

aqua med Refresher 08

Gas und Druck – Tiefenrausch und Krampfanfall

Autor: Dr. med. Matthias Giesel

Der menschliche Organismus ist nahezu perfekt an die Umwelt angepasst. Wie eng diese Anpassung tatsächlich ist, kann man besonders beim Tauchen feststellen. Schon die Verdopplung des Umgebungsdruckes (10 m Wassertiefe) reicht aus um den an der Wasseroberfläche so harmlosen Sauerstoff in ein zentralnervös toxisches Atemgas zu verwandeln. In dem folgenden Refresher werden die Wirkungen von Sauerstoff und Stickstoff auf den Taucher bei Änderungen des Umgebungsdruckes erläutert. Dieses Wissen bildet auch die Grundlage für das Tech Diving.

Physikalische Grundlagen

Der Druck, dem der Taucher ausgesetzt ist, wird als Umgebungsdruck bezeichnet und setzt sich aus dem Luftdruck und dem Wasserdruck zusammen.

Auf Meereshöhe herrscht ein Luftdruck von ca. 1 bar (genau 1,013 bar). Näherungsweise nimmt der Luftdruck um 0,1 bar pro 1000 Höhenmeter ab. Möchte man in höheren Lagen tauchen, müssen ab 600m Höhe (Bergseen) spezielle Tauchgangsprofile zur Tauchgangsberechnung verwendet werden.

Pro 10 Meter Wassertiefe nimmt der Umgebungsdruck um 1 bar zu. Das bedeutet, dass in 10 Metern Tiefe ein Umgebungsdruck von 2 bar und z. B. auf 27 Metern Wassertiefe ein Druck von 3,7 bar besteht (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Umgebungsdruck beim Tauchen

Tiefe	Meereshöhe	2000 Meter Höhe	4000 Meter Höhe
0 Meter	1,0 bar	0,8 bar	0,6 bar
1 Meter	1,1 bar (110%)	0,9 bar (113%)	0,7 bar (117%)
5 Meter	1,5 bar (150%)	1,3 bar (163%)	1,1 bar (183%)
10 Meter	2,0 bar (200%)	1,8 bar (225%)	1,6 bar (267%)
20 Meter	3,0 bar (300%)	2,8 bar (350%)	2,6 bar (433%)
30 Meter	4,0 bar (400%)	3,8 bar (475%)	3,6 bar (600%)

(Die Werte in Klammern: relative Druckänderung im Vergleich zur Wasseroberfläche)

Auf Meereshöhe hat die Luft folgende Zusammensetzung: 78% Stickstoff, 21% Sauerstoff, die restlichen 1% sind Kohlendioxid und Edelgase. Entscheidend ist das Gesetz von Dalton: Der Gesamtdruck eines Gasgemischs setzt sich aus der Summe seiner Teildrücke zusammen.

Gesetz von Dalton:

$$\begin{aligned}
 p_{\text{gesamt}} &= p_{\text{Stickstoff}} + p_{\text{Sauerstoff}} + p_{\text{Sonstige}} \\
 &= 0,78 \text{ bar} + 0,21 \text{ bar} + 0,01 \text{ bar} \\
 &= 1 \text{ bar (bezieht sich auf Meereshöhe)}
 \end{aligned}$$

Der Teil- bzw. der Partialdruck eines Gases in einem Gasgemisch bestimmt dessen physiologische, physikalische und chemische Wirkung im menschlichen Organismus und nicht der prozentuale Anteil eines Gasgemisches.

Tab. 2: Gesetz von Dalton

Gas	Anteil (%)	Wasseroberfläche (Partialdruck - bar)	5 Meter (bar)	10 Meter (bar)	20 Meter (bar)
Sauerstoff	20,93	0,21	0,31	0,42	0,63
Stickstoff	78,1	0,78	1,17	1,56	2,34
Argon	0,93	0,01	0,01	0,02	0,03
Kohlendioxid	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
Andere	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
Summe	100	1	1,5	2	3

Sauerstoff

Paul-Bert-Effekt:

Sauerstoff wird ab einem bestimmten Partialdruck akut toxisch für das zentrale Nervensystem. Bei einem Überschreiten eines Partialdrucks von Sauerstoff von 1,4 bar (konservativ) und 1,6 bar (liberal) können diese Erscheinungen in Form von vollständig reversiblen zentralnervösen generalisierten Krampfanfällen auftreten. Dabei treten in der Regel keine Vorwarnzeichen, z.B. in Form einer Aura wie bei epileptischen Krampfanfällen, auf. Die Gefahr beim Tauchen besteht in der Bewusstlosigkeit und dem damit verbundenen sekundären Ertrinken¹ unter Wasser. Mit einem Atemgas aus reinem Sauerstoff darf man also nicht tiefer als 6 Meter tauchen. Sauerstoffkrämpfe werden zwar selten, dafür aber regelmäßig bei der hyperbaren Oxygenationstherapie beobachtet. In der Druckkammer atmet der Patient z. B.: in 18 Metern Tiefe reinen Sauerstoff (US Navy Table 6). Die Krampfanfälle sind vollständig reversibel und in einer Druckkammer deshalb auch nicht gefährlich. Hier kann der Patient nicht ertrinken und zudem sofort behandelt werden. Der genaue Pathomechanismus (Ablauf eines Krankheitsprozesses) ist noch nicht vollständig geklärt. Schnelle Druckänderungen, hoher Druck und die Dauer der Sauerstoffexposition² sollen eine Rolle spielen. Weiterhin gibt es Co-Faktoren wie starke körperliche Belastung, Kälte, Hypoglykämie (niedriger Blutzuckerspiegel) und Hyperkapnie (erhöhter Kohlendioxidgehalt im Blut). Allerdings kann die Krampfschwelle bei jedem individuellen Taucher aufgrund der hohen Variabilität des Auftretens nicht bestimmt werden. Unterschiedliche Sauerstoffkonzentrationen bei Tauchgasgemischen haben breiten Zuspruch nicht nur in der Sporttaucherszene gefunden (z.B.: Trimix, Nitrox).

1 erst Krampfanfall – Bewusstlosigkeit – und dann Tod durch Ertrinken

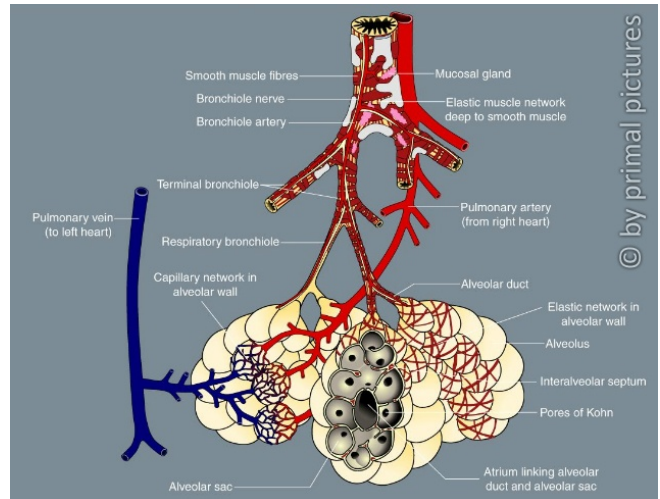
2 Wirkung von Sauerstoff auf den menschlichen Organismus

Jeder Taucher sollte die maximale Einsattiefe seiner Gasmischung kennen und diese einhalten. Der Sauerstoffgehalt der Mischung muss vor dem Tauchen analysiert werden. Auf die Angabe an der Flasche alleine darf man sich nicht verlassen!

Lorrain-Smith-Effekt:

Bei diesem Effekt handelt es sich um eine Lungenschädigung, welche durch die Langzeiteinwirkung eines erhöhten Sauerstoffpartialdruckes hervorgerufen wird. Es kommt zu einer Verdickung der Alveolarwand und zum Surfactantverlust, so dass der Gasaustausch erheblich erschwert wird. Klinische Zeichen für eine pulmonale (die Lunge betreffende) Schädigung durch hyperbaren Sauerstoff sind Übelkeit, Müdigkeit, Leistungs- und Koordinationschwäche, erhöhte Atemfrequenz, erhöhter Atemwegswiderstand, Lungenschmerzen und thorakales Engegefühl, welches als Angina pectoris (Schmerz in der Brust, aufgrund Durchblutungsstörung des Herzens) fehlgedeutet werden kann.

Dieser Effekt spielt weniger beim Sporttauchen, sondern mehr beim Berufstauchen und Tech-Diving eine Rolle. Die Lungenveränderungen können auch bei Intensivpatienten, welche mit einer hohen Konzentration an inspiratorischem Sauerstoff beatmet werden müssen, beobachtet werden.



Stickstoff

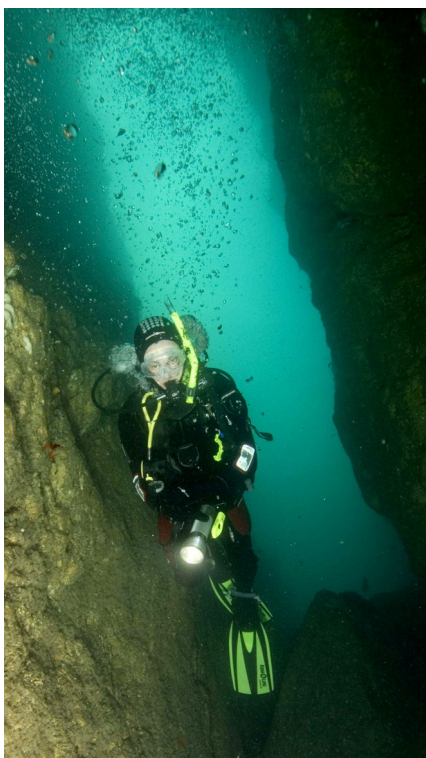
Schon Junod (schweizerische Mediziner Victor Théodore Junod (1809-1882)) berichtete 1835 über narkotische Zustände, Halluzinationen und Schläfrigkeit beim Atmen von Luft unter erhöhtem Umgebungsdruck. Der sogenannte Tiefenrausch beruht auf der narkotischen Wirkung des Stickstoffs auf das Nervensystem. Prinzipiell zeigen auch alle Inertgase wie Helium und Argon narkotische Wirkungen. Man geht von einer Zellmembranpotenzialänderung³ aus, welche durch ein Überangebot von Stickstoffmolekülen hervorgerufen wird. Die Symptome sind vollständig reversibel, wenn man beispielsweise eine Druckreduktion durch Auftauchen herbeiführt.

Die Wirkung von Stickstoff unter erhöhtem Umgebungsdruck ähnelt dem eines Alkoholrausches. Im anglo-amerikanischen Raum spricht man daher auch vom Martinigesetz: 15 m Wassertiefe entsprechen der Wirkung eines Martinis. Das bedeutet, dass in einer Wassertiefe von 45 m 3 Martinis auf uns wirken. Erste Symptome werden für gewöhnlich ab 30 m wahrgenommen, was auch der allgemeinen maximalen Sporttauchertiefe entspricht. Ab ca. 100 m Tiefe kann dann Bewusstlosigkeit eintreten. Eine Übersicht über die Symptome zeigt folgende Tabelle.

- 3 Potenzialänderung: Die Erregung des Gehirns (jeglicher Funktionen) durch Öffnen von Kanälen auf der Zelloberfläche (Die Zelloberfläche wird erregt, dadurch kommt es zu einer Weiterleitung der Erregung oder zur Ausschüttung von Hormonen, welche dann Effekte im Körper wiederum auslösen.
→ Krampfanfälle sind eine überschießende oder fehlerhafte, weil nicht bremsbare Erregung von Gehirnzellen. Sauerstoff unter Druck kann die Erregbarkeitsschwelle der Hirnzellen massiv herabsetzen. Für Stickstoff konnte bisher dies nicht bewiesen werden.

Tabelle 3 Stickstoff unter Druck:

2-4 bar	Milde euphorische Stimmung, leichte Schwierigkeiten beim Ausüben ungewohnter Tätigkeiten
4 bar	Einschränkungen von Entscheidungsfähigkeit und des Kurzzeitgedächtnis, erste Unsicherheiten bei manuellen Geschicklichkeitstests
4-6 bar	Verlust der Selbstkontrolle, Albernheit, Erinnerungslücken und Ideenfixation
6 bar	Schläfrigkeit, Halluzinationen
10 bar	Bewusstseinsverlust



Ähnlich wie beim Alkoholrausch – oder auch bei einem Halluzinogenrausch, mit dem der Tiefenrausch ebenfalls gelegentlich verglichen wird - kann auch der Tiefenrausch nicht bei jedem Einzelnen vorhergesagt werden. Verstärkende Faktoren für das Auftreten eines Tiefenrausches sind: Stress, Erschöpfung, Alkohol, Drogen, Angst, Unerfahrenheit, Kälte und Schlafmangel.

Auch soll die Inertgasnarkose bei sehr schneller Kompression eher einsetzen als bei langsamer. Subjektiv ist eine Gewöhnung in begrenztem Ausmaß möglich. Wobei es auch bei mehrmaliger „Anwendung“ nicht zu einer Leistungsverbesserung kommt.

Beim Auftreten von Symptomen einer Inertgasnarkose sollte unverzüglich die Tiefe reduziert werden. Befolgt man diese Ratschläge kommt es zu einer sofortigen Reduktion der Symptome.

Im professionellen Bereich muss ab größeren Tiefen Mischgas eingesetzt werden. Häufig wird dabei der Stickstoff durch ein Inertgas mit geringerer narkotischer Potenz, wie z. B. Helium ausgetauscht (Trimix). Leider werden regelmäßig die Tiefengrenzen für Luftgemische durch Selbstüberschätzung und Unerfahrenheit überschritten. Es ist wahrscheinlich, dass viele ertrunkene Taucher auch ursächlich an einem Tiefenrausch litten.

Fallbeispiel 1:

Ein erfahrener Taucher (Dive Instructor mit mehr als 5000 TG) wollte in Kroatien einen Tauchgang durchführen. Ziel war, eine maximale Tauchtiefe von 50 m zu erreichen. Er führte den Tauchgang alleine mit alternativer Luftversorgung aus. Im Nachhinein erzählte er von einer ungewöhnlich starken Euphorie ab ca. 45 m Tauchtiefe. Weiterhin kann er sich an seine Dekostops bei 18, 9 und 5 m erinnern, welche alle problemlos verlaufen sind.

An der Wasseroberfläche stellte der Taucher eine maximale Tauchtiefe von 78 m auf seinem Tauchcomputer fest. Eine Erinnerung an den Tauchgang ab 45 m bis 78 m Tiefe und zurück hatte er nicht. Es ist wahrscheinlich nur seiner großen Erfahrung zu verdanken, dass er auch in dieser Tiefe auf gewisse Tauchautomatismen trotz ausgeprägtem Tiefenrausch zurückgreifen konnte und den Tauchgang überlebt hat.