: Bei feuchter und/oder warmer Luft verringert sich die Standzeit des Filters massiv. Daher immer die Herstellerangaben zum Thema lesen und einhalten.

Da ein Personal Filter u. a. mit so genanntem Molekularsieb zur Bindung der Feuchtigkeit der Pressluft gefüllt ist, muss der Filter immer mit gut dichtenden Endkappen/-stopfen gelagert werden, um ein Aufsättigen des Molekularsiebs mit der Feuchtigkeit der Umgebungsluft während der Lagerung zu vermeiden. Nur so kann eine korrekte Funktion auch nach längerer Lagerzeit gewährleistet werden. Im Zweifelsfall sollte die

Filterpatrone gewechselt werden, wenn der Filter lange nicht genutzt wurde.

Füllprotokoll

Wird ein Gasgemisch für eine andere Person hergestellt, ist es zur Absicherung sowohl des Gasmischers als auch des Tauchers/Kunden unerlässlich, ein Füllprotokoll zu erstellen. Dieses Protokoll sollte das Datum der Füllung enthalten, den Namen des Gasmischers und des Kunden, das erstellte Gasgemisch, das Analyseergebnis und die MOD des Gases und die Unterschrift des Kunden (Tabelle 6).

Bei der Übergabe der Tauchflasche an den Kunden muss dieser im Beisein des Gasmischers das Gas analysieren, das Analyseergebnis in das Protokoll eintragen und mit seiner Unterschrift die Richtigkeit aller Angaben und die erfolgte Übergabe bestätigen.

Tabelle 6: Füllprotokoll

Nr.	Datum	Gasmischer	Kunde	Gemisch	Analyseergebnis		MOD [m]	Unterschrift Kunde
					O ₂ [%]	He [%]		
1	27.12.2005	J. Mischer	O. Tiefer	T ₂ 21/35	21,2	35,8	45	O. Tiefer
2	02.01.2006	J. Mischer	U. Schnurckler	EAN 32	31,8	-	40	U. Schnurckler
3								
4								
5								
6								

Gasanalyse

Solange nur mit Luft getaucht wird, sollte für den Taucher immer klar sein, wie die Zusammensetzung seines Atemgases ist und wo die Grenzen der Einsetzbarkeit des Gases liegen. Wird aber mit anderen Gasgemischen getaucht, sei es Nitrox, Trimix oder Heliox, kann nur durch eine Analyse des Gases sichergestellt werden, welche Zusammensetzung vorliegt.

Wirklich wichtig für den Taucher ist der Sauerstoffanteil, da dieser wegen seine toxische Wirkung unter erhöhtem Druck der wichtigste limitierende Faktor für die Einsetzbarkeit eines Atemgases darstellt und zudem für die Berechnung und Planung der Dekompression ein wichtiger Faktor ist.

Daher nimmt die Analyse des Sauerstoffanteils eine wichtige Rolle sowohl beim Tauchen mit Nitrox als auch bei allen anderen Mischgasen ein.

Beim Tauchen mit Trimix und Heliox wird dann zusätzlich noch der Heliumanteil für die Bestimmung der Narkosetiefe und die Berechnung der Dekompressionsverpflichtung interessant. Da Heliox eine Mischung aus Sauerstoff und Helium ist, ist durch die Analyse des Sauerstoffs automatisch auch der Heliumanteil mit bestimmt. Anders verhält es sich bei Trimix. Ist der Sauerstoffanteil durch Analyse bestimmt kann zwar davon ausgegangen werden, dass der Heliumanteil ebenfalls dem berechneten entspricht, ganz sicher kann man aber auch hier nur durch eine Analyse sein.

Steht dem Taucher bzw. Gasmischer ausschließlich ein Sauerstoffanalysegerät zur Verfügung sollte bereits während des Mischvorgangs analysiert werden, sobald beide Reingase in die Flasche gefüllt wurden. Stimmt jetzt der Sauerstoffanteil, muss auch der Heliumanteil stimmen, da ja bisher nur diese beiden Gase gefüllt wurden. Das Gemisch kann also mit Luft weiteraufgefüllt werden. Anschließend muss noch der endgültige Sauerstoffanteil analysiert werden, da ja durch die Luft noch weiterer Sauerstoff der Mischung zugeführt wurde.

Beispiel: Es soll ein Tx 18/45 mit 220 bar Enddruck gemischt werden.

Hierfür wird zunächst 18 bar Sauerstoff in die Flasche gefüllt und danach 99 bar Helium. Wird die Flasche jetzt analysiert sollte ein O₂-Analysewert von ca. 15,4 % gemessen werden, der Rest, also 84,6 %, müssen also Helium sein. Wird dann die Flasche mit Luft aufgefüllt und nochmals analysiert, sollte ein Wert von ca. 18^{±0,5} % gemessen werden. Stimmt der O₂-Analysewert muss auch der Heliumgehalt von 45 % stimmen.

Wird bei gleicher Füllmethode nur am Ende des gesamten Füllvorgangs analysiert und der richtige O₂-Wert gemessen, müsste theoretisch auch der Heliumwert stimmen. Falls die oben beschriebene Zwischenanalyse (aus welchen Gründen auch immer) nicht durchgeführt wurde, kann zur Not noch über eine Sprechprobe, nachdem das Gasgemisch in mehreren

tiefen Zügen eingeatmet wurde, getestet werden, ob der Heliumgehalt der Größenordnung nach stimmt: Ab einem Heliumgehalt von 30 % kann man eine leichte Veränderung der Stimme hin zu einem höheren Ton hören. Je höher die Stimme durch das Einatmen des Heliumhaltigen Gemisches wird, desto mehr Helium ist enthalten.

Die sicherste Möglichkeit den Heliumgehalt zu bestimmen, bleibt aber natürlich die Heliumanalyse.


Analyse und Etikettierung

Das gemessene Analyseergebnis muss natürlich nicht nur im Kopf des Tauchers oder auf dem Protokoll des Gasmischers festgehalten werden sondern muss gut sichtbar in Form eines Analyse-Etiketts auf der entsprechenden Tauchflasche angebracht werden. Bei Doppel- wie bei Einzelflaschen für das Grundgemisch empfiehlt sich eine Position hinten links auf der Flaschenschulter (Abbildung 31), so dass es vom Tauchpartner gut kontrolliert werden kann.

Bei Stageflaschen sollte das Analyse-Etikett so auf der Flaschenschulter angebracht werden, dass es vom Taucher während des Tauchgangs selber gut kontrolliert werden kann.

Gasanalyse & Etikettierung

Analyseergebnisse müssen gut sichtbar auf der Flasche angebracht werden!



Gute Position für Einzel- und Doppelflaschen:
„hinten links“ auf Flaschenschulter

Wichtig:
MOD für Tauchpartner gut sichtbar = überprüfbar!

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Bildquelle: © Jutta Arens

Abbildung 31: Anbringung des Analyse-Etiketts

Ein Analyse-Etikett (Abbildung 32) muss folgende Informationen enthalten:

- **MOD (Equivalent Narcotic Depth, Maximale Einsatztiefe)**
Diese muss in großen Zahlen, gut lesbar oben auf das Etikett geschrieben werden, da sie die wichtigste Information zur Planung und Durchführung des Tauchgangs ist.
- **Gemisch**
Hiermit ist das geplante Gemisch gemeint. Es wird entsprechend der im Kapitel "Tauchgase" vorgestellten Nomenklaturen für Nitrox, Trimix oder Sauerstoff aufgeschrieben.
- **Sauerstoff-Analyseergebnis**
Das Analyseergebnis muss immer mit mindestens einer Nachkommastelle aufgeschrieben werden, um es klar von der Angabe des Wunschgemisches abzuheben und klarzustellen, dass es sich um einen analysierten Wert handelt.
- **Helium-Analyseergebnis**
Falls Helium analysiert wird sollte das Analyseergebnis ebenfalls auf dem Etikett vermerkt werden. Es gilt ebenso wie beim Sauerstoff, dass das Analyseergebnis mit mindestens einer Nachkommastelle vermerkt werden muss, um Verwechslungen zwischen geplanten Gemisch und tatsächlich analysiertem Wert zu vermeiden.

Gasanalyse & Etikettierung

Atemgase müssen vor dem Tauchgang immer analysiert und etikettiert werden!

45

Tx 21/35

21,2% O₂

35,5% He

10.10.05

J. Arens

Die Etikettierung kann zusätzlich auch das Analyseergebnis der Heliumanalyse enthalten:

- MOD (Maximale Einsatztiefe)
- **Gewünschtes Gemisch**
(EAN x, Oxy100, Tx x/x oder Air)
- **O₂-Analyseergebnis**
immer mit Nachkommastelle!
- **He-Analyseergebnis**
immer mit Nachkommastelle!
- Datum
- Name

© 2005 Verband Deutscher Sporttaucher

Bildquelle: © Jutta Arens

Abbildung 32: Analyseetikett mit Sauerstoff- und Helium-Analyseergebnis

- **Datum**

Es sollte für den Taucher zu erkennen sein, falls ein Gemisch länger unbenutzt gestanden hat. Daher sollte das Analyseergebnis auf dem Etikett vermerkt werden und bei längerer Standzeit das Gemisch zur Sicherheit erneut analysiert werden.

- **Name**

Jeder Taucher muss sein Gemisch selber analysieren, da von dem richtigen und richtig niedergeschriebenen Analyseergebnis schließlich auch sein Leben abhängt. Daher sollte jede Flasche mit dem Namen desjenigen, der sie analysiert hat versehen werden und beim Tausch von Flaschen das Analyseergebnis nochmals überprüft werden.

Analysegeräte

Es gibt Sauerstoffanalysegeräte von verschiedensten Herstellern. Die Bauformen unterscheiden sich zwar etwas, aber die generelle Funktionsweise ist bei allen für den Tauchsport angebotenen Geräten gleich.

Die Funktionsweise des Sensors beruht auf einem elektro-chemischen Verfahren. Er stellt eine vom Sauerstoff-Partialdruck abhängige Stromquelle dar, benötigt also keine eigene Stromversorgung. Der Strom wird erzeugt durch Oxidations- und Reduktionsvorgänge innerhalb des Sensors. Je höher der Sauerstoffanteil des gemessenen Gases, desto höher ist der erzeugte Strom. Dieser wird über einen Widerstand in eine Spannung umgewandelt, von einer Elektronik gemessen und in einen Sauerstoffprozentsatz umgerechnet und angezeigt.

Ein Nachteil dieses Sensorprinzips ist die Abhängigkeit der Messung von Temperatur und Staudruck vor dem Sensor (max. Durchflussgeschwindigkeit beachten). In den meisten Analysegeräten ist zwar eine Temperaturkompensation eingebaut, diese funktioniert aber nur dann, wenn die Temperaturkompensation (realisiert mittels Widerständen) und das zu messende Gas die gleiche Temperatur haben. Ist die Temperaturkompensation im Inneren des Sensors untergebracht, stellt dies kein Problem dar, ist sie aber in einem vom Gasstrom getrennten Gehäuse muss das Analysegerät auf die gleiche Temperatur wie das Gas gebracht werden, z. B. durch Lagerung des Gerätes am gleichen Ort wie die Tauchflaschen. Aber Achtung im Winter: viele O₂-Analysegeräte funktionieren nicht unterhalb einer Temperatur von ca. 4° C.

Da ein Sauerstoff-Sensor eine begrenzte Lebensdauer hat (er verbraucht sich ähnlich wie eine Batterie), muss vor jedem Analysevorgang ein Funktionstest in Form einer Kalibrierung mit einem Gas bekannter Zusammensetzung durchgeführt werden. Üblicherweise wird hierfür Umgebungsluft verwendet, zum Teil aber auch reiner Sauerstoff. Das Ende der Sensor-Lebensdauer kündigt sich meist dadurch an, dass es länger als gewöhnlich dauert, bis sich das Analysegerät auf den Endwert einpendelt bzw. der automatische Kalibriervorgang länger als normal

dauert. Die Lebensdauer beträgt üblicherweise 1-2 Jahre (siehe jeweilige Herstellerangabe).

Feuchtigkeit wirkt sich Lebensdauer verkürzend auf den Sensor aus. Er sollte daher immer trocken gelagert werden.

Beim Kauf eines Sauerstoff-Analysegerätes ist auf folgende Punkte zu achten (Abbildung 33), es sollte

- über eine ausreichende Messwertauflösung von mindestens einer Nachkommastelle verfügen
- einfach bedienbar und
- einfach kalibrierbar sein und
- über eine Temperaturkompensation (möglichst in Sensornähe) verfügen.



Abbildung 33: Sauerstoffanalysegerät

Helium-Analysegeräte werden entweder als separates Gerät oder als kombiniertes Helium- und Sauerstoff-Analysegerät angeboten. Letzteres bietet den Vorteil, dass jede Flasche nur einmal angeschlossen werden muss, um beide Gase zu analysieren, und die Messwerte auf einen Blick zur Verfügung stehen, Kombigeräte sind zudem kaum teurer als ein reines Helium-Analysegerät.

Helium-Sensoren basieren auf einem anderen Prinzip als die oben beschriebenen Sauerstoffsensoren. Der Heliumsensors liefert ein Signal, das proportional zu der Wärmeleitfähigkeit des Gasgemisches ist. Dieses Signal wird von einem Mikroprozessor mit gespeicherten Daten verglichen und umgerechnet in einen Heliumprozentsatz. Da sich ein Heliumsensors nicht verbraucht wie ein Sauerstoffsensors, hat er eine sehr hohe Lebensdauer.

Für die Eigenschaften, die ein Heliumanalysegerät erfüllen sollte, gilt aber das gleiche wie für ein Sauerstoff-Analysegerät:

- ausreichende Messwertauflösung von mindestens einer Nachkommastelle
- einfache Bedienbarkeit
- einfache Kalibrierbarkeit
- Temperaturkompensation

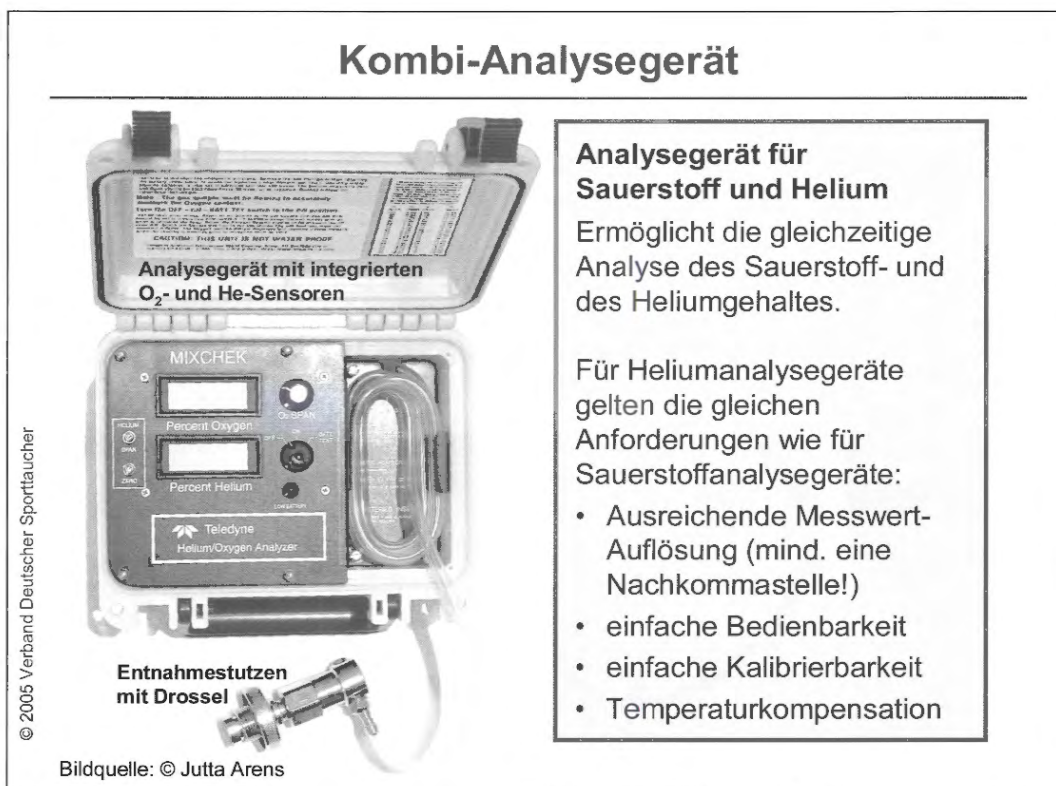


Abbildung 34: Kombiniertes Helium- und Sauerstoff-Analysegerät

Vorschriften und Normen

Bisher sind viele Vorschriften und Normen in den vielen (aber nicht allen) Bundesländern nicht bindend für Privatpersonen, aber: Sobald z. B. an einer kommerziell betriebenen Füllstation gefüllt wird oder es zu einem Unfall kommt, können sich Probleme ergeben, wenn Vorschriften und Normen nicht eingehalten wurden.

Alle hier aufgeführten Vorschriften und Normen können sich ändern und die folgende Zusammenstellung erhebt keinerlei Anspruch auf Vollständigkeit. Der Taucher steht also immer selber in der Pflicht sich über Neuerungen zu informieren!

Transport von Druckbehältern

Der Transport von Druckbehältern ist durch die ADR⁵ geregelt. Aber: „Die Vorschriften des ADR gelten nicht für: Beförderungen gefährlicher Güter, die von Privatpersonen durchgeführt werden, sofern diese Güter einzelhandelsgerecht abgepackt sind und für den persönlichen oder häuslichen Gebrauch oder für Freizeit und Sport bestimmt sind, vorausgesetzt, es werden Maßnahmen getroffen, die unter normalen Beförderungsbedingungen ein Freiwerden des Inhalts verhindern.“ (Quelle: ADR - Ziffer 1.1.3.1, 1.1.2005)

Die ADR wird aber alle 2 Jahre unter Einbeziehung der die neuesten technischen und juristischen Erkenntnisse überarbeitet. Die Gültigkeit für Privatpersonen kann sich also auch schnell ändern.

Für den Transport von Tauch- und Speicherflaschen wird empfohlen:

- eine Ladungssicherung
Z. B. Verzurren der Flaschen mittels Spanngurten
- ein Ventilschutz
Z. B. Ventilschutzkappe bei Speicherflaschen, u. a. gasdichter Blindstopfen bei Tauchflasche
- eine korrekte Kennzeichnung der Flaschen
Gefahrgutaufkleber und Farbkennzeichnung nach DIN EN 1089 Teile 2 & 3

⁵ ADR: Die ADR ist das Europäische Übereinkommen über die Beförderung gefährlicher Güter auf der Straße (Accord européen relatif au transport international des marchandises Dangereuses par Route)

Kennzeichnung von Druckgasbehältern

Die einzige verbindliche Kennzeichnung des Gasinhaltes erfolgt durch Gefahrgutaufkleber nach EN 1089-2 (Abbildung 35).



Abbildung 35: Gefahrgutaufkleber zur Kennzeichnung von Druckgasbehältern

Die Farbkennzeichnung nach EN 1089-3 dient nur der zusätzlichen Information über Eigenschaften der Gase (giftig, oxidierend etc.) und ist zudem auf größere Entfernung erkennbar als ein Gefahrgutaufkleber. Sie ermöglicht es z. B. Feuerwehrleuten Gefahrensituationen einschätzen zu können ohne sich in den unmittelbaren Gefahrenbereich begeben zu müssen. Daher ist es gerade im Hinblick auf Autounfälle auf dem Weg zum oder vom Tauchplatz ratsam, die Tauchflasche mit der korrekten Farbkennzeichnung zu versehen, auch wenn diese Norm nicht für Privatpersonen bindend ist, da die Rettungsarbeiten u. U. deutlich schneller durchgeführt werden können, wenn das Risiko, das von einer Druckgasflasche im Auto ausgeht für die Rettungskräfte real einzuschätzen ist.

Die Farbkennzeichnung nach Norm betrifft lediglich die Flaschenschulter, allerdings gibt es in Deutschland eine Vereinbarung der Deutschen Gaseindustrie, für Medizin-/Inhalationsgase weiß lackierte Flaschenkörper und für Industriegase grau oder in Schulterfarbe lackierte Flaschenkörper zu nutzen.

Gasmischer Manual Vorschriften und Normen

Die Norm sieht für die Farbkennzeichnung auf der Flaschenschulter drei verschiedene Gruppen vor: die allgemeinen Gase, die gebräuchliche Gase und die Inhalationsgase.

Die allgemeine Kennzeichnung sieht lediglich eine Unterscheidung von vier grundsätzlichen Gaseigenschaften vor.

Gaseigenschaft	Schulterfarbe
oxidierend	hellblau
brennbar	rot
giftig und/oder korrosiv	gelb
inert	leuchtendes Grün

Die Farbe leuchtendes Grün ist nicht zulässig für Inhalationsgase!

Diese allgemeine Gaskennzeichnung gilt für alle Gase außer für die unter gebräuchliche Gase und Inhalationsgase aufgeführten.

Unter die gebräuchlichen Gase fallen folgende Reingase:

Gas	Schulterfarbe
Sauerstoff	weiß
Helium	braun
Argon	dunkelgrün
Acetylen	kastanienbraun
Stickstoff	schwarz
Lachgas	blau
Kohlendioxid	grau

Unter Inhalationsgase fallen folgende Gasgemische:

Gaseigenschaft	Schulterfarbe
Synthetische Luft/Druckluft für Atemzwecke	weiß und schwarz
Sauerstoff/ Helium	weiß und braun
Sauerstoff/ Kohlendioxid	weiß und grau
Sauerstoff/ Lachgas	weiß und blau

Diese Schulterfarben gelten ausschließlich für Inhalationsgase, sind also für industrielle Gase gleichen Inhaltes nicht zulässig!

Gasmischer Manual Vorschriften und Normen

Tauchflaschen müssen in Deutschland also mit einer weißen Farbkennzeichnung versehen werden, wenn sie mehr als 22 % Sauerstoff enthalten.

Die Kennzeichnung "N" dient zur Unterscheidung der Farbkennzeichnungen nach Neuer Norm EN 1089-3 gegenüber denen nach alter Norm, muss aber nur noch bis zum Ablauf der Übergangsfrist am 30.06.2006 verwendet werden.

Alle Farbkennzeichnungen finden sich auch auf der diesem Manual beigelegten Farbtafel.

Prüffristen

Für die Regelung der Prüffristen gilt die Betriebssicherheitsverordnung, die für

"Atemschutzgeräte, die als Tauchgeräte verwendet werden,

- eine Festigkeitsprüfung spätestens alle 5 Jahre und
- eine äußere Prüfung, innere Prüfung und Gewichtsprüfung alle 2,5 Jahre"

von zugelassenen Überwachungsstellen vorschreibt.

(Quelle: §15 Absatz 7 Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV vom 27.09.2002, letzte Änderung vom 07.07.2005)

Um unterscheiden zu können, welche der beiden Prüfung durchgeführt wurde, werden bei der Festigkeitsprüfung ein "F", und bei der Außen- und Innen- und Gewichtsprüfung ein "I" neben dem Zeichen der Überwachungsstelle eingestempelt.

Tauchflaschen, deren Prüffristen abgelaufen sind, müssen sofort entleert werden, ein "Leertauchen" ist nicht mehr zulässig.

Gewindenormen

Die verschiedenen, zurzeit gültigen Gewindenormen sowohl für Tauchflaschenventile (verdichtete Atemgase und Tauchgase) als auch für Speicherflaschenventile (Gas bzw. Gasgemisch) für verschiedene Nenndrücke können Abbildung 36 entnommen werden.

Verdichtetes Atemgas bzw. Tauchgas	Gewinde und Gewindelänge am Ausgangsstutzen für Drücke		Normen
	bis zu 250 bar (Nenndruck 200 bar oder 230 bar)	von 250 bis 350 bar (Nenndruck 300 bar)	
Luft	G 5/8; 12 mm	G 5/8; 18 mm	DIN EN ISO 12209-2:2001
Nitrox (>22 % O₂)	M 26 x 2; 12 mm	M 26 x 2; 18 mm	DIN EN 144-3:2003
Sauerstoff	M 26 x 2; 12 mm	M 26 x 2; 18 mm	DIN EN 144-3:2003

Gas bzw. Gasgemisch	Gewinde		Normen
	bis 200 bar Nenndruck (bis 300 bar Prüfdruck)	bis 300 bar Nenndruck (bis 450 bar Prüfdruck)	
Druckluft	G 5/8 Innengewinde Anschlussnr. 13	W 30 x 2 Anschlussnr. 56	bis 200 bar: DIN 477-1:1990 bis 300 bar: DIN 477-5:2002
Gemisch >22 Vol.-% O₂ mit Edelgas und/oder Stickstoff	G 3/4 Anschlussnr. 9	W 30 x 2 Anschlussnr. 59	bis 200 bar: DIN 477-1:1990 bis 300 bar: DIN 477-5:2002
Sauerstoff	G 3/4 Anschlussnr. 9	W 30 x 2 Anschlussnr. 59	bis 200 bar: DIN 477-1:1990 bis 300 bar: DIN 477-5:2002
Helium	W 21,80 x 1/14 Anschlussnr. 6	W 30 x 2 Anschlussnr. 54	bis 200 bar: DIN 477-1:1990 bis 300 bar: DIN 477-5:2002
Argon	W 21,80 x 1/14 Anschlussnr. 6	W 30 x 2 Anschlussnr. 54	bis 200 bar: DIN 477-1:1990 bis 300 bar: DIN 477-5:2002
Stickstoff	W 24,32 x 1/14 Anschlussnr. 10	W 30 x 2 Anschlussnr. 54	bis 200 bar: DIN 477-1:1990 bis 300 bar: DIN 477-5:2002

Abbildung 36: Gewindenormen für Tauch- und Speicherflaschenventile

Weiterführende Literatur im Internet

www.vdstnitrox.de

Physik:

www.nigelhewitt.co.uk/diving/maths/index.html (in Englisch)

Informationen und Sicherheitshinweise Gase:

www.airliquide.de/loesungen/produkte/gase/index.html

www.westfalen-ag.de/technische/luftzerlegung.php

www.industriegaseverband.de/neu/sicherheitshinweise.php

Informationen zu O-Ring-Materialien:

www.simrit.de