



Rebreather Diver Manual Diluent Luft/Trimix

Stefanie Steuerer
Mobile: +43 (0) 664 3400872
Email: stefanie@steuerer.at
www.steuerer.at
www.rebreather-center.at
www.sidemountraining.com
www.kissidewinder.at

Die Autorin	5
Haftungsausschluss	5
„Nobody is perfect“	5
Copyright	5
Einführung	6
CCR Komponenten und Verbrauchsmaterialien	7
Bezeichnungen von CCR Bauteilen.....	7
Sauerstoff- und Diluentflaschen	8
Gegenlungen - Counterlungs	9
HUD - Head Up Display.....	11
Mundstück - Dive/Surface Valve.....	12
Sauerstoffsensoren	13
Atemkalk.....	17
Atemkalkbehälter.....	22
MAV - Manuelle Diluent- und Sauerstoffeinspeisung	25
Allgemeine Ausrüstung	26
Hauptlampe	27
Backup-Lampe.....	27
Bojen – SMB.....	27
Hebesack.....	28
Reel	28
Spool	28
Wetnotes	29
Instrumente	29
Kompass.....	29
Bailoutflaschen	30
Gase.....	31
Luft.....	31
Sauerstoff.....	32
Stickstoff – N ₂	33
Kohlendioxid – CO ₂	34
Kohlenmonoxid – CO	34
Pathophysiologie bei erhöhtem Sauerstoffpartialdruck - Hyperoxie.....	38
Allgemeine sauerstoffbedingte Tiefen- und Partialdruckgrenzen	39
Schädigung des Zentralnervensystems	41
Lungen- oder Ganzkörpersauerstoffvergiftung.....	45
Pathophysiologie bei erhöhtem Stickstoffpartialdruck	50
Stickstoffnarkose.....	50
Pathophysiologie bei erhöhtem Kohlendioxid Gehalt – Hyperkapnie.....	52
Hyperoxische Hyperkapnie.....	54
Pathophysiologie bei zu niedrigem Kohlendioxid Gehalt	55
Pathophysiologie bei erhöhtem Kohlenmonoxid Gehalt	56
Dekompression	58
Geschichte und Persönlichkeiten	58
Dekompression - Begriffe.....	62
Dekompressionsmodelle	66

Rebreather Diver Manual

Einphasenmodelle	66
Zweiphasenmodelle	68
Statistisches Modell	69
Die Dekompressionskrankheit	70
Erste Hilfe bei Dekompressionsunfällen	71
Zeichensprache	75
Tauchgangsplanung	78
Dekompressionsplanung	79
Setpoint und O ₂ -Partialdruck	80
Diluent Verbrauch beim CCR Tauchen	83
Sauerstoffbelastung beim CCR Tauchen	85
ZNS % Berechnung beim CCR-Tauchen	85
OTU Berechnungen beim CCR Tauchen	89
Berechnung des Atem Minuten Volumen – AMV	90
Bailout Gas.....	91
Auswahl und Berechnungen	91
Tauchpraxis	95
Oberflächencheck	95
Gefluteter Atemkreislauf	97
Versagen des Atemkalks	99
Externer Boom - Diluent.....	101
Externer Boom - Sauerstoff	103
Interner Sauerstoff Boom - pO ₂ steigt schnell an	105
Interner Diluent Boom - pO ₂ sinkt schnell ab.....	106
Ausfall aller pO ₂ Anzeigen	107
Geräusche in der Atemschlange – Ausatemseite	108
Geräusche in der Atemschlange – Einatemseite	109
Setzen eines Surface Marker.....	110
Advanced Notfallverfahren.....	111
CCR mit Diluent im SCR Modus tauchen.....	111
Direkter Aufstieg bis ½ Tiefe	113
Teil II – CCR Tauchen mit Trimix	115
Ausrüstung	115
Verwendung von mehreren Bailoutflaschen.....	115
Leash	115
Tauchcomputer	116
Heizsysteme	117
Gase.....	118
Helium – He	118
Argon – Ar	118
Neon – Ne	119
Wasserstoff - H ₂	119
Verringerung der Vitalkapazität	120
Dynamischer Atemwiderstand – Gase in Bewegung.....	121
Wärmeverlust.....	122
Sprachverzerrung	122
Tauchgangsplanung	123
Setpoint	123
Die Belastung unseres Atemsystems beim Rebreathertauchen und deren Auswirkungen	125
Berechnung der Gasdichte	127

Rebreather Diver Manual

Strategien um eine Überlastung unseres Atemsystem zu vermeiden	128
Diluent - Auswahl und Berechnungen	130
Bailout Gase.....	132
Auswahl und Berechnungen	132
Berechnung der Bailoutgasmenge	135
ZNS Berechnung bei der Verwendung von Bailout Gasgemischen.....	137

Die Autorin

Stefanie, gründete die Tauchschule spezial in Innsbruck. Ihre ersten Taucherfahrungen konnte sie mit 17 Jahren bei der Österreichischen Wasserrettung machen. Weitere Schritte bis zur Tauchlehrerin in der ÖWR folgten.



Die Basis für das technische Tauchen bildeten viele verschiedene Ausbildungen, und Fortbildungen in Eigeninitiative. 1992 erfolgte die Ausbildung zum PADI Instructor und staatl. geprüften Tauchlehrer. 1995 Ausbildung zum ANDI Nitrox Instructor und in weiteren Schritten bis zum Trimix Instructor. Weitere Ausbildungen bei TDI bis zum Advanced Trimix Instructor folgten. 1995 schloss sie ihre Rebreather Instructor Ausbildung ab, die bis heute folgende Geräte umfasst: rEvo, SF2, Megalodon, Poseidon und dem Dolphin von

Dräger. Seit 2013 ist sie als SSI XR Instructor Trainerin und TDI Instructor Trainerin im technischen Tauchen tätig.

Ihr Fachwissen konnte sie bei schwierigen Einsätzen und Bergungen mit Trimix bis 120 Meter Tauchtiefe unter Beweis stellen.

Haftungsausschluss

Tauchen, besonders technisches Tauchen, kann Gefahrenmomente enthalten.

Diese Zusammenstellung über Tauchen mit verschiedenen Gasgemischen kann keine Ausbildung bei einem erfahrenen Tauchlehrer ersetzen.

„Nobody is perfect“

Druckfehler können gemacht werden, Grenzwerte verändern sich, neue Erkenntnisse werden gemacht. Die Autorin übernimmt keine Verantwortung oder Haftung für Beschädigung, Unfälle oder Todesfälle, die auf Grund von Informationen aus diesem Buch entstehen.

Copyright

Alle Rechte an diesem Buch liegen bei Stefanie Steuerer. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung reproduziert, vervielfältigt, übersetzt oder weiterverarbeitet werden.

Einführung

Im ersten Teil dieser Lehrunterlage soll dem interessierten Taucher das Rebreathertauchen mit Diluent Luft, bis zu einer Tiefe von 40 Metern, näher gebracht werden. Vorausgesetzt wird, dass der Schüler eine fundierte Ausbildung (auch theoretisch) als Sport- und Nitroxtaucher besitzt.

Der zweite Teil befasst sich mit für das Rebreathertauchen mit normoxischen oder hypoxischen Helium Gemischen erforderlicher Ausrüstung, Gas-, Tauchgangs- und Bailoutplanung. Voraussetzung ist eine fundierte Ausbildung zum Rebreathertaucher mit Diluent Luft. Der Normoxic Rebreather Kurs erhöht die Tiefengrenzen auf 60 Meter, der Advanced Trimix Kurs auf 100 Meter bei unbegrenzter Dekozeit.

CCR Komponenten und Verbrauchsmaterialien



Moderne CCR's sind meist ähnlich aufgebaut. Sie bestehen grundsätzlich aus einer Sauerstoff- und einer Diluentflasche, zwei ersten Stufen, Gegenlunge, Atemkalkbehälter, Sauerstoffsensoren, O₂-Partialdruckanzeigen, Atemschlange, Mundstück mit Schieber und Rückschlagventilen und verschiedene Möglichkeiten Sauerstoff und Diluent dem Loop hinzuzufügen.

Bezeichnungen von CCR Bauteilen

- Diluent → Verdünnungsgas
- HUD → Head Up Display
- DIV → Diluent Isolations Valve → Absperrventil für Diluent
- DSV → Dive/Surface Valve → Mundstück mit Schieber und Rückschlagventilen
- BOV → Bail out Valve
- ADV → Automatic Diluent Additions Valve → Ventil zum automatischen Einspeisen von Diluent
- MAV → Manual Addition Valve → Ventil zum manuellen Einspeisen von O₂ oder Diluent
- Counterlungs → Gegenlungen
- Loop → Gegenlungen und Atemschlauch
- OPV → Over Pressure Exhaust Valve → Überdruckventil
- Scrubber → Atemkalk
- Scrubber Canister/Box → Atemkalkbehälter
- Solenoid → Magnetventil für die automatische O₂ Einspeisung
- Controller → Anzeigen

Sauerstoff- und Diluentflaschen

Das erforderliche Volumen ist, wie beim OC-Tauchen, natürlich abhängig vom Gasverbrauch. Es haben sich Flaschen mit einem Volumen von 2-3 Liter bewährt. Wie wir in späteren Berechnungen sehen werden, brauchen wir für einen Tauchgang auf 40 Meter und einer Tauchzeit von 60 Minuten ca. 100 Liter Diluent und ca. 120 Liter Sauerstoff.

Um beim Trockentauchen in kalten Gewässern „Blei zu sparen“ werden häufig 300 bar Stahlflaschen verwendet. 200 bar Flaschen aus Stahl, Aluminium oder Composite werden meist in wärmeren Gewässern eingesetzt. Die meisten CCR-Taucher verwenden verschiedene Flaschenkonfigurationen, um damit, je nach verwendetem Tauchanzug oder Unterzieher, den optimalen Trimm/Tarierung zu erreichen.

Gegenlungen - Counterlungs

Gegenlungen werden je nach ihrer Position in: over the shoulder, top of shoulder, und back mounted (Wing-Style, Built in) Gegenlungen eingeteilt.

Over the shoulder – OTS

Megalodon, Poseidon, Inspiration

- Gut funktionierende Wasserfalle
- Geringe, lageunabhängige Atemarbeit
- D-Ringe an den Schultergurten verdeckt
- Erschwertes Handling mit Stages
- Brustbereich nicht mehr frei
- Gegenlungen innen schwer zu trocknen



Top of shoulder – TOS

Megalodon

- Gut funktionierende Wasserfalle
- Geringe, lageunabhängige Atemarbeit
- D-Ringe an den Schultergurten frei
- Leichte Einschränkungen im Schulterbereich
- Gegenlungen innen schwer zu trocknen



Back mounted – built in

SF2, rEvo

- Gut geschützt
- Brustbereich wie beim OC-Tauchen frei
- Leicht zu reinigen/trocknen
- Funktion der Wasserfalle abhängig von der Bauart
- Atemarbeit je nach Bauart lageabhängig



Back mounted – Wing Style

JJ, Inspiration

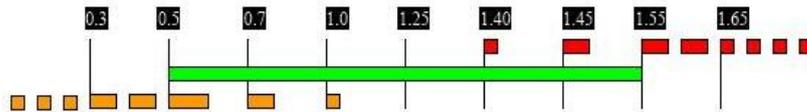
- Brustbereich wie beim OC-Tauchen frei
- Gut funktionierende Wasserfalle
- Atemarbeit etwas lageabhängig
- Nicht so leicht zu reinigen/trocknen



HUD - Head Up Display

Das Head Up Display ist eine wichtige pO₂- Überwachungs- und Anzeigeneinrichtung am Mundstück des Rebreathers. Die Anzeige (LED's) erfolgt durch verschiedene Farben (orange, grün rot) und in einfachen Blinkcodes, die leider, je nach Hersteller, unterschiedlich sind.

Shearwater HUD



Erklärung zur rEvo HUD Anzeige	
pO ₂	Wenn die Variante 5P in der Konfiguration nicht aktiviert ist, liegt der grüne Bereich, der durch das HUD angezeigt wird, immer zwischen 1,25 und 1,40. Abweichungen im pO ₂ werden dann wie folgt dargestellt
< 0,3	Mehrfaches schnelle aufleuchten des orangen LED
>0,3 – 0,5	2x kurz oranges LED
>0,5 – 0,7	1x lange oranges LED + konstant grünes LED
>0,7 – 1,0	1x kurz oranges LED + konstant grünes LED
>1,0 – 1,25	1x sehr kurz oranges LED + konstant grünes LED
>1,25 – 1,40	nur grünes LED
>1,40 – 1,45	1x sehr kurz rotes LED + konstant grünes LED
>1,45 – 1,55	1x rotes LED + konstant grünes LED
>1,55 – 1,65	rotes LED
> 1,65	mehrfaches schnelles Aufleuchten des roten LED



NERD (Near Eye Remote Display) bietet dir die Möglichkeit alle tauchrelevanten Informationen (in Zahlenwerten) immer im Blickfeld zu haben. Solltest du aber aus dem Loop austeigen müssen, ist das Ablesen und das Umstellen der Menüpunkte z.B. in den OC-Modus, nicht immer einfach.

Mundstück - Dive/Surface Valve

Das Mundstück (DSV) besteht aus einem Schieber (Walze gibt es mit und ohne O-Ring Dichtung) und 2 Rückschlagventilen.



Achtung!

Bei jedem Zusammenbau muss die Funktion der Rückschlagventile bei geöffnetem Mundstück überprüft werden.

Sauerstoffsensoren

Sauerstoffsensoren sind das Herzstück deines Rebreathers und müssen dementsprechend sorgfältig behandelt werden.

Der wohl bekannteste Hersteller und Entwickler von Sensoren zur Messung der Sauerstoffkonzentration unter hyperbaren Bedingungen, ist seit über 30 Jahren Teledyne Analytical Instruments in den USA.



Funktion

Ein Sauerstoffsensor ist vom Prinzip her eine galvanische Brennstoffzelle, ähnlich einer Batterie. Wenn das darin enthaltene Kaliumhydroxid in Berührung mit Sauerstoff gerät, kommt es zu einer chemischen Reaktion in der Brennstoffzelle. Daraus resultiert ein elektrischer Strom, der zwischen einer Blei-Anode und einer vergoldeten Kathode durch einen Lastwiderstand fließt. Der Sensorstrom wird an einem Widerstand in eine Spannung gewandelt und von einer Elektronik (Tauchcomputer) gemessen. Dieser Strom verhält sich proportional zur vorhandenen Sauerstoffkonzentration.

Aufbau

Hydrophobe Membranen, Goldkatode, Bleianode, flüssiges Elektrolyt, Molex Stecker (2 oder 3 Pin) oder 3,5 mm Klinkenstecker

Temperaturkompensation

Ohne geeignete Maßnahmen würde sich die Ausgangsspannung der Sensoren bei Änderung der Umgebungstemperatur ändern. Steigende Umgebungstemperatur bewirkt eine Steigerung der Ausgangsspannung und umgekehrt.

Lagerung

Sensoren sollten original verpackt in der Schutzatmosphäre, bei einer Temperatur zwischen 5°C bis 10°C gelagert werden.

Beachte, auch original verpackte Sensoren haben ein Ablaufdatum!

Lebensdauer

Ausgepackte oder eingebaute Sensoren müssen nach Rebreather-Hersteller Angaben regelmäßig ausgetauscht werden. Sauerstoffsensoren verbrauchen sich immer, unabhängig von ihrer Verwendung.

Es gibt jedoch drei Parameter, die die Lebensdauer negativ beeinflussen. Hoher Sauerstoffpartialdruck, hohe Umgebungstemperatur und geringe Luftfeuchtigkeit. Sensoren brauchen immer eine bestimmte Luftfeuchtigkeit, damit die Membrane funktionsfähig bleibt und die elektrolytische Flüssigkeit im Innern nicht austrocknet.

Einbau und Verwendung

Verwende nur Rebreatherspezifische O₂ Sensoren (keine medizinischen oder industrielle) und gib neuen Sensoren, nach dem Auspacken aus der Schutzatmosphäre und vor dem Kalibrieren einige Zeit, sich zu „akklimatisieren“.

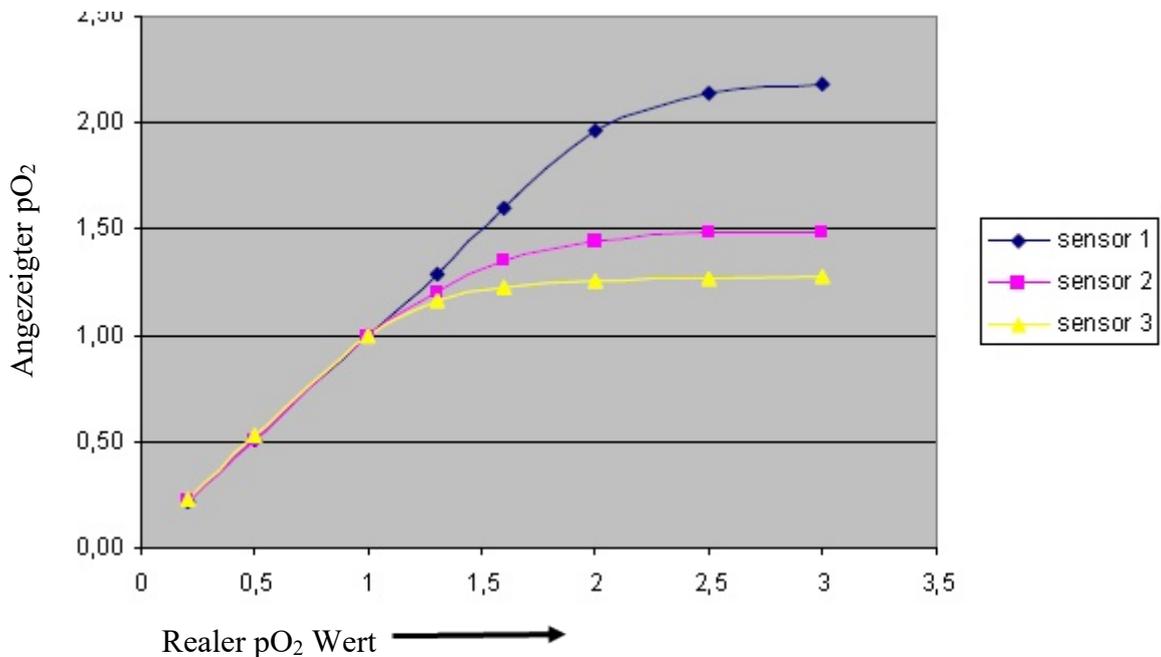
Teste regelmäßig das „current limiting“ (Strombegrenzung) deiner Sensoren.

Achtung!

Sensoren, die mit Wasser in Kontakt gekommen (abgesoffen) sind, müssen ersetzt werden!!

Strombegrenzung - current limiting

Im Kapitel Funktion von O₂-Sensoren haben wir erfahren, dass die galvanische Zelle des Sensors Strom liefert, der proportional und linear zum Sauerstoffpartialdruck ist. Leider ist es uns in der Praxis, bei der Kalibrierung mit 100% Sauerstoff auf Meereshöhe nur möglich, die Linearität der O₂-Sensoren bis zu einem pO₂ von 1 bar zu testen. Was geschieht aber, wenn wir einen wesentlich höheren pO₂ haben? Wir werden sehen, dass dieses lineare Verhalten bei höheren Sauerstoffpartiadrücken begrenzt ist.



Sensor 1:

Wir können erkennen, dass realer und angezeigter pO₂ bis zu einem O₂-Partialdruck von ca. 2 bar linear sind und gut übereinstimmen.

Sensor 2:

Der reale und der angezeigte pO₂ sind bis zu einem O₂-Partialdruck von ca. 1 bar linear und stimmen überein. Bei steigendem O₂-Partialdruck weicht realer und angezeigter O₂-Partialdruck immer mehr ab. Der angezeigte liegt unter dem realen O₂-Wert.

Sensor 3:

Bei diesem Sensor ist die Abweichung realer und angezeigter pO₂ noch extremer. Egal wieviel Sauerstoff zugegeben wird, oder wie hoch der tatsächliche pO₂ ist, die Anzeige wird nie 1,3 bar erreichen.

Testen des current limiting

Zur Sicherheit verwenden die meisten Rebreather mindestens 3 Sensoren (Ausnahmen Poseidon mit zwei und das rEvo mit fünf Sensoren) und jeder Taucher sollte sie regelmäßig auf die Strombegrenzung überprüfen. Beim Spülen in einer Tiefe zwischen 6 – 7 Meter, mit reinem Sauerstoff, sollte der angezeigte Wert annähernd 1,6 bar pO₂ betragen.

Tipps:

- *Sensoren müssen laut den Rebreather-Hersteller Angaben ausgetauscht werden.*
- *Wenn möglich - verwende zwei unabhängige, von verschiedenen Sensorengruppen angespeiste Anzeigen – Redundanz.*
- *Verwende wenn möglich, einen Sensor aus einer anderen Charge.*
- *Teste regelmäßig das current limiting.*
- *Wechsle nie alle Sensoren zur selben Zeit.*
- *Lagere dein Kreislaufgerät immer an einem kühlen Ort.*
- *Schreibe immer das Datum des Einbaus auf den Sensor.*
- *Sicherheitsblätter (Material Safety Data Sheet) beachten.*

Atemkalk



Die Aufgabe des Atemkalks (englisch scrubber) ist es, das CO₂, ein Folgeprodukt der Zellatmung, zu binden.

Die Zusammensetzung variiert leicht je nach Hersteller, besteht aber meist aus einer Mischung aus ca. 80% Calciumhydroxid (Ca(OH)₂), ca. 2% Natriumhydroxid (NaOH) und ca. 18% Wasser (H₂O).

Einige Hersteller geben Atemkalk einen Farbindikator bei, der eine Beurteilung des CO₂-Sättigungszustandes (Standzeit) ermöglichen sollte. Für uns CCR-Taucher ist dies keine zuverlässige Angabe, da sich der Farbumschlag (Weiß=frisch, Violett=verbraucht) wieder zurückbilden kann.



Die Bindung von CO₂ erfolgt in drei Phasen.

Phase 1 – Gasphase/Säurebildung

Das CO₂ wird durch Wasser (H₂O) zu Kohlensäure gebunden.

Daher ist es sehr wichtig, dass der Atemkalk eine gewisse Feuchtigkeit hat.



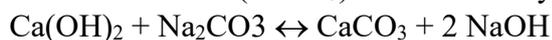
Phase 2 – Flüssigkeitsphase/Neutralisation

Die entstandene Kohlensäure reagiert nun mit Natriumhydroxid (NaOH), einem Bestandteil im Atemkalk, zu Natriumcarbonat ((Na₂CO₃) und Wasser.



Phase 3 - Festphase/Salzbildung

Das entstandene Natriumcarbonat (Ca(OH)₂) reagiert mit Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat (CaCO₃) und Natriumhydroxid.



Die für die Reaktion benötigten Stoffe, Wasser und Natriumhydroxid, werden während des Prozesses wieder erneuert, lediglich das Calciumhydroxid wird verbraucht und zu chemisch inaktivem Kalk umgewandelt.