



Der Einsatz von speziellen Atemgasen im Bereich Technical Diving

(Eine Zusammenstellung aus einschlägigen und öffentlich zugänglichen Quellen)

von
Beat A. Müller

Swiss Cave Diving
www.swiss-cave-diving.ch

Basisversion V1 / 2008
Update V2.0 / 01.05.2018



Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Was ist technisches Tauchen überhaupt?	3
3.	Atemgase	5
3.1	Luft, Atemluft, Druckluft, Atemgase	5
3.2	Gängige Atemgaskomponenten und ihre Bedeutung	6
3.3	Verwendete Atemgas-Gemische beim Tauchen	9
3.4	Narkotischer Faktor von Gasen	12
3.5	Wärmetechnische Parameter	13
3.6	Zusammenfassung der wichtigsten Charakteristika	14

Anhang

1.	Recreational Technical Diving / Part 1	16
2.	Zusammensetzung der atmosphärischen Luft	17
3.	Technische Normen für Druckluft	18
4.	Reinheitsgrad von Gasen – Punkt Notation	22
5.	Graphische Übersicht Gase & Gasgemische	23
6.	Ein Historischer Rückblick zum Trimix Tauchen	24
7.	Recreational Technical Diving / Part 2	26



Der Einsatz von speziellen Atemgasen im Bereich Technical Diving

1. Einleitung

Dieser Script beleuchtet EINEN – allerdings ganz wesentlichen – Aspekt des technischen Tauchens, nämlich den der dabei eingesetzten Atemgase.

Leider muss man heute (2018) feststellen, dass ein grosser Anteil der Tauchzwischenfälle und – Unfälle auf den Gebrauch von Gasen ausserhalb ihrer physiologischen Einsatzgrenzen, d.h. tiefer als MOD (maximum operation depth) oder flacher als MinOD (minimum operation depth) zurückzuführen sind.

Der Fehler geschieht meist beim Wechsel von einem Atemgas zum nächsten. Obwohl es ausgefeilte „Vorgehens-Protokolle“ zu einem genau überwachten Gaswechsel gibt, kommt es immer wieder – auch bei sehr erfahrenen Tauchern – zu solchen Zwischenfällen. Ein prägnantes Beispiel aus jüngerer Vergangenheit ist der tödliche Unfall (O₂) im Rahmen des WKPP!

Es kommt dazu, dass die Symptome sowohl bei zu hohen pO₂ wie auch bei zu tiefen pO₂ im Allgemeinen sofort und unvermittelt, ohne jegliche Vorwarnung, einsetzen können (der WKPP Unfall ist hier die „berühmte“ Ausnahme von dieser Regel).

Eine ebenso gefährliche Situation kann in grossen Tiefen alleine durch die hohe Atemgasdichte und die damit verbundene Erhöhung der Atemarbeit (-> Essoufflement) gehen. Der damit wegen ungenügender Atmung entstehende CO₂ Anstieg (mit einer verbundenen Hyperkapnie) beschleunigt diesen fatalen Teufelskreis zusätzlich (s. Unfall von Peter Shaw in Boesmansgate / Südafrika).

Auch ein „breakthrough“ im Scrubber bei einem CCR führt zum gleichen, meist fatalen Endergebnis.

Genug Gründe also, um sich im Detail mit den beim Technical Diving reingesetzten Atemgasen näher zu befassen.

2. Was ist Technisches Tauchen überhaupt ?

(auszugsweise aus [wikipedia http://de.wikipedia.org/wiki/Technisches_Tauchen](http://de.wikipedia.org/wiki/Technisches_Tauchen);
s. dazu auch **Anhang 1**)

Das **technische Tauchen (Technical Diving, TecDiving, Tek-Tauchen, Tec-Tauchen)** ist ein Zweig des Sporttauchens, bei dem zusätzliche oder spezielle Tauchausrüstung eingesetzt wird um ein gesetztes Ziel zu erreichen. Im Gegensatz zum reinen Sporttauchen werden hierbei oft Ziele und Risiken anders bzw. neu definiert.

Technisches Tauchen zeichnet sich aus durch die Verwendung von weitaus mehr Tauchausrüstung und speziellen Trainingsanforderungen, um mit den zusätzlichen Risiken umgehen zu können, die diese Art des Tauchens mit sich bringt. Technisches Tauchen ist nicht für jedermann.

Die Übergänge zu wissenschaftlichen Tauchen, Tauchsport (Hobbytauchen), beruflichen Tauchen bzw. der Tauchforschung und anderen Teilgebieten sind fließend.

Weil beim Technischen Tauchen die Oberfläche in einem Notfall gewissermaßen unerreichbar ist, benötigen Technische Taucher umfangreiche Methoden und Technologien, sowie ein entsprechendes Training, um mit den zusätzlichen Risiken umgehen zu können. Auch wenn man diese beherrscht, beinhaltet Technisches Tauchen zugegeben mehr Risiko, potentielle Gefahren und geringere Fehlertoleranzen als Sporttauchen.



Charakteristika

Zusätzlich definiert es sich über einen oder mehrere der folgenden Punkte:

- Tauchen in über 40 Meter.
- Dekompressionsstufen sind erforderlich.
- Tauchen in einer geschlossenen Umgebung, wo der Zugang zur Oberfläche mehr als 40 lineare Meter beträgt.
- Beschleunigte Dekompression und/ oder der Einsatz von unterschiedlichen Gasgemischen während des Tauchgangs.
- Einsatz von technischen Hilfsmitteln wie DPV, pSCR, CCR (s. unten)

Grundsätzlich wird die normale Tauchausrüstung für tiefe und längerdauernde Tauchgänge benötigt. Diese wird aber den zusätzlichen Anforderungen entsprechend erweitert und teilweise verändert, Beispiele:

- **Spezielle Gasgemische**
 - Einsatz mehrerer Atemgemische (Trimix, Nitrox, Heliox, Hydreliox)
 - verschiedene Gasgemische für unterschiedliche Phasen des Tauchgangs (Travel Mix, Bottom Gas, Deko Gas)
- **Atemgeräte**
 - Kreislaufatmergeräte (*Rebreather*)
 - Mischgasausrüstung (Lungenautomat, Tauchcomputer (spezielle Mischgascomputer))
 - selbstgebaute bzw. umgebaute Atemmasken, etc.
 - einfache Einrichtungen für die nasse Dekompression
- **Ausrüstungsdepots**
 - zusätzliche Flaschen beim Höhlentauchen
 - zusätzliche Flaschen (*Stages*) mit verschiedenen Gasgemischen
- **Tauchprofile: Expositionszeit / Dekompression**
 - Langzeitaufenthalte unter Wasser beim Höhlentauchen
 - während Stunden (mit Aufenthalt in Glocke)
- **Zweckorientiertes Spezialzubehör**
 - Helmtauchgeräte beim historischen Tauchen, Schlauchgeräte
 - nasse, seltener trockene Unterwasserfahrzeuge (z.B. Tauchscooter, Aquascooter, Tauchschlitten)
 - Führungsleinen im Höhlentauchen und Wracktauchen sowie als Sicherungsleinen (Eistauen)
 - Kletterausrüstung (Höhlentauchen)
 - UW-Scooter
 - Taucherglocken für Langzeitdekompression
 - Vermessungsausrüstung für den Unterwassereinsatz, Suchleinen



3. Atemgase

Quellen: - VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag; 11. Aufl. 2013
- [http://de.wikipedia.org/wiki/..\[einzelne Gase\]...](http://de.wikipedia.org/wiki/..[einzelne Gase]...) ;
- Druckluft-Kompodium, Verlag Marie Leidorf, D-32369 Rahden
- 1 x 1 der Gase, Air Liquide, D-40235 Düsseldorf

Als **Atemgas** bezeichnet man ein Gasgemisch, das für Atmung mit Druckluftatemgeräten verwendet wird (Atemschutzgeräte der Feuerwehr, Lungenautomat beim Tauchen). Beim Einsatz von Atemgeräten wird das *Atemgas* in komprimierter Form in einer Druckluftflasche mitgeführt.

Während in Atemschutzgeräten ausschliesslich normale Luft zur Anwendung kommt, werden beim Tauchen sowohl im kommerziellen Bereich wie auch zunehmend im gehobenen Sporttauchen Gemische eingesetzt, die zusätzlich zu den Bestandteilen gewöhnlicher Luft noch weitere Komponenten enthalten oder die vollständig anders zusammengesetzt sind.

Nachfolgend eine kurze Zusammenstellung über Atemgas, Atemluft und Gaskomponenten

3.1 Luft, Atemluft, Druckluft, Atemgase

Luft (s. dazu **Anhang 2**)

Als **Luft** (oder atmosphärische Luft) bezeichnet man das Gasgemisch der Erdatmosphäre. Luft besteht hauptsächlich aus den zwei Gasen Stickstoff (78 %) und Sauerstoff (21 %). Daneben gibt es noch die Komponenten Argon (0,9 %), Kohlenstoffdioxid (0,04 %), Wasserstoff und Wasserdampf in Spuren. Im natürlichen Zustand ist die Luft geruchs- und geschmacklos.

Die Zusammensetzung der trockenen Luft ist (gerundet):

Stickstoff	78,07 Vol.-%	75,51 Gew.-%
Sauerstoff	20,96 Vol.-%	23,01 Gew.-%
Argon	0,93 Vol.-%	1,286 Gew.-%
Kohlendioxid	0,04 Vol.-%	0,04 Gew.-%

Die Haupt-Spurenelemente in der Luft mit ihren jeweiligen Konzentrationen sind:

Neon	18 ppm
Helium	5,3 ppm
Krypton	1,1 ppm
Wasserstoff	0,5 ppm
Xenon	0,08 ppm

Eine genaue Übersicht über die Zusammensetzung von atmosphärischer Luft findet sich unter **3.2**.

3.1.1 Atemluft (Einatemluft)

Damit ist generell diejenige Luft gemeint, welche wir einatmen, sei dies normobar (an Land, resp. bei ca. 1 bar) oder hyperbar (unter Druck grösser als der atmosphärische Druck an Land).

Luft wird in sog. „Pressluftflaschen“ (normentechnisch korrekt in „Druckgasbehälter“) unter einem höheren Druck zur Platzverringernng gespeichert und bei Bedarf über Druckminderventile (sog. Lungenautomaten) zur Atmung verwendet.



3.1.2 Ausatemluft

Ausatemluft ist die ausgeatmete Luft eines Menschen oder eines Tieres. Sie unterscheidet sich von der eingeatmeten Luft in ihrer Zusammensetzung. Atemluft enthält etwa 17 % Sauerstoff, 4 % Kohlendioxid, 78 % Stickstoff und 1 % sonstige Gase. Sie hat eine Temperatur von etwa 35 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von etwa 95 %.

3.1.3 Druckluft / Pressluft

Druckluft, bezeichnet komprimierte Luft, also verdichtete Luft als Energieträger mit vielfältigen Anwendungen, z. B. Antrieb von Druckluftwerkzeugen, für Sandstrahlgebläse, Spritzpistolen, pneumatische Förderung, Druckluftsteuerungen, Druckluftmotoren oder Druckluftlokomotiven. Druckluft wird in Verdichtern (z. B. Hubkolben-, Schrauben- oder Turboverdichtern) erzeugt, oftmals in mehreren Druckstufen. Der Druck liegt meist zwischen 8 und 200 bar.

Druckluft für solche technischen Anwendungen genügt NICHT den Anforderungen, wie sie für technische Atemluft gelten und darf deshalb nicht eingeatmet werden.

Umgangssprachlich wurde früher technische Druckluft auch mit **Pressluft** bezeichnet. Dies kann aber zu gefährlichen Verwechslungen mit der technischen Atemluft z.B. für Taucher führen, bei der auch oft die Bezeichnung Pressluft verwendet wird.

Die Reinheit der Druckluft für Atemgeräte wird in der DIN EN 12021 (früher DIN 3188) festgelegt. Eine Übersicht über die Normen für Druckluft findet sich in **Anhang 3**.

3.1.4 Technische Atemluft / Technische Atemluft, verdichtet

Als technische Atemluft, verdichtet, wird normativ korrekt Druckluft bezeichnet, die durch Abscheidung des enthaltenen Wassers und Ausfiltern von Verunreinigungen, wie unter anderem Feinstäuben und Ölen, so aufbereitet wurde, dass sie für Atemschutz-, oder Tauchgeräten (Atemregler) verwendet werden kann. In Deutschland wird die Qualität von Atemluft durch DIN EN 12021 (früher DIN 3188) standardisiert. Die Schweiz hat diese Norm ebenfalls unter SN EN 12021 übernommen.

Notwendig wird die Aufbereitung von Druckluft, da bei der Kompression der zugeführten Luft im Verdichter die Konzentration von Verunreinigungen ansteigt und weitere wie Öl oder Ausgasungen von Kunststoffteilen innerhalb des Geräts hinzukommen.

Atemschutzkompressoren verfügen daher über – oft mehrstufige – Filtersysteme. Die Atemluft wird dabei durch einen Kondensatabscheider und eine Trockenpatrone getrocknet, um Korrosion der Druckluftflasche durch Kondenswasser oder Einfrieren des Atemreglers zu vermeiden.

Bei Kompressoren mit Verbrennungsmotor muss sorgfältig darauf geachtet werden, dass keine Motorabgase angesaugt werden, da Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickoxide (NOx) nicht durch die Filter zurückgehalten werden.

3.2 Gängige Atemgaskomponenten und ihre Bedeutung

Die Verwendung von Luft abweichender Gemische hat im Wesentlichen zwei Gründe, die mit dem in zunehmender Tauchtiefe ansteigenden Druck zusammenhängen:

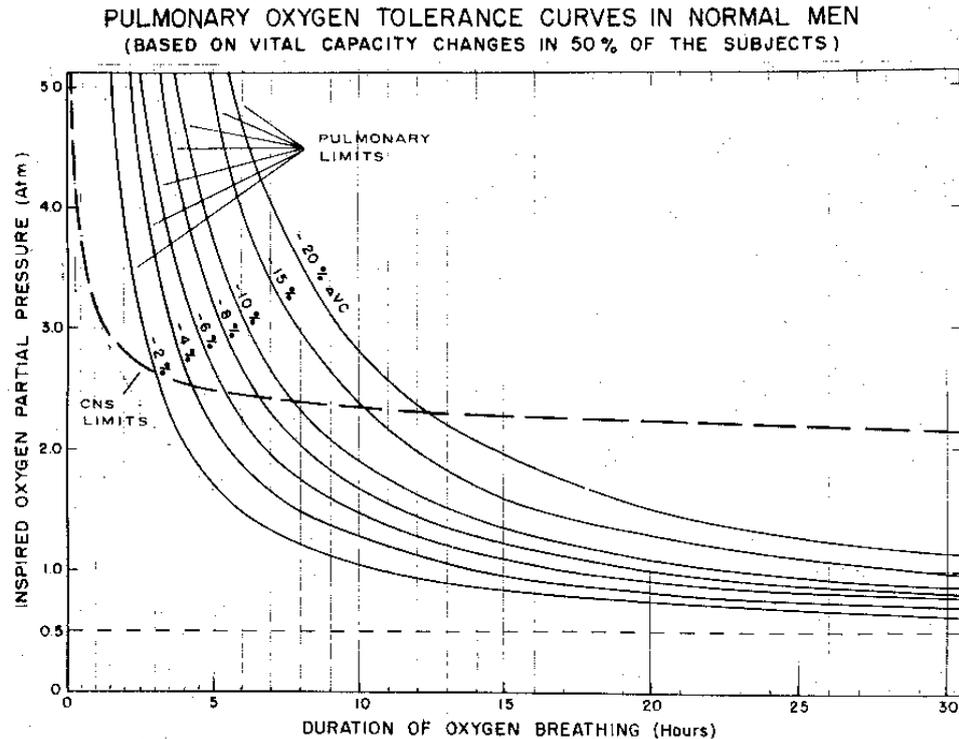
- Fast jedes Gas kann ab einem gewissen Gasdruck toxisch auf den Organismus eines Menschen wirken. Diese Gefahr kann verringert werden, indem entweder der Anteil (bei Gasgemischen wird hier meist mit dem Partialdruck gerechnet) der gefährlich werdenden Komponente reduziert oder sie völlig gegen ein bei diesem Druck ungefährlicheres Gas austauscht wird.
- Je höher der Gasdruck, desto grösser wird auch die Dichte des Atemgases, was ein „zäheres“ Strömen des Gases und damit einen Anstieg des Atemwiderstandes bewirkt. Dies kann zu einer Erschöpfung der Atemmuskulatur und damit Atemproblemen führen.



3.2.1 Sauerstoff

Jedes zum Atmen bestimmte Gasgemisch muss Sauerstoff enthalten.

Beim Tauchen geht man davon aus, dass - abhängig von den Umgebungs- und Arbeitsbedingungen - Sauerstoff ab einem Partialdruck von ca. 1,4 bar (Kälte, schwere Arbeit) bis 1,6 bar (warm, keine Anstrengung) zunehmend giftig auf das Zentrale Nervensystem einwirkt (Sauerstoffvergiftung), wobei die Gefahr bei noch höheren Drücken überproportional ansteigt und die Vergiftung ohne Vorwarnung schlagartig eintreten kann.



Verlauf der zulässigen O₂-Partialdrücke als Fkt. der Expositionszeit

(Quelle: "The Physiology and Medicine of Diving" by Peter Bennett and David Elliott, 4th edition, 1993, W.B.Saunders Company Ltd, London.)

Vergleichbar mit den Inertgasen (s.u.) findet auch beim Atmen von Sauerstoff unter höherem Druck eine Anreicherung im Organismus statt, die jedoch auf das Nervensystem beschränkt ist (erlangt jedoch nur bei Atemgemischen mit im Vergleich zu Luft deutlich erhöhtem Sauerstoffgehalt wirklich Bedeutung). Dies hat zur Folge, dass auch für Sauerstoff-Entsättigungszeiten und Restsättigungen berücksichtigt werden müssen (s. dazu die REPEX Tabellen der NOAA).

Bei der Herstellung der Gasgemische für das Tauchen, meist mit der Partialdruckmethode, wird üblicherweise Sauerstoff mit dem **Reinheitsgrad 2.5** verwendet (Punktnotation der Reinheitsgrade s. **Anhang 4**).

3.2.2 Inertgase

Unabhängig von der physikalisch / chemischen Bedeutung des Wortes versteht man bei Atemgasen hierunter ein *Gas, welches nicht an den Stoffwechselforgängen beteiligt ist und lediglich der Verdünnung des lebensnotwendigen Sauerstoffs dient.*

Auf Grund des Gesetzes von Henry lösen sich im Verlaufe des Aufenthaltes unter erhöhtem Druck die Inertgase mit steigendem Druck verstärkt im Körpergewebe und reichern sich an. Die Geschwindigkeit und der Grad der Aufsättigung hängt stark mit der Gewebeart und dessen Durchblutung zusammen, wobei gilt: Je stärker durchblutet, desto schneller und stärker gehen die Gase in Lösung.



Wird der Druck nun verringert, treten die gelösten Gase wieder aus den Geweben aus. Geschieht die Druckabsenkung (z.B. das Auftauchen) zu schnell, können die Inertgase nicht mit dem Blut abtransportiert und über die Lunge abgeatmet werden, sondern perlen noch im Gewebe oder Blut aus (Sprudelflascheneffekt), was zu lebensgefährlichen Gefässverstopfungen führt. Um Dekompressionserkrankungen zu vermeiden, darf die Verringerung des Druckes daher nur langsam im Rahmen einer kontrollierten Dekompression unter Einhaltung der erforderlichen Dekompressionszeiten erfolgen.

Stickstoff

Zu den bereits zuvor behandelten Effekten von Stickstoff als Inertgas (s.o.) tritt mit steigendem Druck ein zunehmend berauscher Effekt auf, der von Mensch zu Mensch vollkommen unterschiedliche Auswirkungen haben kann. Diese können von Angstzuständen oder Euphorie bis hin zur Bewusstlosigkeit reichen und werden allgemein unter dem Begriff Tiefenrausch zusammengefasst. Bei Sporttauchern geht man davon aus, dass ab einem Partialdruckbereich von etwa 4 bar, was mit Luft einer Tauchtiefe von ca. 40 m entspricht, mit dem Auftreten von Symptomen gerechnet werden kann.

Die Anfälligkeit hängt jedoch von so vielen Faktoren wie z.B. Gemütszustand, Tagesform, Umgebungsbedingungen etc. ab, dass *niemals* davon ausgegangen werden darf, dass ein Taucher, der bislang nie oder z.B. erst ab 50 m Symptome zeigte, dies nicht plötzlich auch bei 30 m schon tun kann.

Diese Wirkung des Stickstoffs ist der Hauptgrund, dass für Sporttaucher mit gewöhnlicher Pressluft 40 m als vernünftige Maximaltiefe des Tauchens empfohlen wird.

Helium

Helium ist nach Stickstoff das am häufigsten – hauptsächlich im technischen und kommerziellen Tauchen – verwendete Verdünnungsgas in Atemgemischen und hat in seiner Rolle als Inertgas ebenfalls die oben behandelten Effekte. Auf Grund seiner geringen Molekülgrösse finden jedoch sowohl die Lösung im Gewebe wie auch die Entsättigung schneller statt als beim Stickstoff. Diese höhere Beweglichkeit (Diffusion) hat paradoxerweise eher eine Verlängerung der Dekompressionszeiten zur Folge, da der Druck sehr viel behutsamer als beim Stickstoff verringert werden muss, um ein Ausperlen des schnell aus dem Gewebe ins Blut übertretenden Heliums zu verhindern.

Auch Helium hat in grösserer Tiefe eine Auswirkung auf das Zentrale Nervensystem, welches sich im so genannten High-Pressure-Nervous-Syndrome (HPNS oder umgangssprachlich Heliumzittern) bemerkbar macht. Hauptverantwortlich ist der Vorgang der Kompression der Nervenbahnen verbunden mit dem Einfluss des Heliums, wobei die Geschwindigkeit eine entscheidende Rolle spielt: Mit den beim technischen Tauchen typischen Abtauchgeschwindigkeiten kann ab einem Bereich von 150 bis 200 m mit dem Auftreten von Symptomen gerechnet werden, während bei den sehr langsamen Druckerhöhungen im kommerziellen Tauchen Tiefen bis 600 m ohne Effekt erreicht werden können. Weitere Eigenschaften von Helium im Vergleich zu Stickstoff sind:

- Eine geringere Dichte, wodurch bei gleichem Druck der Atemwiderstand deutlich niedriger ist.
- Eine höhere Wärmeleitfähigkeit, was ein stärkeres Auskühlen des Körpers über die Atmung bewirkt

Bei der Herstellung der Gasgemische für das Tauchen, meist mit der Partialdruckmethode, wird üblicherweise Helium mit dem **Reinheitsgrad 4.6** verwendet (Punktnotation der Reinheitsgrade s. **Anhang 4**).

Neon

Neon ist eine selten verwendete Komponente. Es gilt als teuer, ausserdem weist es einen im Vergleich mit Helium höheren Atemwiderstand auf. Es wirkt ebenfalls im oben beschriebenen Sinn als Inertgas.



Wasserstoff

Wasserstoff ist das häufigste chemische Element im Universum, jedoch nicht in der Erdkruste. Er ist Bestandteil des Wassers und beinahe aller organischen Verbindungen. Somit kommt gebundener Wasserstoff in sämtlichen lebenden Organismen vor.

Unter Bedingungen, die normalerweise auf der Erde herrschen, kommt Wasserstoff nicht in *atomarer Form (H)* vor, sondern in *molekularer (H₂)*, als farb- und geruchloses Gas.

In Verbindung mit Sauerstoff ist es ab gewissen Anteilen extrem feuer- und explosionsgefährlich (Knallgas-Reaktion).

Als Tauchgas ist Wasserstoff eine eher exotische Komponente, die nur sehr selten bei extremen Tauchgängen zum Einsatz kommt. Er wirkt ebenfalls im oben beschriebenen Sinn als Inertgas.

Argon

Das **Argon** (altgriechisch ἀργόν „das träge Element“; wegen seiner chemischen Reaktionsträgheit) ist ein chemisches Element im Periodensystem der Elemente mit dem Symbol Ar und der Ordnungszahl 18. Das farb- und geruchlose inerte einatomige Gas ist das häufigste Edelgas in der Erdatmosphäre.

Argon ist mit 0,933 Volumenprozenten das am häufigsten in der Atmosphäre vorkommende Edelgas. Es wird bei der fraktionierten Destillation flüssiger Luft (siehe Luftverflüssigung) gewonnen.

Die Löslichkeit von Argon in Wasser ist etwas höher als diejenige von Sauerstoff. Bei 25 °C beträgt sie 56 mg/l. Argon wird außerdem zusammen mit Stickstoff als relativ schlecht wärmeleitendes reaktionsträges Schutzgas in Glühlampen verwendet.

3.3 Verwendete Atemgas-Gemische beim Tauchen

(s. dazu graphische Übersicht im **Anhang 5**)

Luft (Pressluft, Druckluft)

Luft (Druckluft) ist das verbreitetste Atemgasgemisch und besteht vereinfacht betrachtet aus 79 % Stickstoff und 21 % Sauerstoff sowie Resten von Kohlendioxid und Edelgasen. Die Grenzen für Sporttaucher für das Tauchen mit Luft liegen durch die narkotische Wirkung des Stickstoffes (s.o.) bei empfohlenen 40 m. Spätestens im Bereich von über 60 bis 70 m macht die zusätzliche Gefahr durch Sauerstoffvergiftung das Risiko nicht mehr kalkulierbar.

Der Tauchversuch eines früheren Weggefährten Cousteaus mit Luft auf ca. 130 m endete tödlich.

Nitrox

Nitrox (zusammengesetzt aus **Nitrogenium (N₂)** und **Oxygenium (O₂)** oder auf englisch **NITROgen + (OXygen)**) ist die Bezeichnung für ein Atemgasgemisch beim Tauchen.

Eigentlich bezeichnet dieser Name nur eine Mischung von Stickstoff und Sauerstoff, wie es auch normale Luft ist (78,07 % Stickstoff, 20,96 % Sauerstoff, 0,93 % Argon, 0,036 % Kohlendioxid).

Im Sporttauchbereich versteht man aber unter diesem Begriff Atemgasgemische mit einem Sauerstoffanteil über 21 %. In der Regel liegt der Sauerstoffanteil zwischen 32 % und 40 %.

Enriched Air Nitrox

Man spricht im Zusammenhang daher auch teilweise von *Enriched Air* (mit Sauerstoff *angereicherte* Luft) oder *Enriched Air Nitrox* (EAN / EANx).

Die Anreicherung der Atemluft mit Sauerstoff bedeutet eine Reduzierung des Stickstoff-Anteiles beim Tauchen unter Wasser (Stickstoff wird gegen Sauerstoff ersetzt).

Durch den verringerten Stickstoffanteil wird das Risiko eines Tiefenrausches und eines Dekompressionsunfalls gesenkt.

Die erhöhte Gefahr einer Sauerstoffvergiftung begrenzt jedoch die maximale Tauchtiefe.



Sauerstoff

Reiner Sauerstoff wird beim technischen Tauchen als Dekompressionsgas verwendet, um die Dekompressionszeiten zu verkürzen. Die Einsatztiefe ist jedoch theoretisch auf die letzten Deko-Stops bei 3 bis 6 m begrenzt. Zur Dekompression werden auch Nitrox-Gemische (s. unten) mit sehr hohem O₂-Anteil verwendet, z.B. EAN50 (bis 22m) und EAN80 (bis 12m).

Eine Sonderanwendung ist die Verwendung in Sauerstoff-Kreislaufgeräten (Rebreather).

Divox

"Divox" ist nichts anderes als Sauerstoff für Taucher! In vielen Ländern in Europa gilt reiner Sauerstoff zum Atmen als medizinischer Sauerstoff im Vergleich zu industriellem Sauerstoff, wie er beim Schweißen verwendet wird, und ist nur auf ärztliche Verordnung erhältlich.

Die Tauchindustrie "kreierte" Divox und registrierte es als Markenzeichen, um die strengen Regeln bezüglich des medizinischen Sauerstoffs zu umgehen und es somit (Freizeit-) Sporttauchern leichter zu machen, Sauerstoff zum Mischen ihres Atemgases zu erhalten. In den meisten Ländern gibt es keinen Unterschied in der Reinheit von medizinischem Sauerstoff und industriellem Sauerstoff, da sie nach exakt den gleichen Methoden und Herstellern hergestellt, jedoch unterschiedlich gekennzeichnet und abgefüllt werden.

Der Hauptunterschied besteht darin, dass der Papiernachweis für medizinischen Sauerstoff sehr viel umfangreicher ist, um die genaue Herstellungsspur Sauerstoff-Charge leichter identifizieren zu können, falls später Probleme mit seiner Reinheit gefunden werden.

Trimix

Trimix ist ein spezielles Atemgasgemisch aus Sauerstoff, Stickstoff und Helium, das beim technischen Tauchen zum Erreichen grosser Tiefen bis ca. 200m, beim kommerziellen Tauchen auch tiefer genutzt wird.

Durch die Zugabe von Helium im Atemgas wird der O₂- und N₂-Gehalt auf akzeptable Werte angepasst. Die negativen Effekte von Sauerstoff und Stickstoff (Stickstoffnarkose, Sauerstoffvergiftung des ZNS und Dekompressionskrankheiten) werden dadurch minimiert.

Durch die Zugabe von Helium wird eine Sauerstoff-/Stickstoffnarkose weitestgehend unterdrückt, um hiermit Tauchtiefen unterhalb der üblichen Sporttauchergrenze von 40 Metern aufsuchen zu können (Historischer Rückblick zum Trimix-Tauchen s. **Anhang 6**).

Man unterscheidet zusätzlich:

- Hyperoxisches Trimix: enthält *mehr* als 21% Sauerstoff
- Normoxisches Trimix: enthält 21% Sauerstoff, gleich viel wie Luft
- Hypoxisches Trimix: enthält *weniger* als 21% Sauerstoff

Sonderfall Triox

Triox ist nichts anderes als ein Synonym für 2-3 ganz spezifische *hyperoxische* Trimix-Gemische, die beim Tauchen bis 60 m verwendet werden. Übliche Mischungen sind 30/30 = 30% Sauerstoff, 30% Helium und 40% Stickstoff (für Tauchen bis 40 m) sowie 21/35 = 21% Sauerstoff, 35% Helium und 44% Stickstoff.

Sonderfall Heliair

Spricht man von Trimix, so meint man ein freies Verhältnis der Anteile von Helium, Sauerstoff und Stickstoff zueinander. Ein Sonderfall ist das so genannte *Heliair*, bei dem der Atemluft (**AIR**) ein Anteil **HELI**um beigemischt wird.

Vorteil ist die wesentlich vereinfachte und damit kostengünstige Herstellung.

Nachteil: Der Sauerstoffpartialdruck des fertigen Gemischs sinkt dadurch und es ist u. U. nicht mehr ab der Wasseroberfläche zum Abtauchen benutzbar (wenn p_{O₂} < 0,16 bis 0.18bar). Es entsteht also in jedem Falle ein *hypoxisches* Gemisch. Wird dementsprechend als Bottom Mix für grössere Tiefen eingesetzt.



Heliox

Heliox ist ein Mischgas, welches vorwiegend beim Berufstauchen und technischen Tauchen verwendet wird.

Zusammensetzung: Heliox besteht meist aus 79% **HELIum** und 21% Sauerstoff (**OXygen**) und wird beim kommerziellen Tauchen in grossen bis sehr grossen (600 m) Tiefen verwendet. Andere Verhältnisse aus He und O₂ sind jedoch gerade bei Tauchern üblich, da um z.B. eine Tiefe von 180 Metern zu erreichen, gerade mal 8,42% O₂ vorhanden sein dürfen.

Da ab einem Sauerstoffpartialdruck von über 1.6 - 1.7bar eine Sauerstoffvergiftung auftreten kann, heisst das, dass ohne Travel-Mix Tieftauchen mit Heliox nicht möglich ist. Ausserdem beschränkt sich die Zeit in dieser Tiefe auf maximal 2 Stunden, muss aber aufgrund der O₂-Uhr drastisch verkürzt werden.

Sonderfall: Schweizer Berufstaucher

Diese sind in der Schweiz bei der SUVA versichert und dürfen nur mit Heliox tauchen (Helium und Oxygen). Die Nachteile sind enorm, sowohl was die Grundzeit, die Kälte und die mögliche O₂ Vergiftung angeht.

Hydreliox / Hydrelux

Hydreliox (selten auch Hydrelux genannt) ist ein Mischgas, das vorwiegend beim technischen Tauchen auf grosser Tiefe eingesetzt wird.

Zusammensetzung: Hydreliox ist eine Mischung aus Wasserstoff (H₂), Helium (He) und Sauerstoff (O₂ und verhält sich ähnlich wie Heliummischungen). Der Name setzt sich aus Komponenten der englischen Namen der Reingase zusammen: **HYDR**ogen + **HELI**um + **OXygen**.

Die Explosivität der Sauerstoff / Wasserstoffmischung kann durch geeignete Mischungsverhältnisse unterhalb der Explosionsgrenze gehalten und damit unterdrückt werden.

Hydrox

Hydrox ist eine Mischung aus Wasserstoff (**HYDR**ogen) und Sauerstoff (**OXygen**), welche für extreme Tauchgänge eingesetzt wird (1992 Fa. COMEX 701 m in einer Druckkammer, 534 m im Freiwasser).

Auf Grund der Explosivität der Sauerstoff / Wasserstoffmischung kann dieses Gemisch nur ab Tiefen eingesetzt werden, bei denen der Sauerstoffpartialdruck unterhalb der Explosionsgrenze liegt.

Argox / Argonox

Argon ist ein sehr narkotisches Gas (viel narkotischer als Stickstoff, daher ist es nicht als Atemgas in der Tiefe geeignet) und auch sehr dichtes Gas, das bei sehr tiefen Tauchgängen zu Atembeschwerden führt, aber es verursacht nicht die Verzerrung der Stimme wie Helium oder Wasserstoff. Theoretisch könnte Argon als Dekompressionsgas in geringer Tiefe zusammen mit Sauerstoff (**AR-Gon** + **OXygen** = "Argox", **Argon**+ **N2**+**Oxygen** = "Argonox") verwendet werden, um die Inertgas Absorption in den Geweben auf ~ 9-15 m Dekompressionsstopps zu reduzieren.

Argox/Argonox ist wegen der hohen narkotischen Wirkung nicht für tiefere Tauchgänge geeignet. Es wird immer noch sehr selten verwendet und getestet. Argon wird von Tauchern, deren primäres Atemgas eine Helium-Mischung ist, aufgrund seiner guten Wärmedämmeigenschaften und seines relativ günstigen Preises (Argon ist teurer als Luft oder Sauerstoff, aber wesentlich preiswerter als Helium), meist nur als Belüftungsgas für den Trockentauchanzug verwendet.



Neox / Neonox (und Neoquad)

Neox ist eine selten verwendete Mischung aus **NE**on und Sauerstoff (**OX**ygen). Die Mischung ist jedoch sehr teuer.

Neox wird manchmal im kommerziellen Tieftauchen eingesetzt, aber wegen den Kosten sehr selten. Auch die von Neon erzeugten DCS-Symptome ("Neox-Bends") haben einen schlechten Ruf, da sie weit verbreiteten Berichten zufolge schwerer sind als die z. Bsp. mit Heliox oder Trimix.

Neon wird aufgrund seiner höheren Dichte weniger vom Körpergewebe absorbiert als Helium oder Stickstoff, ist aber auch im Vergleich zum bereits teuren Helium nochmals teurer. Anstelle von reinem Neon wurde auch eine Mischung aus 75% Roh-Neon und 25% Helium verwendet (Roh-Neon ist ein Nebenprodukt der Luftdestillation).

Neon als Inertgas scheint in einer Tiefe von weniger als 360 m keine narkotische Wirkung zu haben und verursacht keine Verzerrung der Stimme wie Helium oder Wasserstoff. Die Dichte des Neons begrenzt es immer noch hauptsächlich auf Tiefen von weniger als 180 m, da Neon so langsam aus dem Körpergewebe freigesetzt wird und lange Dekompressionszeiten verursacht. Dies ist der Grund, warum Neon meist bei kurzen Bounce-Tauchgängen eingesetzt wird. Neon wird meist zusammen mit Sauerstoff (**NE**on+**OX**ygen = Neox") oder mit Trimix (Trimix = Helium + Sauerstoff + Stickstoff) zu einer Neoquad-Mischung verarbeitet.

DCS-Fälle, bei denen Taucher Neon als Inertgas eingeatmet haben, sind wegen der komplexen Rekompansionspläne sehr schwer zu behandeln.

3.4 Narkotischer Faktor von Gasen

Die erforderlichen Grundlagenkenntnisse über die Stickstoff-Narkose (Tiefenrausch, nitrogen narcosis) - hauptsächlich beim Tauchen mit Luft - werden als bekannt vorausgesetzt.

Auch andere beim Tauchen benützte Gase haben einen gewissen narkotischen Effekt, weshalb man schon seit langem auf Gase ausgewichen ist, welche ein tieferes narkotisches Potential haben als eben Luft (resp. der darin enthaltenen Stickstoff).

Gas	Chemisches Formelzeichen	Narkotisches Potential im Verhältnis zu Luft
Luft		1
Nitrogen	N ₂	ca. 1
Helium	He	0.23
Neon	Ne	0.28
Hydrogen	H ₂	0.55
Argon	Ar,	2.33
Krypton	Kr	7.14
Xenon	Xe	25.64

(Quelle: "The Physiology and Medicine of Diving" by Peter Bennett and David Elliott, 4th edition, 1993, W.B.Saunders Company Ltd, London.)

Die obige Tabelle basiert auf der narkotischen Wirkung von Luft (=1). So ist z.B. Helium (als Verdünnungsgas in gleichem Prozentsatz wie Stickstoff in der Luft) in der Atemmischung nur 0,23 mal so narkotisch wie Stickstoff.

In einigen Laien-Foren gibt es Beiträge dass Sauerstoff in hohen Partialdrücken narkotisch sein könnte, manche sagen, er sei narkotischer als Stickstoff. *Es gibt jedoch keine gesicherten wissenschaftlichen Ergebnisse, nicht mal eine Studie oder Versuche zu diesem Thema.*



3.5 Wärmetechnische Parameter

Im Zusammenhang mit dem Technischen Tauchen (Tec-Diving) und den oftmals damit verbundenen Langzeitexpositionen oder tiefen Tauchgängen ist die Auskühlung ein echtes Problem, ganz besonders in unseren eher kühlen Binnengewässern, welchen ab 20m - 30m immer knapp um die 4°C aufweisen.

Dazu kommt, dass gerade auf grösseren Tiefen Heliumgemische verwendet werden, welche eine gegenüber Luft wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit haben.

Deshalb nachfolgend ein kurzer Überblick über diese wichtige physikalische Eigenschaft von den uns verwendeten Gasen:

3.5.1 Wärmeleitfähigkeit

Die **Wärmeleitfähigkeit**, auch **Wärmeleitfähigkeit** (λ , k oder κ) eines Festkörpers, einer Flüssigkeit oder eines Gases ist bestimmt durch die Geschwindigkeit, mit der sich die Erwärmung an einem Punkt durch den Stoff ausbreitet. Die Wärmeleitfähigkeit ist also das Vermögen eines Stoffes, thermische Energie mittels Wärmeleitung in Form von Wärme zu transportieren. Die (spezifische) Wärmeleitfähigkeit in $W/(K \cdot m)$ ist eine temperaturabhängige Materialkonstante.

Der **Wärmeleitwert** (G_{th} , *absolute Wärmeleitfähigkeit*) in W/K ist die von der Abmessung abhängige Kennzahl eines Bauteils.

Der Kehrwert der Wärmeleitfähigkeit ist der *Wärmewiderstand* für die Anwendung des *Ohm'schen Gesetzes des thermischen Kreises*.

3.5.2 Wärmekapazität von Gasen

Die **spezifische Wärmekapazität** oder kurz **spezifische Wärme** eines Stoffes ist eine seiner physikalischen Eigenschaften und bezeichnet dessen auf die Masse bezogene Wärmekapazität. Sie gibt also an, welche Energie man einer bestimmten Masse eines Stoffes zuführen muss, um seine Temperatur um ein Kelvin zu erhöhen.

Insbesondere bei Gasen hängt die Wärmekapazität von den äußeren Zwangsbedingungen ab. Man unterscheidet die Wärmekapazität bei konstantem Druck C_p (isobar) und bei konstantem Volumen C_V (isochor).

Je höher dieser Wert, desto mehr Wärmeenergie wird dieses Gas pro Grad Temperatur-Differenz auch unserem Körper entziehen.

Gas	Spezifische Wärmekapazität (meist c_p) J/(kg·K)	Wärmeleitfähigkeit absolut W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit im Verhältnis zu Luft (---)
Luft	$c_p = 1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} =$ 0,279 kWh/(Tonne·K) (isobar) $c_v = 718 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)} =$ 0,199 kWh/(Tonne·K) (isochor)	0,0261 W/(m K)	1
Sauerstoff	920 J/(kg K) bei 298 K	0,02674	1,025
Stickstoff	1040 J/(kg K) bei 298 K	0,02598	9,995
Helium	5193	0,152	5,82
Argon	520	0,01772	0,68
Neon	1031 J/(kg K) bei 298 K	0,0493	1,89
Xenon	0,158	0,0051-0,00569	0,20 bis 0,22

zum Vergleich:

Wasser	4187	0,58 0,597 (bei 20 °C)	22,87
--------	------	---------------------------	-------



3.6 Zusammenfassung der wichtigsten Charakteristika

Die nachfolgende Zusammenstellung wurde vom Internet einem Artikel zu diesem Thema unter http://www.techdiver.ws/exotic_gases.shtml#3.1 entnommen. Deshalb ist der Text auch in Englisch und die Preise in USD.

gas	chem. sign / ingredients	use	price 2005: (10ltr*200bar) (Finnish price converted to US dollars)	other
air	78,1%N ₂ , 20,8%O ₂ , 0,9%Ar, 0,2% other	common diving gas	~\$ 5	compressed air is the most common gas for diving
nitrox Label: EANx	oxygen (O ₂) and nitrogen (N ₂) mixture	<i>hyperoxic nitrox</i> : see below: EANx. <i>hypoxic nitrox</i> : longer bottom times on 50-60 m dives. This gas was used mainly decades ago on commercial dives. Oxygen percentage is less than 21%.	hypoxic nitrox: ~ \$8-15	hypoxic nitrox gives you stronger nitrogen narcosis and longer decompression, but it reduces the CNS% load
EANx / enriched air	oxygen (O ₂) and nitrogen (N ₂) mixture	oxygen percentage more than 21%	~ \$6-15	commonly used
oxygen	O ₂	decompression gas	~ \$8-15	maximum diving depth 6 m
trimix Label: Tmx	oxygen (O ₂), nitrogen (N ₂) and helium (He) mixture	deep diving gas	~ \$8-100 depending of helium percentage	used on deep dives for reducing the partial pressure of oxygen and nitrogen narcosis
heliox	oxygen (O ₂) and helium (He) mixture	deep diving gas	~ \$50-100	used on deep dives for reducing the partial pressure of oxygen and nitrogen narcosis
argon	Ar	dry suit gas	~ \$10-30	dry suit gas, mostly used with trimix (which is not suitable for dry suit gas due to it's high thermal conductivity)



gas	chem. sign / ingredients	use	price 2005: (10ltr*200bar) (Finnish price converted to US dollars)	other
argox	oxygen (O ₂) and argon (Ar) mixture	decompression gas	~ \$10-30	used on ~9-15 m decompression stops, see above "argox"
hydrox	oxygen (O ₂) and hydrogen (H ₂) mixture	deep diving gas	? \$	explosive, mixture not breathable above 30 meters
hydreliox	oxygen (O ₂), helium (He) and hydrogen (H ₂) mixture	deep diving gas	? \$	explosive, mixture not breathable on shallow waters
neox	oxygen (O ₂) and neon (Ne) mixture	deep diving gas	~ \$2000	rarely used, very expensive
neoquad	trimix and neon mixture	deep diving gas	~ \$2000	rarely used, very expensive
xenon	pure xenon (Xe)	N/A, (dry suit gas?)	~ \$4500	very good thermal insulator, but too expensive
xenonox	xenon (Xe) and oxygen mixture	useless for diving	~ \$4500	extremely narcotic
kryptonox	krypton (Kr) and oxygen mixture	useless for diving	~ \$8000	extremely narcotic

Ein paar Gedanken zur Dekompression nach tiefen Tauchgängen mit diesen Gasen sind in **Anhang 7** dargelegt.



Anhang 1: Recreational Technical Diving

[Diving Hyperb Med.](#) 2013 Jun;43(2):86-93.

Recreational technical diving part 1: an introduction to technical diving methods and activities.

[Mitchell SJ](#)¹, [Doolette DJ](#).

Abstract

Technical divers use gases other than air and advanced equipment configurations to conduct dives that are deeper and/or longer than typical recreational air dives.

The use of oxygen-nitrogen (nitrox) mixes with oxygen fractions higher than air results in longer no-decompression limits for shallow diving, and faster decompression from deeper dives. For depths beyond the air-diving range, technical divers mix helium, a light non-narcotic gas, with nitrogen and oxygen to produce 'trimix'. These blends are tailored to the depth of intended use with a fraction of oxygen calculated to produce an inspired oxygen partial pressure unlikely to cause cerebral oxygen toxicity and a nitrogen fraction calculated to produce a tolerable degree of nitrogen narcosis.

A typical deep technical dive will involve the use of trimix at the target depth with changes to gases containing more oxygen and less inert gas during the decompression. Open-circuit scuba may be used to carry and utilize such gases, but this is very wasteful of expensive helium.

There is increasing use of closed-circuit 'rebreather' devices. These recycle expired gas and potentially limit gas consumption to a small amount of inert gas to maintain the volume of the breathing circuit during descent and the amount of oxygen metabolized by the diver.

This paper reviews the basic approach to planning and execution of dives using these methods to better inform physicians of the physical demands and risks.



Anhang 2: Zusammensetzung der atmosphärischen Luft

Es ist immer wieder erstaunlich, was nicht alles in unserer Luft enthalten ist:

Gas	Formel	Volumenanteil	Massenanteil
Hauptbestandteile der trockenen Luft bei Normalnull			
Stickstoff	N ₂	78,084 %	75,518 %
Sauerstoff	O ₂	20,942 %	23,135 %
Argon	Ar	0,934 %	1,288 %

Gehalt an Spurengasen			
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	0,038 %	0,058 %
Neon	Ne	18,180 ppm	12,67 ppm
Helium	He	5,240 ppm	0,72 ppm
Methan	CH ₄	1,760 ppm	0,97 ppm
Krypton	Kr	1,140 ppm	3,30 ppm
Wasserstoff	H ₂	~500 ppb	36 ppb
Distickstoffoxid	N ₂ O	317 ppb	480 ppb
Kohlenstoffmonoxid	CO	50–200 ppb	50–200 ppb
Xenon	Xe	87 ppb	400 ppb
Dichlordifluormethan (CFC-12)	CCl ₂ F ₂	535 ppt	2200 ppt
Trichlorfluormethan (CFC-11)	CCl ₃ F	226 ppt	1100 ppt
Chlordifluormethan (HCFC-22)	CHClF ₂	160 ppt	480 ppt
Tetrachlorkohlenstoff	CCl ₄	96 ppt	510 ppt
Trichlortrifluorethan (CFC-113)	C ₂ Cl ₃ F ₃	80 ppt	520 ppt
Methylchloroform	CH ₃ -CCl ₃	25 ppt	115 ppt
1,1-Dichlor-1-Fluorethan (HCFC-141b)	CCl ₂ F-CH ₃	17 ppt	70 ppt
1-Chlor-1,1-difluorethan (HCFC-142b)	CClF ₂ -CH ₃	14 ppt	50 ppt
Schwefelhexafluorid	SF ₆	5 ppt	25 ppt
Bromchlordifluormethan	CBrClF ₂	4 ppt	25 ppt
Bromtrifluormethan	CBrF ₃	2,5 ppt	13 ppt

Gesamt-Gewicht in der Erdatmosphäre (trocken)		5,135 · 10¹⁵ t
Gesamt-Gewicht in der Erdatmosphäre (feucht)		5,148 · 10¹⁵ t

- ppm (*parts per million*) = 10⁻⁶ = Teile pro Million
- ppb (*parts per billion*) = 10⁻⁹ = Teile pro Milliarde
- ppt (*parts per trillion*) = 10⁻¹² = Teile pro Billion
- ppq (*parts per quadrillion*) = 10⁻¹⁵ = Teile pro Billiarde
- t Tonnen (1000kg) (Erdatmosphäre)



Anhang 3: Technische Normen für Druckluft

(Quelle: ehem. Bauer Glossary)

Prüfen der Atemluft

Die Reinheit der Druckluft für Atemgeräte wird in der DIN EN 12021 (bisher DIN 3188) festgelegt. Sie ist gültig für Tauchtiefen bis 50 m und Tauchzeiten bis 2 Stunden. Die Luft vom Kompressor muss geruchslos und geschmacksneutral sein, der Kohlenmonoxidgehalt darf 30 ml/m^3 , der Kohlendioxidgehalt 800 ml/m^3 nicht überschreiten.

Wichtig ist auch die Begrenzung des Wassergehaltes, der für ein Rosten der Druckluftflaschen und für eine mögliche Vereisung des Atemreglers beim Einsatz in kalten Gewässern verantwortlich ist.

Im Gegensatz zu einigen ausländischen Vorschriften, die hier keine Begrenzungen angeben, darf der Wassergehalt gemäß DIN EN 12021 (bisher DIN 3188) den Grenzwert 25 mg/m^3 nicht überschreiten (bei Fülldruck 200 bar und 300 bar 35 mg/m^3). Dieser Wassergehalt bezieht sich auf die vom Kompressor kommende Luft. Da in den Druckluftflaschen auch mit Feuchtigkeit gerechnet werden muss, ist der Wassergehalt der Luft aus den Druckluftflaschen auf maximal 50 mg/m^3 festgelegt (bei 300 bar Fülldruck 35 mg/m^3).

Das Überprüfen der Grenzwerte der Luft ist mittels Prüfröhrchen möglich. Dabei wird die langsam ausströmende Luft dosiert durch Prüfröhrchen geleitet. Je nachdem für welche Komponente die Messung gedacht ist (Kohlenmonoxid, Kohlendioxid, Wasser, Öl) ist der Inhaltsstoff der Röhrchen verschieden. Sie enthalten einen Indikator, der entsprechend dem Anteil der Fremdkomponente durch Farbumschlag eine Mengenbestimmung ermöglicht. Wichtig ist dabei, dass nicht unmittelbar nach dem Kompressorstart gemessen werden darf, da es dabei zu Fehlmessungen kommen kann.

Kohlendioxid (CO_2 z.B.) ist in der angesaugten Luft mit einem Anteil von 350 bis 400 ppm vorhanden. Das im Filter zum Trocknen der komprimierten Luft eingesetzte Molekularsieb ist unter anderem in der Lage, etwas CO_2 zu adsorbieren. Es reichert sich dadurch im Trockenmittel unter Druck an. Nach dem Abstellen der Kompressoranlage kann durch die Druckabsenkung absorbiertes CO_2 wieder desorbiert werden. Dieses nun nicht mehr gebundene CO_2 wird dann beim erneuten Start des Kompressors in die Flasche gelangen.

Zur Vermeidung von Fehlmessungen daher nach dem Start der Anlage die Luft etwa ein bis zwei Minuten durch teilweises Öffnen des Füllhahnes abströmen lassen. Füllschlauch dazu unbedingt entfernen oder gut sichern, da er sonst durch das freie Abströmen der hoch komprimierten Luft die Wirkung einer umherschlagenden Eisenstange hat.

Atemluftstandard



Die Anforderungen an die Qualität der Atemluft sind in Deutschland in der **DIN EN 12021** niedergelegt (CH: **SN EN12021**), wobei kurz zusammengefasst folgende Kriterien spezifiziert sind:

Reinheit in Bezug auf:

- schädliche Gase, z.B.
- Dämpfe
- Schwebestoffe

Zulässige Werte für CO-Gehalt:

≤ 30 ml/m³ entspannt bis 50 Meter Tauchtiefe

Zulässige Werte für CO₂-Gehalt:

≤ 800 ml/m³ entspannt bis 50 Meter Tauchtiefe

Wassergehalt bei 200 bar: max. 50 mg/m³ entspannt

Wassergehalt bei 300 bar: max. 35 mg/m³ entspannt

Übersicht Nationale Normen

Diese Norm wurde für die Sicherheit beim Tauchen und gewerblichen Atemschutz erstellt:

Standard	Sauerstoff [Vol-%]	CO ₂ [ml/m ³]	CO [ml/m ³]	H ₂ O [mg/m ³]	Taupunkt [C°]	Ölrückstände [mg/m ³]	Geruch	Bemerkung
Trockene Luft	20,90%	340	0,16	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	Eigenschaften von Umgebungsluft, keine MAK Werte!
DIN 3188	20,0-21,0%	800	30	25	-53	0,3	Geruch- und Geschmackslos	
DIN EN 12021	21% ± 2%	500	15	25	-53	0,5	ohne signifikanten Geruch	Ersatz für DIN 3188
BS 4001	keine Angabe	300	10	500	5° unter der angenommenen Einsatztemperatur	1	Nicht spezifiziert	Restfeuchte nach Klimazonen unterklassifiziert
CGA Grade D	19,5-23,5%	1000	10	67*	-45	5	Keiner	
CGA Grade E PADI	20-22%	500	10	67*	-45	5	Keiner	Amerikanische Mindestanforderung für Atemluft zum Tauchen
CGA Grade G	19,5-23,5%	500	5	67*	-45	Nicht spezifiziert	Keiner	
CGA Grade J	19,5-23,5%	0,5	1	1,08	-75	Nicht spezifiziert	Keiner	
CGA Grade M	19,5-23,5%	1	1	3	-68	Nicht spezifiziert	Keiner	
CGA Grade N	19,5-23,5%	500	10	67*	-45	Nicht spezifiziert	Keiner	



NFPA 1500 D	19,5-23,5%	1000	10	24	-53	5	keine Angabe	
NFPA 1500 E	20-22%	500	10	24	-53	5	keine Angabe	
NFPA 1500 G	19,5-23,5%	500	5	24	-53	Nicht spezifiziert	Keiner	
NFPA 1404	19,5-23,5%	1000	10	67*	-45	5	Keiner	
NFPA 99	19,5-23,5%	1000	10	422*	-28	5	Keiner	
Kanadischer Standard	19,5-23,5%	500	5	27	-53	1	Keiner	
OSHA CFR 29	19,5-23,5%	1000	10	67*	-45	5	Keiner	
FEDERAL BB-A-1034	20-22%	500	10	67*	-45	5	Keiner	
USP	19,5-23,5%	500	10	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert	Nicht spezifiziert	Keiner	
NOAA/US-NAVY	20-22%	1000	20	67*	-45	5	keine Angabe	
OCA	20-22%	500	2	67*	-45	0,1	Keiner	Festgelegt von IANTD und ANDI auf der Tek93, AKA "Modified Grade E"
NOAA NITROX I	31-33%	500	10	67*	-45	5	Keiner	
NOAA NITROX II	35-37%	500	10	67*	-45	5	Keiner	
ANDI Safe Air	22-50%	500	2	keine Angabe	-40	0,1	keine Angabe	Zusätzlich feste Partikel <2micron, Gasförmige Kohlenwasserstoffe <25ppm

*abhängig von der geplanten Benutzung

Andere Normen und Standards:

- BS 4275 (GB)
- NFS 90140 (Frankreich)
- NFS 76001 (Frankreich)

Abkürzungen:

- OCA: Oxygen Compatible Air
- USP: US Pharmacopeia
- ANDI: American Nitrox Divers International
- IANTD: International Association of Nitrox and Technical Divers
- PADI: Professional Association of Diving Instructors



NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration
OSHA: Occupational Safety and Health Association
NFPA: National Fire Protection Association
NOAA: National Oceanographic and Atmospheric Administration
CGA: Compressed Gas Association
NFPA: National Fire Protection Association

Einheitensystem	Einheiten	Bemerkung
Volumenbezogen	Vol-%, cm ³ /m ³ , vpm, vpb	Modern
Massebezogen	Gew-%, pg/g	
Stoffmengenbezogen	Mol-%, ppm, ppb	Klassische Einheiten zur Reinheitsangabe
Masse/Volumenratio	mg/m ³	Vor allem bei flüssigen/festen Verunreinigungen

Die Umrechnung der Einheiten untereinander kann teilweise ziemlich umständlich sein. Eine genaue Kenntnis von Stoffkonstanten und Norm- bzw. Messbedingungen ist meist notwendig.



Anhang 4: Reinheitsgrad von Gasen – Punkt Notation

Für die Angabe der Reinheit von Gasen hat sich die Verwendung der Punkt-Notation eingebürgert. Sie dient der verkürzten Angabe des Mindestgehalts eines Gases mittels zweier durch einen Punkt getrennter Ziffern.

Beispiel :

Die Ziffer vor dem Punkt gibt die Anzahl der "Neuner" in der Prozentangabe für den Anteil des reinen Gases an, wobei unterstellt wird, dass VOR dem Dezimalpunkt immer 2 „Neuner“ stehen, der Reinheitsgrad also immer grösser als 99% ist.

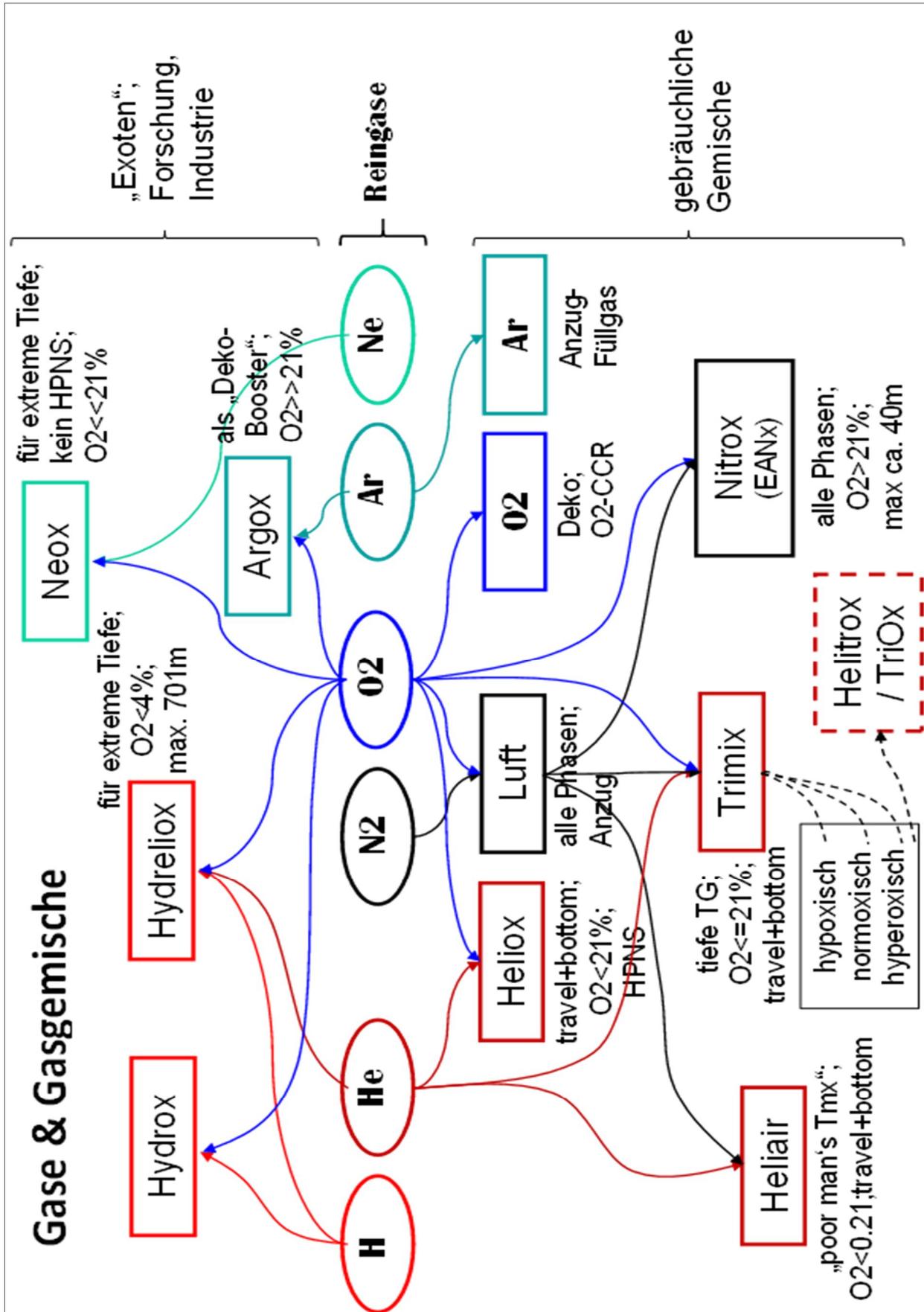
Die Ziffer hinter dem Punkt gibt die erste von "Neun" abweichende Dezimalstelle an.

Reinheitsgrad-Klasse	Punkt-Notation	Mindestgehalt an reinem Gas	Maximale Kontamination [ppm]
	2.0	99.0 %	
Reines Gas	2.5 (Bsp. O₂)	99.5 %	5000
	2.9	99.9 %	1000
	3.0	99.90 %	
Hochreines Gas	3.5	99.95 %	500
	4.0	99.990%	100
	4.6 (Bsp. He)	99.996 %	400
	4.9	99.999%	10
	5.0	99.9990%	
Ultrahochreines Gas	5.5	99.9995 %	5
	5,8	99.9998 %	
	6.0	99.99990 %	1

Quellen: http://www.top-gas.de/web/media/pdf/Reinheit_von_Gasen.pdf
<http://www.gasetechnik24.de/Infos/gasreinheit.htm>



Anhang 5: Graphische Übersicht Gase & Gasmischungen





Anhang 6: Ein historischer Rückblick zum Trimix-Tauchen

DiverMagazineTrimix

http://www.divermag.com/archives/august2000/technical_august00.html

Technically Speaking

Adding a Little Sanity to Diving

By Bill Nadeau

Even at the recreational diver level, diving over 60fsw (18msw) requires attention to narcosis and carbon dioxide retention. Now that all of the larger training agencies in the world are recognizing extended range diving (diving below 130fsw/39msw) there has been a greater interest in the use of helium in a standard diving mix. Heliox/trimix are no longer gases that have been reserved for the 200fsw/60msw and deeper range. Many divers are now incorporating a breathing medium known as "Normoxic Trimix" for diving ranges between 100fsw/30msw to 200fsw/60msw. Normoxic Trimix applications are simple to employ, safer than air and increase the diver's ability to really enjoy a dive.

Trimix is comprised of three (tri) gases; nitrogen, oxygen and either helium, neon or hydrogen. The third gas is nearly always helium as neon is expensive and hydrogen somewhat unstable. "Normoxic Trimix" is a breathing mix with no less than 21% oxygen and no more than 25-30% helium. One of the great things about a normoxic trimix is that it can be breathed right from the surface eliminating the need for a second stage bottle. In fact an ideal normoxic trimix dive to 150fsw/45msw will actually have an EAN25 (25% oxygen) incorporated into it accelerating the off-gassing process. For dives below 200fsw/60msw a portion of the oxygen is replaced by helium to eliminate hyperoxia at depth. This mix cannot be breathed at the surface.

Helium has been used in diving applications for a very long time. It was first suggested by Elihu Thomson that helium could be used as a medium that could augment oxygen and nitrogen in a breathing mix. Only small quantities were available and very costly. It was not until the early 1900s that the United States actually discovered vast quantities of helium in Texas giving them an 'exclusive dealership' and bringing the cost of the gas to within a reasonable rate. By 1924 heliox mixtures were being researched by the US Navy and the Royal Navy but quickly abandoned after a high number of DCI incidents occurred. In the 1930s civilian exploration of the gas picked up starting with the Heliox decompression tables designed by Edgar End and used by Max Nohl during his record setting dives. Very quickly deep dives and saturation expeditions began employing helium as a standard mix in various types of diving apparatus.

During World War II the United States Department of Defence banned the exportation of helium fearing that it may be used by Germans in their dirigibles. Soon after helium became a demand unmet by the supply. This slowed the research and application of mixed gases for some time. Research resumed again after a number of naval disasters prompted rescue efforts in deep waters. Hans Hass, a Swiss mathematician along with the physicist



Prof. Dr. A.A. Buhlmann generated a set of dive tables to a 1000fsw using helium. The record setting dive made by Hass proved the validity of his tables and helium use.

Helium is a very light gas and not very dense. Due to its physical and chemical structuring it has very little narcotic effect on the body making it ideal for deeper diving. By augmenting helium into our breathing mix we are able to reduce both the fraction of oxygen and the fraction of nitrogen thereby reducing a diver's susceptibility to hyperoxia, hypercapnia (CO₂ retention) and nitrogen narcosis.

Helium can also be considered a fast gas or gas that likes to enter our tissues before any other gas. Like nitrogen it is inert (our bodies can not metabolize it) and is stored in our tissues when under pressure. The fact that it enters and leaves at different rates than nitrogen means that traditional off-gassing times as calculated through the use of dive tables and air computers no longer apply. (Although Normoxic Trimix tables are very close to regular air tables). Mixed gas dive tables take into account this phenomenon but rely on divers following a profile even more precise than that of air especially since the nature of helium off-gassing requires deeper and more frequent stops.

A normoxic trimix at the surface begins to become hyperoxic at depths below 218fsw (72 meters) so trimix for dives deeper than 180-200fsw (60-66 meters) will need to have an oxygen content of less than 20-22%. It is recommended that for technical dives bottom mixes not exceed PO₂s of more than 1.5ATA for open circuit divers while closed circuit rebreather divers maintain a set point of no more than 1.4ATA.

Helium also provides a buffer against the nitrogen reducing the narcotic potential of a breathing mix. Air typically has 79% nitrogen but if a mix is prepared so that the nitrogen content is reduced, say by half (40% nitrogen) then that particular mix has only half the narcotic potential. A diver on trimix with 40% nitrogen in their mix (a 18/42 trimix) will experience approximately the same level of narcosis as a diver on air at half of his depth (all things being equal).

As mentioned earlier helium has very different on-gassing and off-gassing rates than nitrogen. This characteristic offsets traditional air and nitrox tables, adding to the complexity of decompression profiles. The amount of helium in a mix and the depth it is being breathed will effect this rate.

Today thousands of divers around the world are venturing safely into new domains using normoxic trimix and trimix gases. It is proving that without a doubt mixed gas operations can provide a means to dive deeper, longer and with a clear mind.



Anhang 7: Recreational Technical Diving / Part 2

[Diving Hyperb Med.](#) 2013 Jun;43(2):96-104.

Recreational technical diving part 2: decompression from deep technical dives.

[Doolette DJ](#)¹, [Mitchell SJ](#).

Abstract

Technical divers perform deep, mixed-gas 'bounce' dives, which are inherently inefficient because even a short duration at the target depth results in lengthy decompression.

Technical divers use decompression schedules generated from modified versions of decompression algorithms originally developed for other types of diving. Many modifications ostensibly produce shorter and/or safer decompression, but have generally been driven by anecdote. Scientific evidence relevant to many of these modifications exists, but is often difficult to locate.

This review assembles and examines scientific evidence relevant to technical diving decompression practice. *There is a widespread belief that bubble algorithms, which redistribute decompression in favor of deeper decompression stops, are more efficient than traditional, shallow-stop, gas-content algorithms, but recent laboratory data support the opposite view.*

It seems unlikely that switches from helium- to nitrogen-based breathing gases during ascent will accelerate decompression from typical technical bounce dives. However, there is evidence for a higher prevalence of neurological decompression sickness (DCS) after dives conducted breathing only helium-oxygen than those with nitrogen-oxygen.

There is also weak evidence suggesting less neurological DCS occurs if helium-oxygen breathing gas is switched to air during decompression than if no switch is made.

On the other hand, helium-to-nitrogen breathing gas switches are implicated in the development of inner-ear DCS arising during decompression. Inner-ear DCS is difficult to predict, *but strategies to minimize the risk include adequate initial decompression, delaying helium-to-nitrogen switches until relatively shallow, and the use of the maximum safe fraction of inspired oxygen during decompression.*