



**Stefanie**  
Steuerer

**Tauchausbildung**  
auf den Punkt gebracht

## Die Auswirkung der Gasdichte beim Rebreathertauchen

Stefanie Steuerer  
Mobile: +43 (0) 664 3400872  
Email: [stefanie@steuerer.at](mailto:stefanie@steuerer.at)  
[www.steuerer.at](http://www.steuerer.at)  
[www.rebreather-center.at](http://www.rebreather-center.at)

## 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.

## Die Belastung unseres Atemsystems beim Rebreathertauchen und deren Auswirkungen

Die Verwendung von Rebreathern stellt eine Reihe von Belastungen für unser Atemsystem dar. Die am häufigsten auftretende ist die Anreicherung von  $\text{CO}_2$  und die dadurch auftretende Störung der unbewussten Steuerung der Lungenventilation, um das arterielle  $\text{CO}_2$  ( $\text{PaCO}_2$ ) auf normales Niveau zu senken.

Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  ist ein Nebenprodukt des Sauerstoff-Stoffwechsels in den Zellen und führt zu unerwünschten biochemischen Störungen und Symptomen, wenn der Wert im Körper erhöht ist.

$\text{CO}_2$  diffundiert aus den Geweben in das venöse Blut und wird dort in die Lunge transportiert. Von dort diffundiert es vom Blut in die Lungenbläschen und wird ausgeatmet. Durch eine starke Belüftung der Lunge durch frisches Atemgas wird mehr  $\text{CO}_2$  aus den Lungenbläschen in die Ausatemluft diffundieren (hoher Diffusionsgradient) und dadurch mehr  $\text{CO}_2$  aus dem Blut entfernt. Umgekehrt wird bei schlechter Belüftung der Lunge, weniger  $\text{CO}_2$  aus dem Blut entfernt.

Das aus dem Körper ausgeschiedene  $\text{CO}_2$ , ist direkt proportional zu Belüftung der Lunge.

### Die Steuerung der Atmung

Das Atemzentrum das überwiegend in der Medulla oblongata (verlängerten Rückenmark) sitzt hat die Aufgabe, für eine regelmäßige, geordnet ablaufende Ein- und Ausatmung zu sorgen und die Atemfrequenz und -tiefe dem aktuellen Bedarf des Organismus anzupassen. Ausschlaggebend ist dabei die Reaktion von Chemorezeptoren auf den Kohlendioxid-Gehalt, beziehungsweise den Kohlendioxid-Partialdruck des Blutes. Übersteigt dieser einen gewissen Schwellenwert, setzt der Atemreiz ein.

Rezeptoren, die auf den pH-Wert des arteriellen Blutes, sowie einen Sauerstoffmangel (Hypoxie) reagieren, haben nur eine zweitrangige Bedeutung als Atemreiz.

Weitere sekundäre Faktoren sind Hering-Breuer-Reflex, Veränderungen von Körpertemperatur, Blutdruck, hormonellen Faktoren.

Ein erhöhter  $\text{PaCO}_2$ -Spiegel (Hyperkapnie) erhöht die Anfälligkeit und verstärkt eine Ineratgasnarkose, steigert das Risiko einer Sauerstoffvergiftung und Dekompressionskrankheit und führt zu Symptomen wie Atemnot, Verwirrung, Angst und schließlich zu Bewusstlosigkeit.

Um das Risiko einer  $\text{CO}_2$  Belastung (Hyperkapnie) beim Rebreathertauchen zu minimieren, müssen wir folgende Strategien anwenden.

- Minimierung der Atemarbeit durch eine geeignete Rebreather Konstruktion
- Berechnung der Atemgasdichte bei der Planung von Rebreather Tauchgängen
- Minimierung der körperlichen Anstrengung, besonders bei tiefen Tauchgängen
- Einhaltung von Herstellerrichtlinien

## Statische Lungenbelastung

Das Tauchen kann Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften der Lunge verursachen, wenn der Brustkorb-Außendruck sich vom Druck innerhalb der Atemwege unterscheidet z.B. aufrechter Taucher.

Dieser Druckunterschied (Druck in den Atemwegen ist etwas geringer als der Druck auf den Brustkorb) wird als negative statische Lungenbelastung (negative static lung load) oder hydrostatisches Ungleichgewicht (hydrostatic imbalance) bezeichnet.

Es kommt zu einer Verlagerung des Lungenvolumens in Richtung Ausatemstellung, einer erschwerten Einatmung, da die Atemmuskulatur gegen den relativen Unterdruck in der Lunge arbeiten muss, und zu einer vermehrten Blutfüllung in den Gefäßen im Brustkorb.

Ursachen einer negativen statischen Lungenbelastung sind z.B. nicht richtig positionierte Gegenlungen oder schlechte Wasserlage.

## Ausrüstungsbezogener Atemwiderstand

Bei der Verwendung eines Rebreathers muss die gesamte Energie, die erforderlich ist um das Atemgas durch den Rebreather zu transportieren, vom Taucher aufgebracht werden. In diesem Zusammenhang ist das Design, Durchmesser von Schläuchen und Anschlüssen, und die Bauart des Atemkalkbehälters entscheidend.

WOB (Work of Breathing) ist die Bezeichnung, die verwendet wird, um die zum Atmen erforderliche Anstrengung zu messen (in Joule pro Liter). Ein hoher WOB bedeutet, dass es mehr Anstrengung erfordert einen Atemzug zu nehmen. Mehr Anstrengung führt zu einer erhöhten CO<sub>2</sub> Produktion.

## Gasdichte

Ein weiterer Punkt, der die Atemarbeit beim Tauchen beeinflusst, ist die Zunahme der Gasdichte.

Die Gasdichte ist ein Maß für die Masse pro Volumeneinheit in Gramm pro Liter (g/L)

Die Dichte eines Atemgases steigt direkt proportional zur Tauchtiefe.

Diese Erhöhung der Gasdichte führt zusätzlich zu einem erhöhten Strömungswiderstand in den Atemwegen und einer vermehrten Atemarbeit (WOB), um das dichtere Atemgas durch den Rebreather zu bewegen.

Der große Druckgradient zwischen dem Partialdruck von eingeatmetem CO<sub>2</sub> (PiCO<sub>2</sub>) und arteriellen CO<sub>2</sub> (PaCO<sub>2</sub>) ermöglicht eine schnelle Diffusion von CO<sub>2</sub> aus dem Blut in den Lungenfilter und aus dem Körper heraus.

Die Erhöhung von PiCO<sub>2</sub> durch eine erhöhte Gasdichte verringert diesen Gradienten und reduziert die Fähigkeit des Körpers, CO<sub>2</sub> zu eliminieren.

Forschungen von Christian Lambertsen und seinen Kollegen zeigt auf, dass die Gasdichte auch unsere Fähigkeit, Gas effektiv zu atmen und auszutauschen, stark beeinflusst.

## Berechnung der Gasdichte

Bei ihren Forschungen stellte Gavin Anthony und Simon Mitchell fest dass die ideale Gasdichte bei 5,2 g/L (Tauchgang mit Luft auf 31 Meter) liegt, mit einem absoluten Maximum von 6,2 g/L (Tauchgang mit Luft auf 39 Meter).

Gas	Dichte in Gramm/Liter
Luft	1,293 g/L
Stickstoff	1,251 g/L
Sauerstoff	1,429 g/L
Helium	0,179 g/L
Wasserstoff	0,090 g/L

$$\text{Gasdichte Tief (g/L)} = \text{DruckTief (bar)} \times \text{Gasdichte Oberfläche (g/L)}$$

### Beispiel 1:

Dichte der Luft in 30 Meter

Gasdichte Tiefe = Druck Tiefe x Gasdichte Oberfläche

Gasdichte Tiefe = 4 bar x 1,293 g/L

**Gasdichte Tiefe = 5,17 g/L**

### Beispiel 2:

Trimix 18/35, Tauchtiefe 60 Meter

0,18 bar Sauerstoff

0,35 bar Helium

0,47 bar Stickstoff

Schritt 1:

Gasdichte der Gasmischung an der Oberfläche (1 bar) berechnen.

$$\left. \begin{array}{l} \text{O}_2 \quad 0,18 \times 1,429 = 0,26 \text{ g/L} \\ \text{He} \quad 0,35 \times 0,179 = 0,06 \text{ g/L.} \\ \text{N}_2 \quad 0,47 \times 1,251 = 0,59 \text{ g/L} \end{array} \right\} = 0,91 \text{ g/L}$$

Die Gasdichte an der Oberfläche (1 bar) beträgt 0,91 g/L.

Schritt 2:

Gasdichte Tiefe = Druck Tiefe x Gasdichte Oberfläche

Gasdichte Tiefe = 7 bar x 0,91 g/L

Gasdichte Tiefe = 6,37 g/L

**Die Gasdichte auf 60 Meter beträgt 6,37 g/L und liegt damit über der maximalen Gasdichte von 6,2 g/L.**

## Strategien um eine Hyperkapnie durch Überbelastung unseres Atemsystem zu vermeiden

### Statische Lungenbelastung

Die richtige Wasserlage, um eine negative Lungenbelastung zu vermeiden, ist Rebreather spezifisch und hängt auch vom Abstand bez. Position der Gegenlungen zur Lunge/Atemwege des Tauchers ab.

### Ausrüstungsbezogener Atemwiderstand

Wahl eines Gerätes mit guter Konstruktion- und Prüfungsmerkmalen (CE-Norm für alle Gase und Wasserlagen). Nicht verändert werden sollten Mundstückkonfigurationen, Durchmesser durch Einbau von zusätzlichen Teilen (Sauerstoffsensoren).

### Verringerung der Arbeitsleistung in der Tiefe

Beherrschung von grundlegenden Tauchfertigkeiten (Trimm/Tarierung) und der Einsatz von Scootern helfen uns die Arbeitsleistung in der Tiefe zu verringern.

Der Einsatz solcher Strategien ist jedoch kein Ersatz für die Minimierung der Gasdichte, weil Ereignisse wie eine Notfallsituation oder der Ausfall des DVP zu erhöhter Arbeitsleistung führt.

### CO<sub>2</sub> – Belastung durch Störungen

Einhaltung von Herstellerrichtlinien zur Standzeit des Atemkalks, als auch zur Vorbereitung des Rebreathers vor dem Tauchen.

Weitere Punkte sind das Testen der Rückschlagventile und das sorgfältige Füllen des Atemkalks (um Kanalbildung zu verhindern).

Verschiedene Rebreather haben leicht vermeidbare, aber bekannte Schwachstellen, derer sich der Benutzer bewusst sein muss.

## Quellenangaben

Anthony TG, Diving re-breathing apparatus testing and standards UK/EU perspective. In: Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical Diving Conference Proceedings. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009, pg. 218-36.

Camporesi EM, Bosco G. Ventilation, gas exchange, and exercise under pressure. In: Brubakk AO, Neuman TS, eds. Bennett and Elliott's Physiology and Medicine of Diving, 5th ed. Edinburgh, UK: Saunders, 2003: 77-114.

Deng C, Pollock NW, Gant N, Hannam JA, Dooley A, Mesley P, Mitchell SJ. The five minute prebreathe in evaluating carbon dioxide absorption in a closed-circuit rebreather: a randomised single-blind study. *Diving Hyperbaric Med.* 2015; 45: 16-24.

Doolette DJ, Mitchell SJ. Hyperbaric conditions. *Comprehensive Physiol.* 2011; 1: 163-201.

Mitchell SJ, Cronje F, Meintjes WAJ, Britz HC. Fatal respiratory failure during a technical rebreather dive at extreme pressure. *Aviat Space Environ Med.* 2007; 78: 81-6.

Mitchell SJ. Respiratory issues in technical diving. In Vann RD, Mitchell SJ, Denoble PJ, Anthony TG, eds. Technical Diving Conference Proceedings. Durham, NC: Divers Alert Network; 2009, pg. 12-37.

Mitchell SJ, Doolette DJ. Recreational technical diving part 1. An introduction to technical diving. *Diving Hyperbaric Med.* 2013; 43: 86-93.

Poon CS. Ventilatory control in hypercapnia and exercise: Optimization hypothesis. *J Appl Physiol.* 1987; 62: 2447-59.