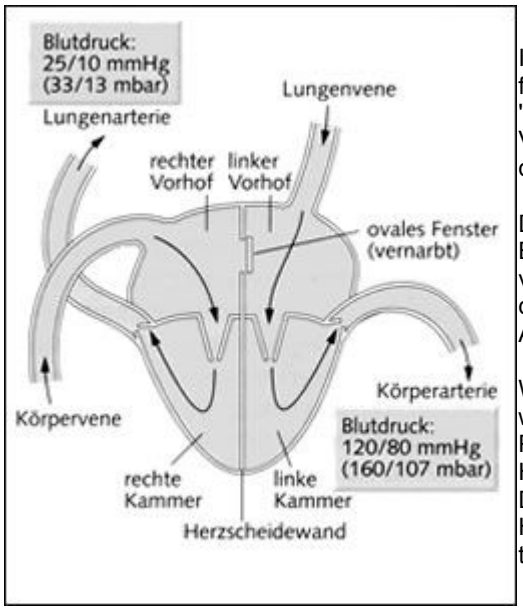
Herz

Das menschliche Herz besteht aus zwei funktionell unabhängigen Pumpsystemen, dem rechten und dem linken Herz.



In beiden Herzhälften wird das venöse (= zum Herz fließende) Blut zunächst in einem sogenannten "*Vorhof*" gesammelt und durch Anspannung der Vorhofmuskulatur durch Ventile ("*Segelklappen*") in die rechte bzw. linke Herzkammer gepresst.

Durch die anschließende Muskelanspannung im Bereich der Herzkammern werden die Segelklappen verschlossen und das Blut über die Auslassventile des Herzens ("*Taschenklappen*") in die jeweiligen Arterien gepumpt.

Währenddessen können sich die Vorhöfe bereits wieder mit venösem Blut füllen und so den nächsten Pumpvorgang einleiten. Der Blutfluss in den beiden Herzhälften erfolgt normalerweise ohne Durchmischung der beiden Seiten, da die Herzscheidewand die beiden Systeme voneinander trennt.

Foramen ovale

Bei etwa 20 bis 30% aller Menschen gibt es eine Möglichkeit zur Blutdurchmischung zwischen beiden Vorhöfen über eine ovale Öffnung, lat.: foramen ovale (s. Grafik 1).

Beim Embryo besteht durch diese Verbindung die während der Schwangerschaft notwendige Möglichkeit zum Blutübertritt vom rechten zum linken Vorhof. Nach der Geburt verschließt sich die ovale Öffnung durch die dann veränderten Blutfluss- und Blutdruckverhältnisse im Herz.

Bei den meisten Menschen vernarbt das Foramen ovale komplett. Bei bis zu **30% der Bevölkerung** besteht aber auch weiterhin über ein unvollständig verschlossenes **Foramen ovale** die Möglichkeit zum Blutaustausch zwischen beiden Vorhöfen.

Wenn überhaupt, kommt es dabei häufig nur zum Blutübertritt vom linken zum rechten Vorhof, da der Blutdruck im linken Herz deutlich über dem Druck im rechten Herz liegt.

Lediglich bei plötzlichen Druckerhöhungen im Brustkorb, z.B. bei Pressatmung, beim Valsalva-Manöver und bei Verstößen gegen die Dekompressionvorschriften kann es zu einer Druckerhöhung im rechten Herz kommen (Mechanismen werden weiter unten erklärt).

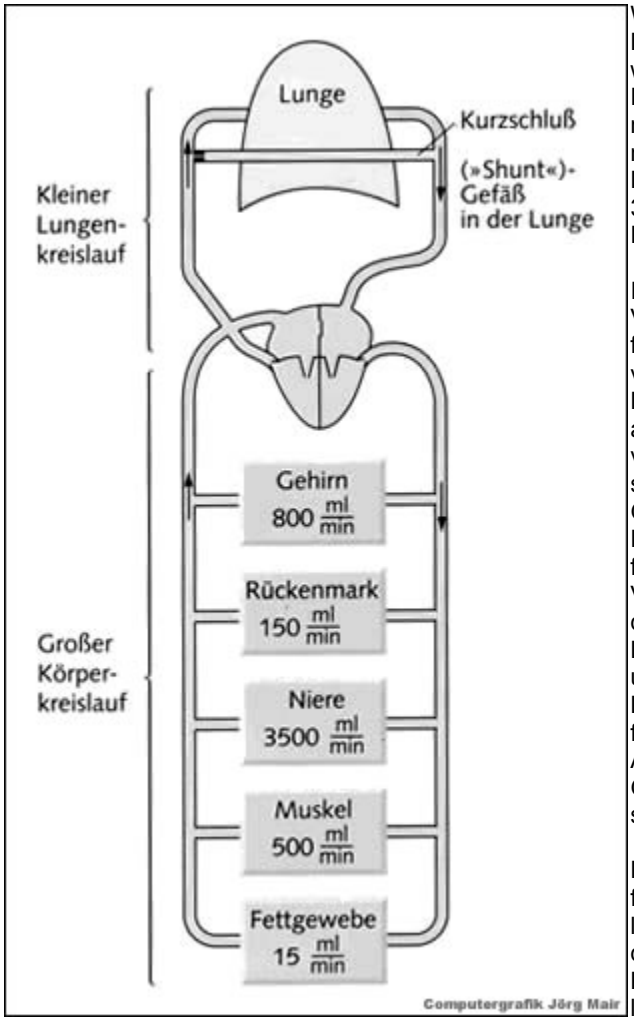
Hier kann es dann auch zu einem Blutfluss vom rechten zum linken Vorhof kommen. Der normale Blutdruck in den Körperarterien beträgt 120 mmHg (= Millimeter Quecksilbersäule) in der Austreibungsphase des Herzens ("*Systole*") und 80 mmHg in der Füllungsphase der Herzkammer ("*Diastole*"), wenn die Taschenklappen geschlossen sind und kein Blut aus dem Herzen in die Körperarterien strömt.

Die entsprechenden Blutdruckwerte in der Lungenarterie liegen mit 25/10 mmHg deutlich unter den Werten des Körperkreislaufs.

Copyright by Taucherwelt ©

Blutkreislauf

Das aus der linken Herzkammer ausgeworfene Blut strömt durch die große Körperarterie ("*Aorta*") über viele Verzweigungen in jedes Körpergewebe. Je nach Funktion und Bedarf werden die verschiedenen Körpergewebe unterschiedlich stark durchblutet.



Während z.B. 100 g Gehirngewebe pro Minute von 800 ml Blut durchströmt werden, wird die gleiche Menge Fettgewebe in diesem Zeitraum nur mit 15 ml Blut versorgt. Eine Sonderstellung nehmen hier die Nieren ein, 100 Gramm Nierengewebe werden pro Minute von 3500 ml Blut zur Entgiftung und Flüssigkeitsabscheidung durchströmt.

In allen Geweben geschieht die Versorgung der einzelnen Zellen durch feinste Haargefäße, lat.: **Kapillaren**. Sie versorgen das Gewebe mit O2 und Nährstoffen und führen Stoffwechsel-abfallprodukte sowie CO2 ab. Auf der venösen Seite des Körperkreislaufs sammelt sich das Blut in immer größeren Gefäßen um schließlich über die große Hohlvene in den rechten Herz-Vorhof zu fließen.
Von der rechten Kammer wird das Blut dann über die Lungenarterie in den Lungenkreislauf gepumpt. In der Lunge umspannen die Lungenkapillaren die Lungenbläschen (Alveolen) in einem feinen Netz. Hier findet der im nächsten Abschnitt näher zu besprechende Gasaustausch zwischen Blut und Luft statt.

Nach dem Gasaustausch in der Lunge fließt das Blut über die Lungenvenen zum linken Vorhof, um von hier aus erneut durch die linke Herzkammer in den Körperkreis-
lauf gepumpt zu werden.

Eine tauchmedizinisch interessante Besonderheit im Blutkreislauf ist die Existenz von *Kurzschluss- oder "Shunt"-Gefäßen* in der Lunge. Sollte aus irgendeinem Grund der Widerstand der Blutgefäße, der dem Blutfluss entgegensteht, in der Lunge einen gewissen Wert überschreiten, so können diese normalerweise verschlossenen Shunt-Gefäße geöffnet werden.

Ein Teil des Blutes fließt dann direkt über die Lungenvenen zum linken Vorhof, ohne dass es die Lungenkapillaren durchströmt und am Gasaustausch teilgenommen hat. Gefäßwiderstand und Blutdruck im Lungenkreislauf können dadurch gesenkt werden.

Tauchreflex

Der Tauchreflex ermöglicht den im Wasser lebenden Säugetieren beim Tauchen den Energieverbrauch des Körpers zu senken, umso länger und tiefer tauchen zu können. Beim Abtauchen tritt eine Verlangsamung des Herzschlags bis auf 50% der Ausgangsfrequenz und eine damit verbundene Abnahme der Herzpumpmenge auf.

In dieser Situation können dann nur noch die unbedingt notwendigen Organe durchblutet und mit Sauerstoff versorgt werden. Insgesamt führt dieser Reflex bei den Meeressäugern zu einer

Copyright by Taucherwelt ©

erheblichen Sauerstoffeinsparung.

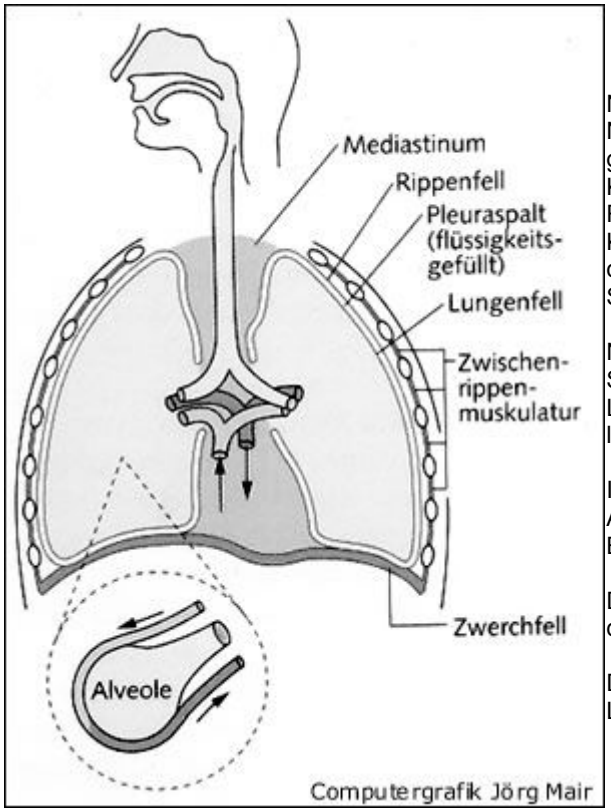
Tauchreflex beim Menschen

Beim Menschen ist der Tauchreflex nur noch ansatzweise erkennbar. Es kommt zwar auch hier zu einer Verlangsamung des Herzschlags, doch tritt dieser Effekt nur sehr langsam ein und erreicht nur eine Frequenzverminderung um max. 30%.

Im Gegensatz zu den Meeressäugern ist der Effekt beim Menschen temperaturabhängig und besonders im kalten Wasser ausgeprägt. Nachteilig sind beim Menschen die mit Verlangsamung des Herzschlags auftretenden Herzrhythmusstörungen, die bei den Meeressäugern nicht festzustellen sind.

Die Herzpumpmenge und die Durchblutung der einzelnen Organe können beim Menschen durch den Tauchreflex kaum beeinflusst werden. Insgesamt ist eine nennenswerte Sauerstoffeinsparung beim Menschen im Vergleich zur Situation an Land nicht festzustellen.

Weg der Atmung



Nach der Einatmung wird die Luft in der Nase und im Nasen- Rachen-Raum gereinigt, angefeuchtet und auf Körpertemperatur erwärmt. Über den Rachen-Raum gelangt die Luft zum Kehlkopf, hier kreuzt sich der Luftweg mit dem Verdauungsweg vom Mund zur Speiseröhre.

Nach Passage des Kehlkopfes mit den Stimmbändern erreicht die Luft über die Luftröhre die beiden Hauptbronchien der linken und rechten Lunge.

In den Lungen erfolgt eine weitere Aufzweigung der Atemwege in kleinere Bronchien und Bronchiolen.

Die feinste Struktur innerhalb der Lunge ist das Lungenbläßchen, lat.: *Alveole*.

Diese werden von einem feinen Netz von Lungenkapillaren umsponnen.

Anatomie

Die beiden Lungen sind nur zur Körpermitte hin durch den sogenannten Lungenstiel mit dem Körper fest verbunden. Dieser Lungenstiel enthält den Hauptbronchus, Lungenarterien und Lungenvenen. Sonst wird die Lunge zu allen Seiten durch das Lungenfell, lat.: "*Pleura visceralis*", begrenzt.

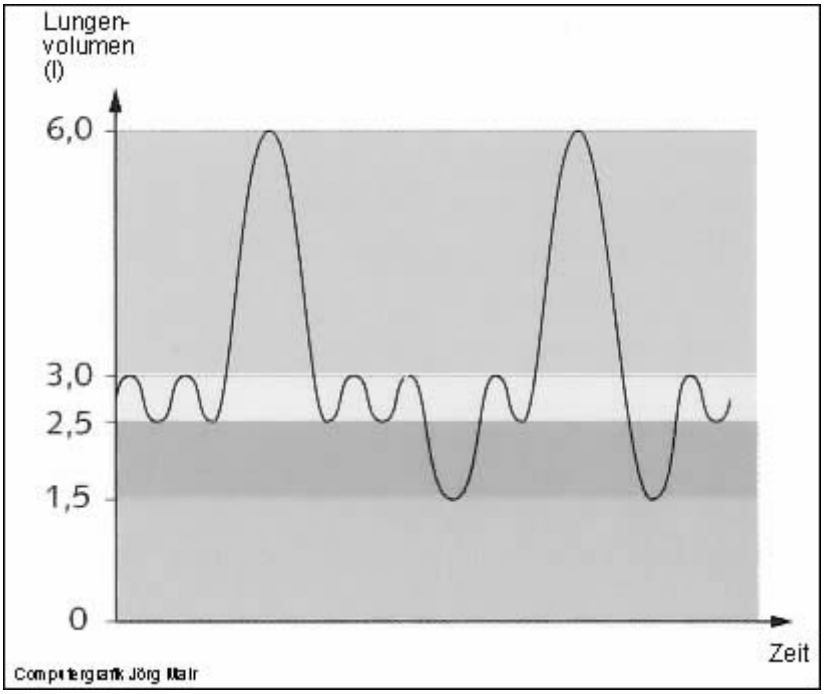
Dem Lungenfell gegenüber liegt das Rippenfell, lat.: "*Pleura parietalis*". Es bildet die Grenzschicht des Körpers sowohl zu den Rippen hin, zum Zwerchfell und zum "*Mediastinum*". Als Mediastinum bezeichnet man den Raum zwischen den beiden Lungen, der das Herz, die großen Gefäße und die Luftröhre enthält. Zwischen Lungenfell und Rippenfell befindet sich der sogenannte "*Pleuraspalt*". Dieser zu allen Seiten hin abgeschlossene Raum ist mit einer geringen Menge Gleitflüssigkeit gefüllt.

Copyright by Taucherwelt ©

Bedingt durch den hohen Anteil elastischer Fasern ist die Lunge immer bestrebt, ein möglichst kleines Volumen einzunehmen. Bei der Einatmung folgt die Lunge passiv dem Brustkorb, der sich durch Anspannung der Zwischenrippenmuskulatur und des Zwerchfells vergrößert. Da diese Aktion entgegen der elastischen Rückstellkräfte der Lunge erfolgt, entsteht dabei im Pleuraspalt ein leichter Unterdruck.

Physiologie

- Durch Anspannung der Atemmuskulatur (*Zwischenrippenmuskeln, Zwerchfell, Hilfsatemmuskulatur des Schultergürtels*) wird die Lunge passiv gedehnt.
- Durch den in der Lunge entstehenden relativen Unterdruck wird Luft durch die Atemwege in die Lunge gesaugt.
- Die Ausatmung folgt weitgehend passiv durch die elastischen Rückstellkräfte der Lunge.



Bei einem jungen Mann beträgt die durchschnittliche Atemzugtiefe ca. 0,5l. Über die normale Einatmung hinaus besteht eine Einatemreserve von ca. 3l, nach der normalen Ausatmung besteht eine Ausatemreserve von ca. 1l. Die Gesamtmenge der maximal zu bewegenden Luft zwischen tiefster Ausatmung und tiefster Einatmung wird als Vitalkapazität bezeichnet und beträgt in unserem Beispiel 4,5l.

Selbst nach tiefster Ausatmung bleibt jedoch in der Lunge ein Restvolumen (= "*Residualvolumen*") von ca. 1,5 l Luft vorhanden. Aus der Summe von Vitalkapazität und Residualvolumen errechnet sich die Totalkapazität der Lunge von 6 l. Die hier genannten Beispielwerte sind natürlich nicht für alle Menschen zutreffend, da die Lungenvolumina sehr stark von Körpergröße, Lebensalter und Geschlecht abhängen.

Copyright by Taucherwelt ©

Totraum

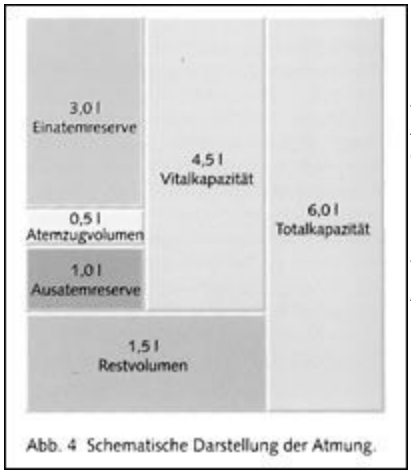


Abb. 4 Schematische Darstellung der Atmung.

Zum Volumen der Lunge selbst muss noch das Volumen der Atemwege von der Nase bis zu den kleinen Bronchiolen gerechnet werden, bei Erwachsenen beträgt es ca. 150ml.

Dieses Volumen wird als **Totraumvolumen** bezeichnet, da die Luft in den Atemwegen nicht am Gasaustausch in der Lunge teilnimmt sondern lediglich bei jedem Atemzyklus durch die Atemwege hin und her geschoben wird.

Bei einem normalen Atemzug von 0,5l erreichen also lediglich 350ml die Lunge, um am Gasaustausch teilzunehmen.

Der Gasaustausch

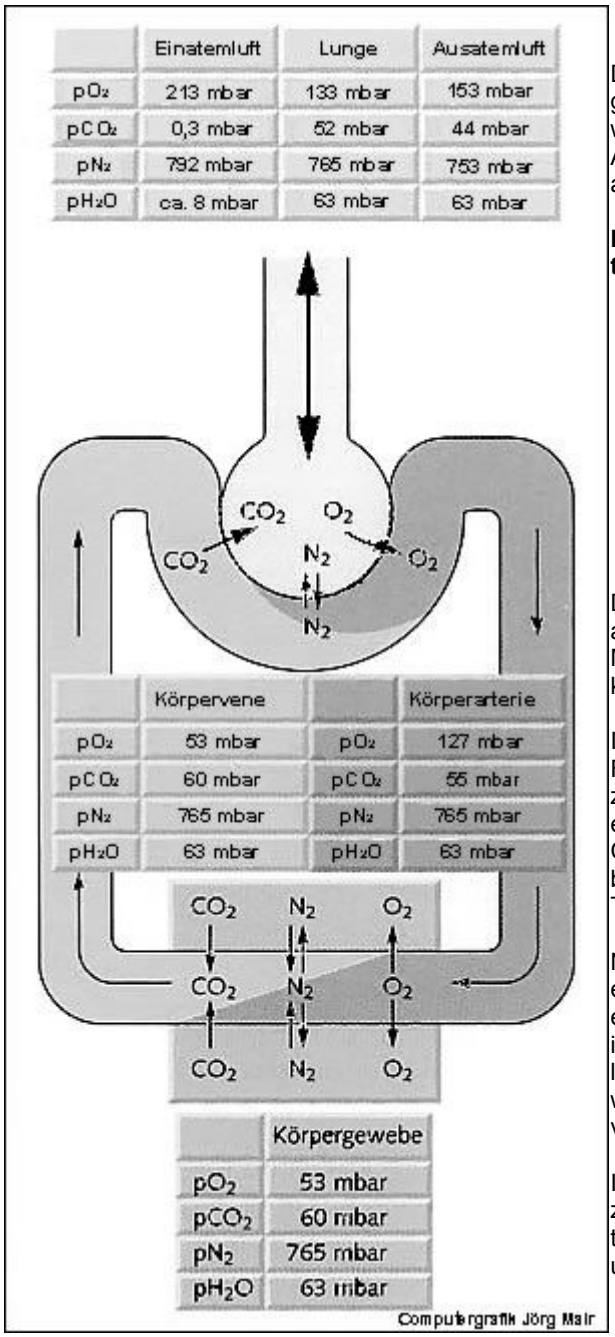
Man unterscheidet einen

- **äußeren Gasaustausch in der Lunge** zwischen Lungenalveole und Lungenkapillaren und einen
- **inneren Gasaustausch im Körpergewebe** zwischen den Körperzellen und den Gewebekapillaren.

Beim Stoffwechsel wird Sauerstoff (= O_2) vom Körper verbraucht und Kohlendioxyd (= CO_2) als Abfallprodukt produziert.

Copyright by Taucherwelt ©

Äußerer Gasaustausch



Das vom rechten Herz in die Lunge gepumpte CO2-reiche und O2-arme Blut wird beim Kontakt von Lungenkapillaren und Alveolen von CO2 befreit und mit O2 angereichert.

Das CO2 wird auf drei Wegen zur Lunge transportiert:

- Gebunden an den Blutfarbstoff (= *Hämoglobin*) der roten Blutkörperchen,
- in physikalischer Lösung im Blutplasma und
- nach Reaktion mit Wasser als HCO3--Ionen: CO2 + H2O HCO3- + H+.

Diese Reaktion ist leicht umkehrbar, so dass auch ein als HCO3--Ion transportiertes CO2-Molekül in der Lunge abgeatmet werden kann.

In der Lunge diffundiert das CO2 in gelöster Form durch die dünne Zellmembran zwischen Lungenkapillaren und Alveole entlang dem Konzentrationsgefälle, da der CO2-Teildruck im venösen Blut 60 mbar beträgt, während in der Lunge nur ein CO2-Teildruck von 52 mbar herrscht.

Nach dem gleichen Schema (Diffusion entlang des Konzentrationsgradienten) erfolgt die Aufnahme von O2 aus der Lunge in die Lungenkapillaren, da im venösen Blut lediglich 53 mbar O2-Teildruck herrschen, während in der Alveolarluft ein O2-Teildruck von 133 mbar herrscht.

In den Lungenkapillaren wird dann O2 wie zuvor das CO2 auf den o.g. beiden Wegen transportiert: gebunden an das Hämoglobin und physikalisch gelöst im Plasma.

Innerer Gasaustausch

Der Gaswechsel im Gewebe erfolgt entsprechend dem äußeren Gasaustausch entlang des Konzentrationsgefälles für die beiden betroffenen Gase. O2 diffundiert in gelöster Form aus den Kapillaren mit einem O2-Teildruck von 127 mbar in die Körperzellen mit einem durchschnittlichen O2-Teildruck von 53 mbar. Das CO2 diffundiert aus dem Körpergewebe in die Gewebekapillaren entlang

Copyright by Taucherwelt ©

des Konzentrationsgradienten von 60 mbar im Gewebe zu 55 mbar in den Kapillaren.

Obwohl annähernd soviel CO2 vom Gewebe produziert wird wie O2 verbraucht wird, fällt auf, dass sowohl bei der äußeren als auch bei der inneren Atmung die Konzentrationsgefälle für CO2 wesentlich geringer sind als für O2. Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass ein Großteil des Blut-CO2 nach Reaktion mit Wasser als HCO3- transportiert wird und sich dann nicht mehr anhand des CO2-Teildrucks erkennen lässt. Aus der Höhe des CO2-Teildrucks kann man somit nur indirekt auf die tatsächliche Menge des CO2 im Kreislauf schließen.

Inertgase

Neben den beiden am Stoffwechsel aktiv beteiligten Gasen O2 und CO2 werden selbstverständlich auch alle übrigen Gasbestandteile der Einatemluft im Blut und den Körpergeweben gelöst. So wird **Stickstoff (= N2)**, der mit 78% der Atemluft den größten Gasanteil ausmacht, beim äußeren Gasaustausch als gelöstes N2 vom Blut aufgenommen und beim inneren Gasaustausch ebenfalls in gelöster Form auch in die Körpergewebe aufgenommen. Da N2 nicht am Stoffwechsel teilnimmt, nicht verbraucht wird und chemisch unverändert bleibt, wird er als "**Inertgas**" bezeichnet und auf allen Stationen des Gasaustausches in gleicher Höhe angetroffen. Der Teildruck des N2 in der Lunge steht im Fließgleichgewicht mit dem N2-Teildruck im Blut und in den einzelnen Körpergeweben (765 mbar).

Wasserdampf

Das Atemgas wird bei der Einatmung in Nase und Nasenrachenraum angefeuchtet und ist in der Lunge zu 100% wasserdampf-(H2O-)gesättigt. Bei 37°C Körpertemperatur beträgt der H2O-Teildruck in der Lunge 63 mbar. Wie für N2 besteht auch für H2O ein Fließgleichgewicht beim äußeren und inneren Gasaustausch. Für eine korrekte Berechnung des Gesamtgasdrucks ist in Grafik 5 der H2O-Teildruck auf allen Ebenen berücksichtigt.

Sauerstoff-Verbrauch

Bei körperlicher Aktivität verbraucht die Muskulatur vermehrt O2. Während der Gesamt-O2-Bedarf eines Menschen in Ruhe ca. 300 ml/min. beträgt, können trainierte Personen bei Schwerstarbeit bis zu 4000 ml Sauerstoff pro Minute verbrauchen.

Entsprechend des O2-Verbrauchs wird vom Körper bei Belastung auch vermehrt CO2 produziert. Durch eine Vertiefung der Atemzüge und die Erhöhung der Atemfrequenz kann das vermehrt anfallende CO2 abgeatmet werden und der vermehrte O2-Bedarf gedeckt werden. Das Atemminutenvolumen kann von 7 l/min. in Ruhe bis auf über 150 l/min. gesteigert werden.

Diese Werte sind selbstverständlich abhängig von Alter und Trainingszustand.

Atemgrenzwert

Die maximal mögliche Atmung in l/min. bezeichnet man als Atemgrenzwert.
Neben den oben beschriebenen Faktoren sind für die Berechnung des Atemgrenzwertes beim Tauchen drei Punkte von Bedeutung:

Atemgasdichte

Die Dichte des Atemgases, die sich mit zunehmender Wassertiefe erhöht, beeinflusst erheblich die

Copyright by Taucherwelt ©

Transportkapazität der Atemwege.
Grafik 6 zeigt, dass bei Luftatmung in einer Wassertiefe von 50 m der Atemgrenzwert auf ca. 80 l/min. sinkt. Das bei Schwerstarbeit erforderliche Atemminutenvolumen könnte in dieser Tiefe nicht mehr aufgebracht werden. Eine Verbesserung dieser Situation schafft der Austausch des N2 gegen das Inertgas Helium (= He), welches wesentlich leichter ist und eine höhere Arbeitsleistung auch in größeren Wassertiefen ermöglicht.

Eine weitere Atemerleichterung kann durch eine Reduzierung des O2-Anteils zugunsten des He im Atemgas erreicht werden. Um in dieser Situation einen für die Gewebeversorgung ausreichenden O2-Teildruck zu erreichen sind Atemgasmischungen wie in Grafik 6 mit 1% O2 und 99% He aber erst in größeren Tiefen, jenseits der Tiefengrenze für die Sporttaucherei möglich.

Ausrüstung

Ein weiterer Faktor, der sich negativ auf den Atemgrenzwert beim Tauchen auswirkt, ist die Ausrüstung des Tauchers. Ein engsitzender Neoprenanzug beeinträchtigt die Arbeit der Atemmuskulatur durch seine elastische Rückstellkraft. Eine weitere Behinderung der Atemmuskulatur bewirkt die Flaschenbänderung, sowie eine Rettungs- und Tarierweste oder ein Stabilizing-Jacket je nach Füllungszustand.

Atemregler

Neben diesen Faktoren kann auch der Lungenautomat durch einen erhöhten Atemwiderstand bei Ein- und Ausatmung zu einer Beeinträchtigung des Atemgrenzwertes führen.

Atemsteuerung

Die **Steuerung der Atemfrequenz und Atemzugtiefe** erfolgt durch das Atemzentrum im verlängerten Rückenmark. Man kann diese Steuerung als geschlossenen Regelkreislauf darstellen. Die Sensoren in diesem Regelkreis registrieren den CO2-Teildruck im arteriellen Blut, den O2-Teildruck im arteriellen Blut sowie den Dehnungszustand der Lunge und damit indirekt das Lungenvolumen.

In Abhängigkeit von den durch die Sensoren aufgenommen Informationen steuert das Atemzentrum die Frequenz und die Atemzugtiefe über entsprechende Befehle an die Atemmuskulatur. Den stärksten Atemreiz stellt ein erhöhter CO2-Teildruck im arteriellen Blut dar. Ist bei der momentanen Atemfrequenz und Atemzugtiefe das überschüssige CO2 nicht in ausreichendem Maße aus dem Blut zu entfernen,

so erfolgt durch das Atemzentrum solange eine Erhöhung von Atemfrequenz und Atemzugtiefe bis die Sensoren wieder eine Normalisierung des CO2-Teildrucks messen. Die prinzipiell gleiche Wirkung wie ein erhöhter CO2-Teildruck hat auch ein erniedrigter O2-Teildruck im arteriellen Blut.

Dieser Atemreiz ist jedoch wesentlich schwächer ausgeprägt als der CO2-Atemreiz. Wird der Atem angehalten, so kann man den Einfluss des Lungenvolumens bzw. des Dehnungszustandes der Lunge auf die Atmung feststellen: In Einatemstellung kann die Luft wesentlich länger angehalten werden als in Ausatemstellung der Lunge.

Hyperventilation

Eine **bewusste oder unbewusste Mehratmung** über das physiologische notwendige Maß hinaus, d.h. ohne dass die Sensoren des oben angesprochenen Regelkreises eine vermehrte Atmung fordern, wird als "*Hyperventilation*" bezeichnet.

Eine Hyperventilation kann bewusst durchgeführt werden aber auch unbewusst auftreten, z.B. bei starker psychischer Anspannung in Stresssituationen. Durch die Mehratmung wird vermehrt CO2 abgeatmet und so der arterielle CO2-Teildruck erniedrigt.

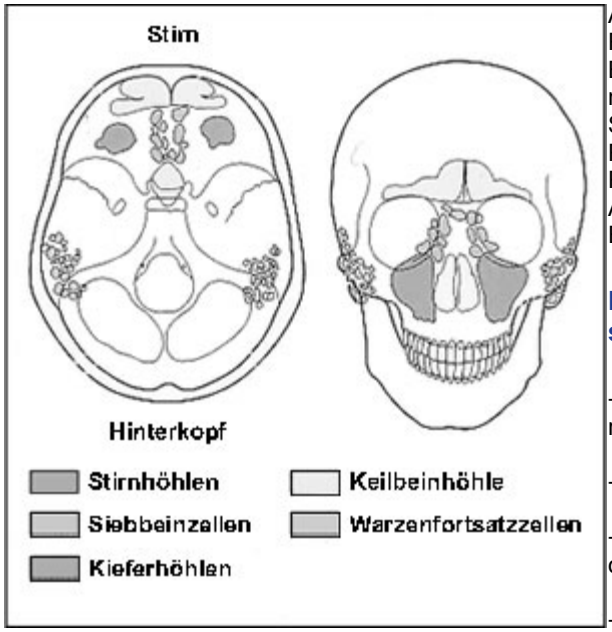
Obwohl hierdurch der stärkste Atemreiz deutlich reduziert werden kann, ist bei willentlicher

Copyright by Taucherwelt ©

Durchführung der Hyperventilation vor einem Atemanhalteversuch die Apnoe oder Atemanhaltezeit nicht deutlich zu verlängern.

Im Gegensatz zur Beeinflussbarkeit der CO2-Menge im arteriellen Blut kann der O2-Gehalt nur unwesentlich beeinflusst werden, drüber 99% des O2-Transports an Hämoglobin gebunden erfolgt, welches unter Normalbedingungen bereits zu etwa 97% mit Sauerstoff gesättigt ist. Der Anteil des physikalischen im Blutplasma gelösten Sauerstoffs spielt demgegenüber nur eine untergeordnete Rolle.

Nebenhöhlen



Neben den oben bereits angesprochenen Anteilen der Atemwege (Nase, Mund, Nasen-Rachen-Raum, Kehlkopf, Luftröhre, Bronchien usw.) befinden sich im Schädel noch einige weitere **luftgefüllte Hohlräume**. Sie alle haben eine Verbindung zum Nasen-Rachen-Raum und dienen u.a. als Resonanzraum für die Stimme und zur Anfeuchtung, Erwärmung und Reinigung der Einatemluft.

Die wichtigsten Nasennebenhöhlen sind

- die beiden **Kieferhöhlen**, die links und rechts
  der Nase im Oberkiefer gelegen sind,
- die **Stirnhöhlen** oberhalb von Nase und
  Augenhöhlen,
- die **Keilbeinhöhle** hinter der Nase, oberhalb
  des Nasen-Rachen-Raums,
- sowie die **Siebbeinzellen** links und rechts
  der Nase oberhalb der Kieferhöhlen.

Weiter muss noch auf die **Mastoidzellen** hingewesen werden, die sich hinter den Ohren befinden und mit dem Mittelohr in Verbindung stehen.

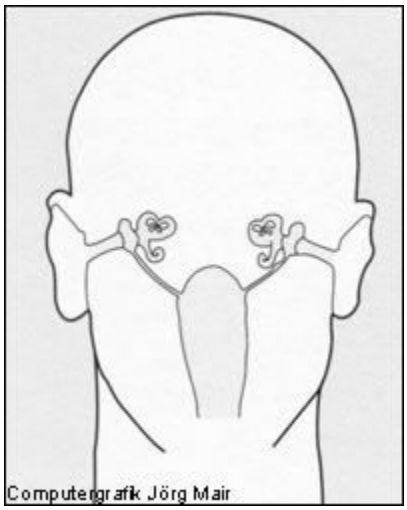
Anatomie

Die Ohren befinden sich beim Menschen allseits von Schädelknochen umschlossen hinter den Unterkiefer-Gelenken.
Das Ohr kann grob in drei Anteile unterteilt werden:

- **äußeres Ohr**
- **Mittelohr** und
- **Innenohr**

Copyright by Taucherwelt ©

Äußeres Ohr



Das **äußere Ohr** besteht aus der knorpeligen Ohrmuschel und dem Gehörgang, der im äußeren Teil knorpelig, im inneren Teil knöchern begrenzt ist.

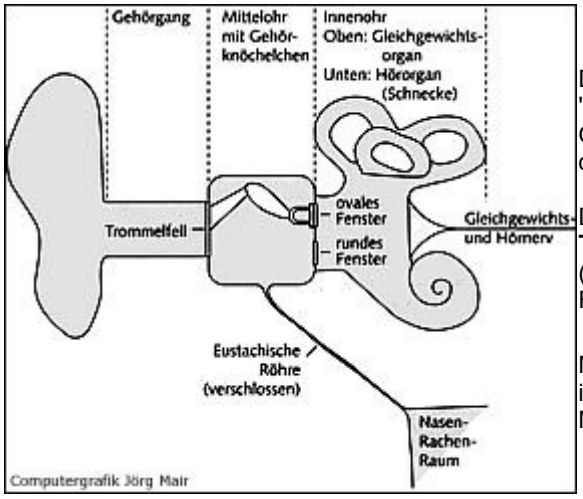
Äußeres Ohr und Mittelohr werden durch das Trommelfell getrennt, welches die Schallschwingungen auf die Gehörknöchelchen im Mittelohr überträgt.

Mittelohr

Das **Mittelohr** ist luftgefüllt und besitzt eine Verbindung zum Nasen-Rachen-Raum, die "**Eustachische Röhre**" oder Ohrtube.

Diese Verbindung ist normalerweise verschlossen, um eine Infektion des Mittelohres zu verhindern und um eine Hörbeeinträchtigung durch Atemgeräusche auszuschließen.

Durch Anspannung der Gaumenmuskulatur wird sie jedoch bei jedem Kauen, Schlucken und Gähnen kurz geöffnet, um einen Luftaustausch im Mittelohr zu ermöglichen.



Die luftgefüllten Hohlräume im sogenannten "*Mastoid*", einem Schädelauswuchs hinter dem Ohr, heißen "Mastoidzellen" und stehen mit dem Mittelohr in Verbindung.

Die **Schallübertragung erfolgt vom Trommelfell** über die drei Gehörknöchelchen (Hammer, Amboss und Steigbügel) auf die Fußplatte des Steigbügels.

Mit der Fußplatte dieses dritten Knöchelchens ist eine ovale Membran verbunden, die das Mittelohr vom Innenohr trennt.

Copyright by Taucherwelt ©

Über dieses "**ovale Fenster**" (das nicht zu verwechseln ist mit dem Foramen ovale im Herz !) werden die Schallsignale auf das flüssigkeitsgefüllte Innenohr übertragen.

Innenohr

Das **Innenohr** ist allseits von Knochen umgeben und beherbergt **zwei Sinnesorgane**:

- das **Hörorgan** in der "Schnecke"
- und das **Gleichgewichtsorgan** mit den drei Bogengängen zur Registrierung der Lage im Raum und der Drehbeschleunigung.

Sogenannte "*Haarzellen*" nehmen die akustischen Signale und die Informationen über Lage und Bewegung im Raum in den beiden Sinnesorganen auf.

Vom Innenohr ziehen der Gleichgewichts- und der Hörnerv gemeinsam zum Gehirn.

Neben dem ovalen Fenster gibt es noch eine zweite Membran zwischen Mittelohr und Innenohr, das "runde Fenster".

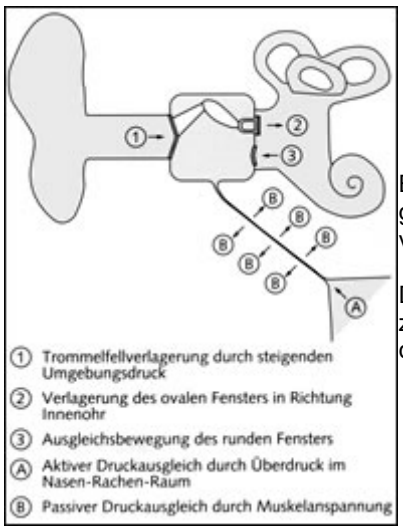
Wenn das ovale Fenster durch Bewegungen des Steigbügels in Richtung Innenohr verschoben wird, so kann der Innenohrdruck durch eine gegensinnige Bewegung des runden Fensters in Richtung Mittelohr ausgeglichen werden.

Da das Innenohr allseits von starrem Knochen umgeben ist und die Innenohrflüssigkeit inkompressibel ist, kann nur so eine optimale Schallübertragung ohne größere Druckschwankungen im Innenohr gewährleistet werden.

Druckausgleich

Da die Mittelohren und die mit ihnen verbundenen Mastoidzellen die einzigen Hohlräume im Kopf sind, die im Gegensatz zu allen anderen Nasennebenhöhlen keine ständig geöffnete Verbindung zum Nasen-Rachen-Raum besitzen, ist bei Druckveränderungen immer ein bewusst durchzuführender Druckausgleich notwendig. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten:

Aktiver Druckausgleich



Beim sogenannten **Valsalva-Manöver** werden Nase und Mund geschlossen gehalten und anschließend versucht, durch die verschlossene Nase auszuatmen.

Der hierdurch erzeugte Überdruck im Nasen-Rachen-Raum führt zu einer Öffnung der Tuben und einem Einpressen von Luft in die Mittelohren.

Passiver Druckausgleich

Copyright by Taucherwelt ©

Beim bewussten Schlucken, Kauen oder Gähnen werden die natürlichen Öffnungsmechanismen nachvollzogen. Durch Anspannung der Gaumenmuskulatur werden die Tuben geöffnet und ein Druckausgleich im Mittelohr wird durch passives Einströmen von Luft hergestellt.

Einige Taucher sind durch viel Training in der Lage, die zur Tubenöffnung erforderlichen Muskeln einzeln anzuspannen, also ohne zu Schlucken, zu Kauen oder zu Gähnen.

Die passiven Druckausgleichsmethoden haben gegenüber dem Valsalva-Manöver den Vorteil, dass größere, plötzliche Druckschwankungen im Mittelohr vermieden werden.

Druckausgleichsprobleme

Alle genannten Druckausgleichsmethoden funktionieren nur bei normalen Schleimhautverhältnissen im Bereich der Tube, also z.B. nicht bei Erkältungen mit Schleimhautschwellungen im Nasen-Rachen-Raum.

Auch bei leichten Erkältungen oder bei schon abgeklungenen Krankheitssymptomen ist die Schleimhaut im Bereich der Tubenöffnungen oft schon/noch gereizt und ein einwandfreier Druckausgleich nicht möglich.

Die Druckausgleichsmethoden funktionieren ebenfalls nicht, wenn die Druckdifferenz zwischen Mittelohr und Nasen-Rachen-Raum zu groß ist, da es dann im Bereich der Tube zu Schleimhautschwellungen mit den oben beschriebenen Auswirkungen kommt.

Hören unter Wasser

Im Wasser werden **Schallwellen ca. viermal so schnell transportiert** wie in Luft. Die Übertragungsverluste durch Absorption sind wesentlich geringer als in Luft, so dass Schallwellen über größere Distanzen transportiert werden können. Dabei werden hohe Frequenzen stärker absorbiert als tiefe Frequenzen.

Die genannten Effekte führen unter Wasser zu Problemen bei der Ortung von Schallquellen (Richtung und Entfernung), da die persönlichen Erfahrungswerte des Hörens in Luft zu Fehleinschätzungen führen.

Wichtige Informationen für ein korrektes Richtungs- und Entfernungshören liefern:

- der unterschiedliche Auftreffzeitpunkt der Schallwellen auf beide Ohren und
- die höhere Schallintensität an dem der Schallquelle zugewandten Ohr.

Beide Informationen sind unter Wasser schlecht zu verwerten. Die Auftreffzeitdifferenz ist nur ein Viertel des Luftwertes und die Unterschiede in der Schallintensität an beiden Ohren sind geringer als in Luft.

Viele Schallereignisse lokalisiert man beim Tauchen daher "im" Kopf, mit großer Erfahrung sind allenfalls grobe Richtungsangaben möglich. Gefahren im Wasser lassen sich oft nicht orten, z.B. kann man nur schlecht das Näherkommen oder sich Entfernen eines Schiffes unterscheiden.

Lagesinn

Die beiden Gleichgewichtsorgane in den Innenohren geben uns sowohl **statische als auch**

Copyright by Taucherwelt ©

dynamische Orientierungshilfen.

Statische Orientierung

In einem Teil des Gleichgewichtsorgans wird die aktuelle Lage des Gleichgewichtsorgans zur Schwerkraftachse ermittelt, d.h. Informationen darüber, ob der Kopf aufrecht gehalten wird, geneigt ist oder sich (beim Kopfstand) in 180° gedrehter Stellung befindet.

Dynamische Orientierung

In den drei senkrecht aufeinander stehenden Bogengängen des Gleichgewichtsorgans werden Drehbeschleunigungen in allen drei Bewegungachsen gemessen.

Bei Drehbewegungen des Kopfes bewegt sich die in den Bogengängen befindliche Innenohrflüssigkeit zunächst nicht mit und führt so zur Bewegung der in den Bogengängen befindlichen Sinneshärchen.

Verarbeitung im ZNS

Die statischen und dynamischen Informationen beider Gleichgewichtsorgane werden im **zentralen Nervensystem (= ZNS)** abgeglichen.

Daneben erfolgt im Gehirn auch ein Vergleich mit den optischen Informationen beider Augen und den Sensoren der Haltemuskulatur des Körpers, die aufgrund des Spannungszustandes der Muskeln Informationen über die Körperhaltung geben.

Dabei versucht das Gehirn immer, die Informationen aller drei Orientierungssysteme (Gleichgewichtsorgane, Sehen und Haltemuskulatur) in Übereinstimmung zu bringen.

Orientierung unter Wasser

Unter Wasser gestaltet sich die Orientierung für den Menschen wesentlich schwieriger als an Land. Dies liegt zum einem an den eingeschränkten optischen Orientierungsmöglichkeiten, da die Sichtweite unter Wasser mehr oder weniger stark begrenzt ist und das Gesichtsfeld durch Maskengröße und optische Verzerrung eingeschränkt ist.

Zudem kann die Haltemuskulatur eines Tauchers, der gut austariert im Wasser "schwebt", dem Gehirn nur schlecht verwertbare Informationen liefern.

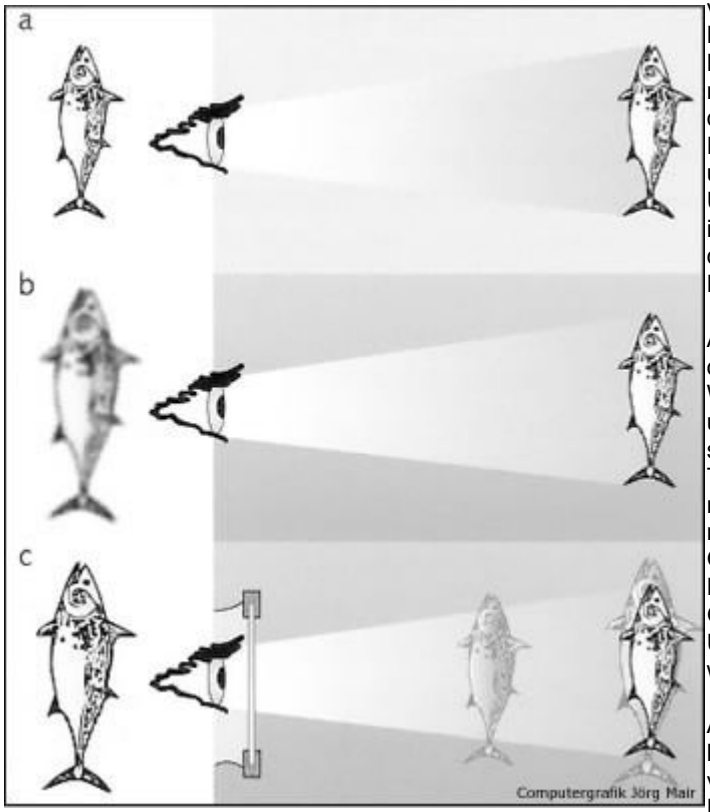
Da die seitlichen, fast senkrecht stehenden Bogengänge besonders in horizontaler Lage empfindlich auf Temperaturveränderungen reagieren, kann es beim Tauchen in bestimmten Situationen auch hier zu Fehlinformationen kommen (s.u. "Drehschwindel").

Mit diesen oft unzureichenden Informationen versorgt, ergibt sich für das zentrale Nervensystem beim Tauchen noch die zusätzliche Schwierigkeit, dass sich der Mensch ohne festen Halt frei im dreidimensionalen Raum bewegt. Eine Art der Fortbewegung, für die dem ZNS keine Erfahrungswerte vorliegen.

Auch allein die Tatsache, dass dem Gehirn insgesamt zu wenig Informationen zur Orientierung vorliegen (sogenannte "*Deprivation*"), kann zu Störungen und zu Schwindelsensationen führen.

Copyright by Taucherwelt ©

Grenzflächen



Haben zwei benachbarte Medien unterschiedliche optische Dichten, so kommt es beim Übertritt von Licht aus einem Medium in das andere zur Brechung des Lichts. Das menschliche Auge ist für die Grenzfläche Hornhaut-Luft konstruiert und ist bei diesen Umgebungsbedingungen in der Lage, scharfe Bilder der Umgebung auf der Netzhaut abzubilden.

Aufgrund der anderen optischen Dichte von Wasser kann das Auge unter Wasser nicht scharf sehen. Erst mit Hilfe einer Tauchmaske kann das menschliche Auge wieder mit der gewohnten **Grenzfläche Hornhaut-Luft** durch eine plane Glasscheibe in die Unterwasserwelt blicken, wie in ein Aquarium.

Am Aquarium-Beispiel können sehr gut die noch verbleibenden optischen Effekte an der Grenzfläche Wasser-Glas-Luft studiert werden, wie sie auch bei der Tauchmaske auftreten.

Totalreflexion

Treten Lichtstrahlen, ausgehend von der Senkrechten, mit einen **größeren Winkel als ca. 48**° auf die Grenzfläche Luft-Wasser auf, so treten sie nicht in das andere Medium über, sondern **werden zurückgeworfen** (= Totalreflexion).

Copyright by Taucherwelt ©

Das maximale Gesichtsfeld durch eine Tauchmaske beträgt daher 2x 48° = 96°, unabhängig von Größe und Abstand der Maskengläser. Zum Vergleich beträgt das horizontale Gesichtsfeld eines Menschen über Wasser normalerweise über 130°.

Die Totalreflexion erklärt, weshalb man seinen Tauchpartner nicht beim seitlichen Blick durch die Maske in die Augen sehen kann und schräg gehaltene Unterwasserinstrumente nicht ablesen kann.

Brechung

Durch die **unterschiedliche Lichtbrechung im Wasser** (Brechungsindex 1,33) und in der Luft (Brechungsindex 1,0) erscheinen alle Gegenstände im Wasser um **1/3 vergrößert** oder bei räumlichem Sehen **um 1/4 näher**.

Da alles, was man im Wasser sieht um 1/3 größer auf der Netzhaut des Auges abgebildet wird (1,33 / 1), ist das Gesichtsfeld einer Tauchermaske im Wasser um ¼ kleiner als über Wasser (1 / 1,33).

Streuung

Neben den oben genannten Aquariumeffekten erschweren Schwebeteilchen im Wasser die optische Orientierung noch zusätzlich. Zum Teil werden Lichtwellen von den Schwebeteilchen absorbiert, was zu einer raschen Helligkeitsabnahme mit zunehmender Wassertiefe führt.

Ein Teil der Lichtwellen wird aber auch von den Schwebeteilchen reflektiert. Dies führt zu einem ungerichteten, diffusen Streulicht unter Wasser, bewirkt eine Abnahme des Kontrastes Licht/Schatten und erschwert so zusätzlich die Orientierung.

Wärmehaushalt

Die **Wärmeenergie** wird in Ruhe zu ca. 70% im Körperkern produziert und zu ca. 17% in der Muskulatur. Bei körperlicher Arbeit oder bei Unterkühlung kann die Wärmeproduktion durch die Muskulatur vervielfacht werden ("*Kältezittern*").

Die **Wärmeabgabe** erfolgt über alle Oberflächen des Körpers, die mit der Außenluft in Verbindung stehen. Der Wärmeverlust über die Ausatemluft ist dabei nur von der Temperatur des eingeatmeten Gases abhängig und kann vom Körper nicht gesteuert werden.

Der Transport von Wärmeenergie zur Hautoberfläche erfolgt quer durch die Körperschichten

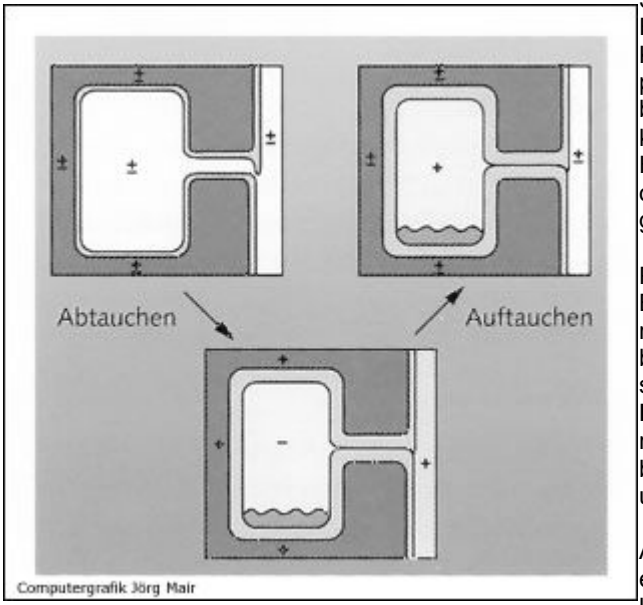
- Körperkern
- -> Muskulatur
- -> Unterhautfettgewebe
- -> Haut
- -> und durch den Blutkreislauf.

Durch die Veränderung der Durchblutung in den oberen Hautschichten kann die Wärmeabgabe

Copyright by Taucherwelt ©

gesteuert werden.

Nasennebenhöhlen



Als "**Barotrauma**" werden alle Schädigungen und Funktionsstörungen des Körpers bezeichnet, die durch physikalische Druckdifferenzen bedingt sind. **Barotraumen** können in allen gasgefüllten Hohlräumen auftreten, die ganz oder teilweise vom Körper gebildet werden.

Prinzipiell kann man Barotraumen mit einem relativen Unterdruck im betroffenen Hohlraum von sogenannten "**inversen Barotraumen**" mit einem relativen Überdruck im betroffenen Hohlraum unterscheiden.

Alle **Nasennebenhöhlen** haben eine ständig geöffnete, knöcherne Verbindung zum Nasenraum (s.u. Anatomie).

Nasennebenhöhlen und Verbindungsgänge sind mit Schleimhaut ausgekleidet. Bei Veränderungen des Umgebungsdrucks erfolgt der Druckausgleich in den Nasennebenhöhlen unter Normalbedingungen automatisch.

Kommt es zu einem **Verschluss des Verbindungsganges**, z.B. im Rahmen einer Erkältung oder durch einen Schleimhautpolypen, so kommt es bei Erhöhung des Umgebungsdrucks innerhalb der Nasennebenhöhle zu einem relativen Unterdruck. Dieser Unterdruck bewirkt eine Schwellung der Schleimhaut.

Reicht die Volumenverkleinerung der Höhle durch die angeschwollene Schleimhaut nicht aus, um einen Druckausgleich in der Nasennebenhöhle zu erreichen, so kann es zur Einblutung in der Nasennebenhöhle kommen, bis der Druckausgleich hergestellt ist.

Sinkt der Umgebungsdruck, so herrscht in der Nasennebenhöhle ggf. aufgrund der Schleimhautschwellung und der Einblutung ein relativer Überdruck. Durch den Überdruck in der Nasennebenhöhle kommt es meistens zu einer Überwindung der Schleimhautblockade mit anschließendem Druckausgleich.

Dabei kann das aus der Nasennebenhöhle austretende Blut auch ein kurzfristiges Nasenbluten bewirken.

Copyright by Taucherwelt ©

Inverses Barotrauma

Seltener als ein Barotrauma kann auch ein sogenanntes **"inverses Barotrauma" der Nasennebenhöhlen** auftreten.

Dies ist der Fall, wenn beim Abtauchen ein Druckausgleich in der Nasennebenhöhle erfolgen konnte, es dann aber mit zunehmender Tauchzeit und Unterkühlung des Körpers zu einer Schleimhautschwellung im Bereich des Nasennebenhöhlengangs kommt und so zum Verschluss des Hohlraums.

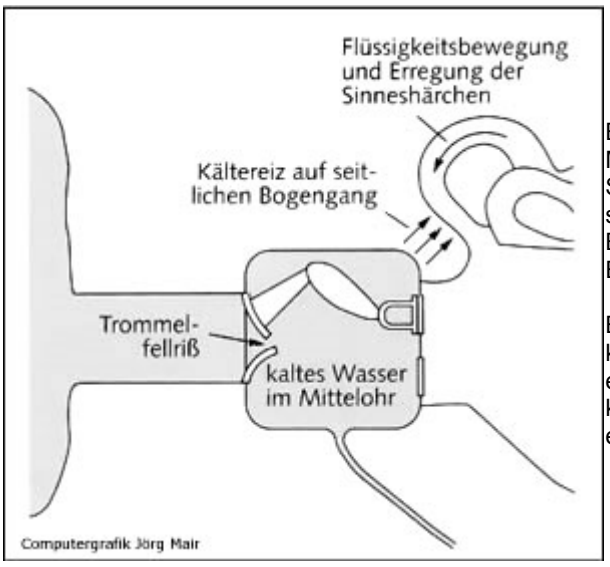
Beim Auftauchen besteht dann wie beim Barotrauma ein relativer Überdruck der Nasennebenhöhle, allerdings ohne eine massive Schleimhautschwellung und ohne Einblutung in die Nasennebenhöhle.

Mittelohr

Kommt es im Rahmen einer Erkältung zur Schleimhautschwellung im Bereich der *Eustachischen Röhre* oder wird ein korrekter Druckausgleich nicht rechtzeitig durchgeführt, so kann es wie in den übrigen Nasennebenhöhlen auch im Mittelohr zu einem Barotrauma durch relativen Unterdruck kommen.

Das **Mittelohr** ist wie die Nasenenbenhöhlen mit Schleimhaut ausgekleidet. Wie in den Nasennebenhöhlen kann es hier zu Schleimhautschwellung und Einblutung in den Hohlraum kommen. Als Besonderheit des Mittelohres sind jedoch bei einem Barotrauma auch das Trommelfell, das ovale Fenster und das runde Fenster betroffen.

Trommelfellriss



Bei zunehmendem Unterdruck im Mittelohr kommt es nicht nur zur Schwellung der Schleimhaut, sondern auch zur Erweiterung der Blutgefäße im Trommelfell, ggf. mit Einblutung in das Trommelfell.

Bei stärkeren Druckdifferenzen kann das Trommelfell auch einreißen und so beim Tauchen kaltes Wasser ins Mittelohr einströmen.

Inverses Barotrauma

Wie bei den Nasennebenhöhlen, so kann es auch im Mittelohr zu einem inversen Barotrauma kommen.

Diese relativ seltene Situation tritt auf, wenn **beim Abtauchen der Druckausgleich** über die Eustachische Röhre **noch problemlos möglich** war, es dann jedoch durch Reizung der Schleimhaut im Bereich der Eustachischen Röhre, z.B. beim mehrmaligem Abtauchen hintereinander oder bei Auskühlung durch lange Tauchzeiten in kaltem Wasser, zu einer Schwellung der Schleimhäute kommt.

Beim Auftauchen tritt als Folge ein relativer Überdruck im Mittelohr mit nach außen

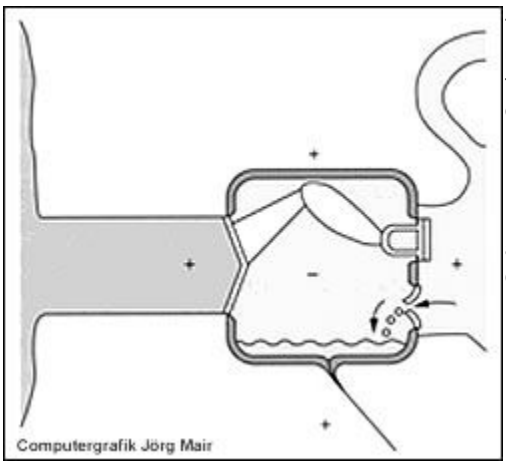
Copyright by Taucherwelt ©

gewölbtem Trommelfell oder im Extremfall ein **Trommelfellriss** auf.

Innenohr

Als flüssigkeitsgefülltes Organ kann das **Innenohr** definitionsgemäß eigentlich kein Barotrauma erleiden. Da es aber bei einem schweren Barotrauma des benachbarten Mittelohres zu einer Funktionsstörung von Innenohrstrukturen kommen kann, wird der zugrunde liegende Mechanismus allgemein als Innenohrbarotrauma bezeichnet.

Innenohrbarotrauma



Bei einer starken Auslenkung des Trommelfells in Richtung Mittelohr kommt es über die Gehörknöchelchenkette zu einem tiefen Einpressen der Steigbügelfußplatte in das ovale Fenster. Durch den steigenden Druck in der Innenohrflüssigkeit wird das runde Fenster in Richtung Mittelohr gewölbt.

Bei stärkeren Druckunterschieden kann es anstelle eines Trommelfellrisses auch zu einem Einriss der Membran des runden Fensters kommen.

Ein Verlust von Innenohrflüssigkeit ins Mittelohr und/oder ein Eindringen von Luft ins Innenohr mit nachfolgenden Funktionsstörungen des Innenohres ist die Folge.

Ein Einriss der Membran des ovalen Fensters ist relativ selten, da sie durch die Steigbügelfußplatte und durch Bindegewebe verstärkt ist.

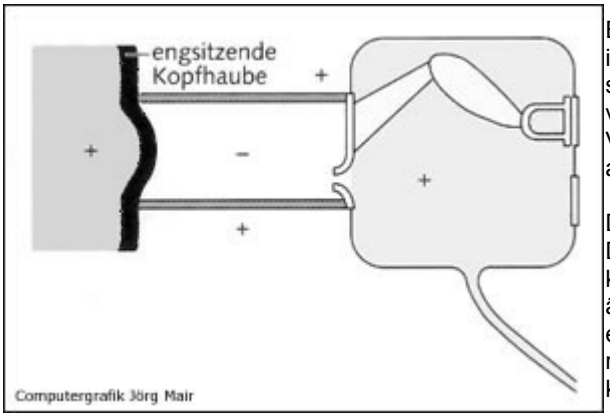
Vorbeugung

Wenn bei einem bestehenden Unterdruck im Mittelohr während des Abtauchens ein Druckausgleich mit dem Valsalva-Manöver durchgeführt wird, so sollte der Druckausgleich nicht erzwungen werden.

Während der Druckerhöhung im Nasen-Rachen-Raum durch das Valsalva-Manöver erhöht sich der Gewebedruck im gesamten Kopfbereich und damit auch der Druck der Innenohrflüssigkeit. Hierdurch wird der schon bestehende Druckunterschied zwischen Innenohrflüssigkeit und Mittelohrraum zusätzlich verstärkt und Gefahr des Einrisses der Rundfenstermembran vergrößert.

Copyright by Taucherwelt ©

Gehörgang



Ein **Barotrauma des Gehörgangs** ist äußerst selten und tritt nur bei sehr eng sitzenden Kopfhauben von Tauchanzügen oder bei Verwendung von Ohrenstöpseln auf.

Durch unzureichenden Druckausgleich im Gehörgang bei komplettem Verschluss der äußeren Gehörgangsöffnung kann es bei Druckerhöhung zu einem relativen Unterdruck im Gehörgang kommen.

Entsprechend der Situation in den Nasennebenhöhlen oder im Mittelohr schwillt in diesem Fall die Haut im Gehörgang an, um das Gehörgangsvolumen zu verringern und einen Druckausgleich zu erreichen. Auch das Trommelfell verlagert sich in Richtung Gehörgang um das Gehörgangsvolumen weiter zu verringern.

Wie beim Mittelohrbarotrauma kann auch beim Barotrauma des Gehörgangs das Trommelfell reissen, wenn der Unterdruck im Gehörgang sehr ausgeprägt ist.

Augen und Gesichtshaut

Da der Maskenraum einen abgeschlossenen Hohlraum darstellt, der zum Teil vom Körpergewebe gebildet wird, kann es auch hier zu einem Barotrauma kommen. Wird beim Abtauchen nicht regelmäßig Luft durch die Nase in den Maskenraum ausgeatmet, hat das einen zunehmenden Unterdruck im Maskenraum mit Sogwirkung auf das Körpergewebe zur Folge. Die im Gegensatz zur Gesichtshaut wesentlich empfindlichere Bindehaut des Auges (= *Augenweiß*) reagiert hier zuerst mit einer Erweiterung der Gefäße und dann mit einer Einblutung in die Bindehaut. Stärkere Druckunterschiede können auch zu Rötung und Anschwellung der Gesichtshaut führen.

Haut

Wird mit einem **Trockentauchanzug** getaucht, so kann eine dem Maskenbarotrauma vergleichbare Symptomatik an der gesamten Körperhaut auftreten. Wenn man bei zunehmender Tauchtiefe nicht ständig zusätzliche Luft in den Anzug gibt, legt sich der Trockentauchanzug ähnlich einer Vakuumverpackung sehr eng an den Körper an.

Dort, wo sich Falten gebildet haben, können dann durch Sogwirkung streifenförmige Hautschwellungen und Einblutungen entstehen.

Helmtaucher

Copyright by Taucherwelt ©

Das **Barotrauma des Helmtauchers** wurde früher auch als
"äußeres Blaukommen" bezeichnet und entspricht vom Entstehungsmechanismus her dem oben beschriebenen Barotrauma der Haut bei Trockentauchanzügen.

Bei Helmtauchern mit Tauchanzügen, die mit dem Helm fest verbunden sind und mit diesem eine geschlossene Einheit bilden, kann bei unzureichender Luftzufuhr mit zunehmender Tiefe ein Unterdruckbarotrauma im gesamten Kopfbereich entstehen.

Entsprechend der Symptomatik beim Maskenbarotrauma kann
hier eine Hautschwellung mit Einblutungen am gesamten Kopf
(= "Blaukommen") auftreten.

Unterdruckbarotrauma der Lunge

Schnorcheln

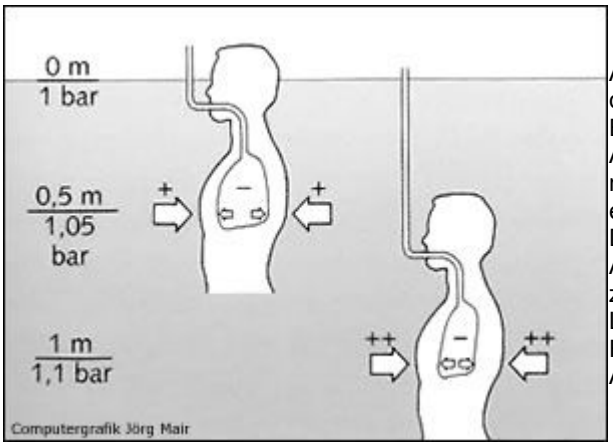
Atmet ein Taucher durch einen Schnorchel, dann herrscht **in seiner Lunge der atmosphärische Luftdruck**. Abhängig von seiner Lage im Wasser wirkt von außen auf den Brustkorb ein unterschiedlich hoher hydrostatischer Druck.

Befindet sich seine Lunge z.B. in 50 cm Wassertiefe, herrscht an der Grenzfläche zwischen Lungenalveole und Lungenkapillaren eine Druckdifferenz von 1 bar in der Alveole zu 1,05 bar im Körpergewebe.

Hierdurch kommt es 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 Blutfülle der Gefäße im Brustkorb.

Verlängert man den Schnorchel, um eine größere Tauchtiefe erreichen zu können, vergrößert man auch die oben beschriebene Druckdifferenz zwischen Lungenalveolen und Körpergewebe und verstärkt so die oben beschriebenen Effekte.

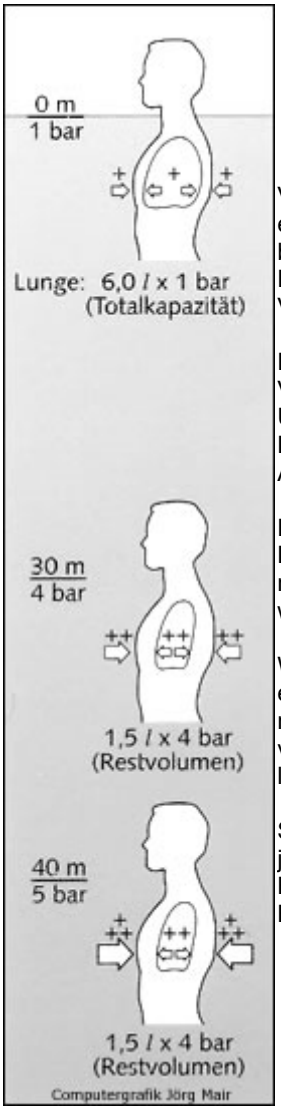


Ab etwa 0,1 bar Druckunterschied, d.h. in 1 m Wassertiefe, ist eine Einatmung durch die Atemmuskulatur nicht mehr möglich. Die Lunge befindet sich extremer Ausatemstellung, das Druckgefälle an den Alveolenwänden von 0,1 bar führt zu Schwellung des Lungengewebes und zur Flüssigkeitsansammlung in den Alveolen, zum **"Lungenödem"**.

Copyright by Taucherwelt ©

Durch den relativen Unterdruck im Brustkorb kann es außerdem zu einer Dehnung der Brustkorbgefäße mit einer vermehrten Blutfülle und zu einer Dehnung des Herzens mit der Gefahr von Herzschädigungen kommen.

Apnoetauchen



Versucht man mit angehaltenem Atem größere Wassertiefen zu erreichen, so muss an einen regelmäßigen Druckausgleich in beiden Mittelohren und in der Tauchmaske gedacht werden. Darüber hinaus muss aber auch berücksichtigt werden, dass das Volumen der Lunge nicht beliebig verringert werden kann.

Entsprechend dem **Gasgesetz von Boyle-Mariotte** wird sich das Volumen einer Lunge mit einer Totalkapazität von 6 l bei einem Umgebungsdruck von 4 bar, in 30 m Wassertiefe, auf ein Lungenvolumen von 1,5 l verkleinern. Damit ist die Ausatemstellung der Lunge erreicht.

Das verbleibende Volumen entspricht dem Residualvolumen der Lunge, das auch bei maximaler Dehnung des Zwerchfells und bei max. möglicher Verkleinerung des Brustkorbes nicht ausgeatmet werden kann.

Werden dennoch größere Wassertiefen aufgesucht, so besteht eine Druckdifferenz zwischen Körpergewebe und Lungenvolumen mit der gleichen Problematik, wie beim Atmen durch einen verlängerten Schnorchel. Der Weltrekord im Apnoe-Tieftauchen liegt zur Zeit bei über 120 m Wassertiefe.

Solche extremen Leistungen können jedoch nur durch jahrelanges Training erreicht werden, bei dem die Elastizität des Brustkorbs und des Zwerchfells sowie der Blutgefäße im Brustkorb vergrößert wird.

Helmtaucher

In Verbindung mit einem Barotrauma der Haut und des gesamten Kopfes (s.o.) kann es beim Helmtaucher auch zu einem Barotrauma der Lunge kommen (frühere Bezeichnung: "**Inneres Blaukommen**"). Da der Helmtaucher frei aus der Atmosphäre im Helm atmet, herrscht in der Lunge der gleiche (Unter-)Druck wie im Helm.

An der Grenzfläche Lungenalveole/Lungenkapillaren kommt es so zur gleichen Symptomatik wie beim Tauchen mit verlängertem Schnorchel oder beim Apnoe-Tauchen in extremen Tiefen.

Copyright by Taucherwelt ©

Lungenüberdehnung

Im Gegensatz zu den inversen Barotraumen der Nasen-Nebenhöhle und der Mitteohren, welche eher selten auftreten, gehört das **inverse Barotrauma der Lunge (= Lungenüberdehnung)** zu den **schwersten Taucherunfällen**.

Eine Lungenüberdehnung kann auftreten, wenn Atemgas unter erhöhtem Druck eingeatmet und während des Aufstiegs nicht wieder abgeatmet wird. **Eine Lungenüberdehnung kann folgende Ursachen haben**:

- ungenügende Ausatmung
- Stimmritzenverschluss
- "Air-Trapping"

Ungenügende Ausatmung während des Aufstiegs

Würde ein Taucher mit einer Totalkapazität der Lunge von 6 l in 40 m Tiefe voll einatmen und ohne auszuatmen auftauchen, so müßte entweder sein Lungenvolumen an der Oberfläche 30 l betragen oder aber das Lungengewebe einer Druckdifferenz von 4 bar standhalten (5 bar in der Lunge gegenüber 1 bar Umgebungsdruck).

Selbst wenn dieser Taucher in 40 m Tiefe maximal ausgeatmet hätte, würde sich die Lunge bis zur Oberfläche gemäß Boyle-Mariotte auf 7,5 l ausdehnen, oder bei 6 l Lungenvolumen eine Druckdifferenz von 0,25 bar standhalten.

Versuche haben jedoch gezeigt, dass es in der Lunge bereits ab einem Überdruck von 0,1 bar (= 1 m Wassersäule) gegenüber dem umliegenden Gewebe zu einer Überdehnung und zum Zerreißen von Lungengewebe kommen kann. **Beim Auftauchen unter Pressluftatmung muss daher kontinuierlich ein- und ausgeatmet werden**.

Sobald unter Wasser auch nur ein einziger Atemzug aus einem Tauchgerät geatmet wurde, muss während des Aufstiegs ständig ausgeatmet werden. Die Forderung nach ständiger Ausatmung gilt insbesondere für schnelle Notaufstiege.

Stimmritzenverschluss

Die im Kehlkopf gelegenen Stimmbänder können sich krampfartig zusammenziehen und die Stimmritze verschließen, weiteres Atmen ist dann nicht mehr möglich.

Ursache für einen Stimmritzenverschluss kann eine Panik unter Wasser oder der Kontakt der Stimmritze mit kaltem Wasser sein. Bei vorhandenem Stimmritzenverschluss kommt es während des Auftauchens eher zum Zerreißen von Lungengewebe als zur Öffnung des Stimmritzenverschlusses durch den entstehenden Überdruck in der Lunge.

Air-Trapping

Akute Entzündungen mit Schleimhautschwellung oder narbige Veränderungen der Lunge durch überwundene Krankheiten können in den Bronchiolen kleinerer Lungenabschnitte Engstellen verursachen. Diese **Atemwegsverengungen** stellen für die Luft aus diesem Lungenabschnitt ein **Strömungshindernis** dar.

Trotz insgesamt normaler Ausatmung führt dies zu einer verringerten Ausatemgeschwindigkeit aus diesem Lungenbereich und kann bildlich gesprochen zur **"Fesselung von Luft**", engl.: *Air-Trapping*, führen. Hierdurch kann in dem betroffenen Lungenabschnitt während des Auftauchens ein vorübergehender Überdruck entstehen, der zu einer begrenzten Überdehnung der Lunge und evtl. zum Zerreißen von Lungengewebe führt.

Copyright by Taucherwelt ©

Zähne

Zu einem **Barotrauma der Zähne** kommt es nur, wenn sich in diesem Bereich eine abgeschlossene Gasmenge befindet. Dies kann bei alten Amalgamfüllungen mit einer Randspaltbildung oder bei einer sehr ausgeprägten Karies der Fall sein.

Beim Auftauchen kann es entsprechend einem inversen Barotrauma der Nasennebenhöhlen zu einem Verschluss der freien Verbindung zur Mundhöhle kommen und damit zu einem relativen Überdruck im Hohlraum.

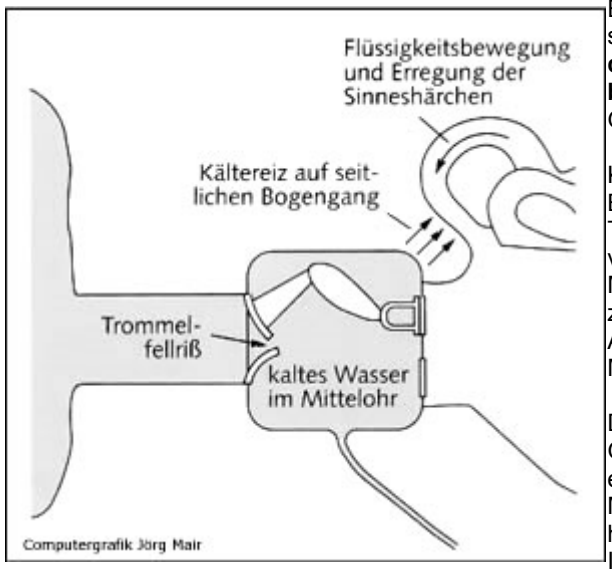
Magen-Darm-Trakt

Prinzipiell kann an **jeder Stelle des Verdauungstraktes** vom Magen bis zum Dickdarm ein **inverses Barotrauma** auftreten, insgesamt sind diese Barotraumen jedoch selten. Eine Überdehnung des Magens ist möglich, wenn unter Druck vermehrt Luft geschluckt wird, z.B. bei erzwungenem Druckausgleich mit dem Valsalva-Manöver.

Im Bereich des Darmes kann es besonders nach dem Genuss blähender Speisen zur Gasentwicklung während des Tauchgangs kommen. Kommt es im Bereich des Darms bei vorbestehenden Verwachsungen nach Operationen oder bei einem Leistenbruch zu einer Abschnürung abgeschlossener Gasmengen, so kann diese beim Auftauchen zur Gewebeüberdehnung und zur Gewebezerreißung führen.

Kalorischer Schwindel

Durch verschiedene Störungsmöglichkeiten des Gleichgewichtsorgans kann es zu einem Drehschwindel, lat.: *Vertigo*, und in der Folge zu Überkeit oder sogar Erbrechen kommen. Die häufigsten Schwindelursachen beim Tauchen sind hier kurz dargestellt.



Eine mögliche Ursache des sogenannten "*kalorischen*", d.h. **durch Temperaturunterschiede bedingten, Schwindels** ist in der Grafik 22 dargestellt.

Kommt es bei einem Mittelohr-Barotrauma zum Einriss des Trommelfells und damit zum Eintritt von kaltem Wasser in das Mittelohr, so führt das kalte Wasser zu einer vorübergehenden Abkühlung im Bereich des Mittelohres.

Da der seitliche Bogengang des Gleichgewichtsorgans nur durch einen dünnen Knochen vom Mittelohr getrennt ist, kommt es hier auch zu einer Abkühlung der Innenohrflüssigkeit im Bogengang.

Die abgekühlte, physikalisch schwerere Innenohrflüssigkeit sinkt ab und führt so zu einer Flüssigkeitsbewegung im seitlichen Bogengang, die von Nervensystem als Drehbewegung des Körpers interpretiert wird.

Copyright by Taucherwelt ©

Nach Erwärmung des eingedrungenen Wassers verschwindet der Drehschwindel jedoch wieder innerhalb weniger Minuten.

Alternobarer Schwindel

Ein durch **Druckunterschiede bedingter Schwindel**, lat.: *alternobare Vertigo*, kann sowohl in der Kompressionsphase als auch in der Dekompressionsphase eines Tauchgangs auftreten.

Hat ein Taucher während des Abtauchens auf einem Ohr Druckausgleichsprobleme mit Verlagerung von Steigbügelfußplatte und Rundfenstermembran (s.o.), kann es durch die unterschiedlichen Druckverhältnisse in beiden Gleichgewichtsorganen wie beim oben beschriebenen einseitigen Kaltwasserreiz zu Drehschwindel und evtl. weiteren Begleitsymptomen kommen.

Auch in der Auftauchphase ist bei einem einseitigen inversen Barotrauma des Mittelohres durch die unterschiedlichen Druckverhältnisse in beiden Innenohren eine entsprechende Symptomatik möglich.

Wird bei einem Mittelohr-Barotrauma versucht, den Druckausgleich im betroffenen Ohr mit einem kräftigen Valsalva-Manöver zu erzwingen, so kann dies zu einer Erhöhung des Drucks im gesamten Kopfbereich und damit zu einer Verstärkung der Druckunterschiede im betroffenen Ohr führen. Möglicherweise tritt ein Drehschwindel erst dann auf, wenn ein kräftiges Valsalva-Manöver durchgeführt wird.

Innenohr-Barotrauma

Im Rahmen eines **Innenohr-Barotraumas mit Verlust von Innenohrflüssigkeit ins Mittelohr** kann es neben der oben bereits beschriebenen Schwerhörigkeit auch zu Drehschwindel kommen.

Die Funktion der Sinneszellen von Hörorgan und Gleichgewichtsorgan sind in gleicher Weise abhängig von einer ausreichenden Versorgung mit Nährstoffen und Sauerstoff durch die Innenohrflüssigkeit.

Innenohr-Dekompressionskrankheit

Im Vorgriff auf das Kapitel Unfälle/Notfälle soll hier nur kurz angesprochen werden, dass eine Dekompressionskrankheit (= DCS) mit Symptomen ausschließlich im Bereich der Innenohren **beim Sporttauchen mit Pressluft eine Rarität** darstellt.

Häufiger tritt die **isolierte Innenohr-Dekompressionskrankheit** allerdings bei Sättigungstauchgängen mit Helium-Gasgemischen auf. Bereits während der Dekompressionsphase können hier Gasblasen in der Innenohrflüssigkeit entstehen.

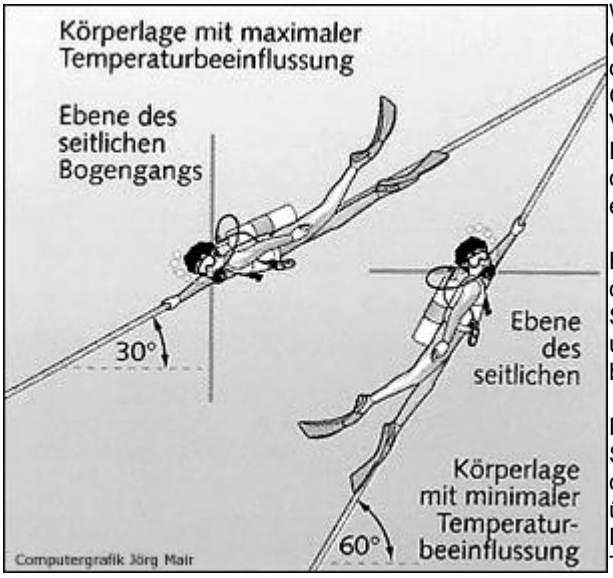
Hierdurch kommt es zu Funktionsstörungen der Haarzellen in der Schnecke und der sensiblen Nervenzellen im Gleichgewichtsorgan mit Drehschwindel, Übelkeit etc.

Copyright by Taucherwelt ©

Idiopathischer Schwindel

Als "**idiopathisch**" bezeichnet man die Fälle von Drehschwindel, bei denen keiner der oben genannten Ursachen für eine Funktionsstörung des Gleichgewichtsorgans gefunden wurde.

In der Tat gibt es Funktionsstörungen des Gleichgewichtsorgans, die unter normalen Umgebungsbedingungen überhaupt nicht auffällig werden, da die Fehlfunktion durch die ergänzenden Orientierungsmöglichkeiten des Sehorgans und der Haltemuskulatur kompensiert werden.



Fallen diese Informationen unter Wasser bei schlechter Sicht und Gewichtslosigkeit weg, muss sich der Mensch weitgehend auf seine Gleichgewichtsorgane verlassen. Vorbestehende, einseitige Funktionsstörungen können in dieser Situation zum Auftreten eines Drehschwindels führen.

Besonders empfindlich reagieren die seitlichen Bogengänge wenn Sie senkrecht stehen, besonders unempfindlich sind sie dagegen bei horizontaler Lage.

Dieser Umstand kann zu der Situation führen, dass ein Taucher, der beim waagerechten Tauchen über einen ebenen Grund einen Drehschwindel bemerkt und den Tauchgang deshalb abbricht, schon kurz darauf

Während des Auftauchens (bei horizontaler Lage des seitlichen Bogengangs) jedoch gar keinen Drehschwindel mehr verspürt.

Tiefenrausch

Als "**Tiefenrausch**" oder **Stickstoff-Vergiftung** bezeichnet man beim Tauchen mit Pressluft die Nervenfunktionsstörungen durch den zunehmenden N2-Teildruck in größeren Wassertiefen. Eine solche N2-Vergiftung kann bei Teildrücken ab ca. 3,2 bar auftreten.

Wird unter Wasser Pressluft geatmet, so entspricht dies einer Tauchtiefe von 30 m.

Auftreten

Die Empfindlichkeit für das Auftreten von Symptomen ist von Mensch zu Mensch sehr unterschiedlich. Auch bei derselben Person gibt es von Tag zu Tag erhebliche Schwankungen in der Anfälligkeit für eine N2-Vergiftung. Verschiedene Faktoren können das Auftreten eines Tiefenrausches begünstigen.

Die Reihe dieser Risikofaktoren ist lang und trotz Beachtung aller Faktoren kann ein Tiefenrausch nie sicher ausgeschlossen werden.

Wirkung

Stickstoff wirkt beim Menschen ähnlich wie ein Narkosegas, nur wesentlich schwächer. Die Anfangsstadien dieser Stickstoff-Narkose sind einem Alkohol- oder LSD-Rausch vergleichbar. Die möglichen Symptome werden oft vom betroffenen Taucher selbst überhaupt nicht wahrgenommen.

In der Regel fällt der Tiefenrausch zuerst seinem Tauchpartner durch ungewöhnliches Verhalten auf.

Copyright by Taucherwelt ©

Wird mit Gasgemischen getaucht, die durch Mischung von Pressluft und O2 einen insgesamt reduzierten N2-Anteil haben, so kommt es entsprechend dem N2-Teildruck erst in größeren Tauchtiefen zu Tiefenrausch-Symptomen. ("*Enriched-Air-Diving" oder "Nitrox-Tauchen*")

Ursache

Die wahrscheinlichste Hypothese über die Ursache des Tiefenrausches erklärt die narkotische Wirkung des N2 damit, dass sich dieses sehr gut fettlösliche Gas in den fetthaltigen Teilen der Zellmembran löst und, bildlich gesprochen, zu einer "Aufquellung" der Membran führt.

An den "*Synapsen*", Verbindungsstellen zwischen Nervenzellen, über welche die Nervenimpulse weitergegeben werden, kann eine solche "Aufquellung" zu einer Verzögerung der Impulsweitergabe zur nächsten Nervenzelle führen.

Vergleicht man verschiedene Inertgase, d.h. Gase ohne chemische Veränderungen und Reaktionen im Stoffwechsel, so stellt man einen direkten Zusammenhang zwischen ihrer relativen Narkosewirkung und ihrer Fettlöslichkeit fest.

Nimmt man die relative Narkosewirkung von N2 mit 1 an, so ist die relative Narkosewirkung von He (=Helium) kleiner als 1/4, die Narkosewirkung von Ar (= Argon) aber fast 2 1/2-mal so groß wie die von N2. Ein Vergleich der Bunsen'schen Löslichkeitskoeffizienten in Öl bei 37° C zeigt, dass die Gase mit der größeren Narkosewirkung eine bessere Fettlöslichkeit besitzen als die Gase mit einer geringeren Narkosewirkung.

CO2-Anstieg im Atemgas

Für die Entstehung einer **CO2-Vergiftung** gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten:

- Entweder ist der CO2-Teildruck in der Einatemluft erhöht (Norm: 0,3 mbar bei 1 bar Luftdruck)
- oder es erfolgt eine unzureichende Abatmung des vom Körper produzierten CO2.

Schnorchelverlängerung

Zusätzlich zu den bereits besprochenen Problemen der Schnorchelverlängerung (s.o.: Barotrauma der Lunge beim Schnorcheln) kommt es zu einer CO2-Anreicherung in der Einatemluft, wenn der physiologische Totraum der Atemwege von 150 ml durch einen langen Schnorchel unzulässig vergrößert wird.

In dieser Situation muss zunächst eine große Menge CO2-reicher Ausatemluft wieder eingeatmet werden, bevor "frisches" Atemgas die Lungenalveolen erreicht.

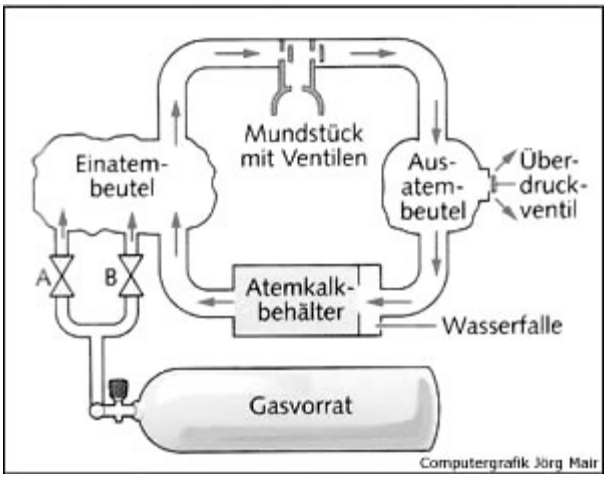
Zu geringer Luftaustausch beim Helmtaucher

Ältere Helmtauchgeräte werden über eine Schlauchleitung mit einem konstanten Luftstrom versorgt, der in Abhängigkeit von Tiefe und Arbeitsleistung geregelt werden kann. Bei geringer Luftzufuhr und hohem Luftverbrauch kann es in Helm und Anzug zur CO2-Anreicherung kommen.

Bedienungsfehler von Kreislaufgeräten

In Grafik 24 ist das Funktionsprinzip eines Kreislaufgerätes für Mischgase oder reinen Sauerstoff dargestellt. Bei solchen Tauchgeräten kommt es zum Anstieg des CO2-Teildruckes im Kreislauf, wenn der Atemkalk verbraucht ist, nass geworden ist, oder die Atemkalkpatrone nicht vollständig gefüllt wurde.

Copyright by Taucherwelt ©



- Atemkalk hat nur eine begrenzte Aufnahmekapazität für CO2, daher muss bei jedem Tauchgang bzw. bei jedem Wechsel der Gasflaschen auch die Atemkalkpatrone neu befüllt werden.
- Wenn Atemkalk nass wird, verliert er seine Fähigkeit, CO2 zu binden und verhält sich wie verbrauchter Atemkalk.
- Wenn die Kalkpatrone nicht vollständig gefüllt wird, besteht die Gefahr einer Kanalbildung zwischen Eingang und Ausgang der Patrone.
- Das CO2 kann dann vom Atemkalk nicht aus dem Kreislauf entfernt werden und gelangt wieder zur Einatmung.

Unzureichende CO2-Abatmung

Angst und Erschöpfung

Eine durch Angst ausgelöste, schnelle und flache Atmung kann zu einer ungenügenden Abatmung des CO2 führen. Bei körperlicher Erschöpfung kann die Atmung ggf. der Belastung und der CO2-Produktion nicht mehr angepasst sein und zum gleichen Ergebnis führen.

Gasdichte

Die mit zunehmender Tauchtiefe erhöhte Atemgasdichte und der dadurch bedingte erhöhte Atemwiderstand verstärkt diese Mechanismen. Die genannten Ursachen bewirken eine schnelle, flache Atmung, die dann zu einen CO2-Rückstau in der Lunge führt. Wie die CO2-Anreicherung im Einatemgas, so führt auch der CO2-Rückstau zum Anstieg des CO2-Teildrucks im Blut.

Sparatmung

Auch bewusstes "*Luftsparen*" beim Tauchen oder häufiges, längeres Luftanhalten z. B. beim Unterwasser-Fotografieren und bei Unterwasser-Videoaufnahmen können zu einer Erhöhung des CO2-Teildrucks im Blut beitragen. Man sollte sich bemühen, in allen Situationen unter Wasser möglichst regelmäßig durchzuatmen.

Wer weniger Luft verbraucht, qualifiziert sich dadurch nicht unbedingt als besserer Taucher sondern bezahlt seinen falschen Ehrgeiz womöglich mit stundenlangen Kopfschmerzen nach dem Tauchgang als Resultat des erhöhten CO2-Teildrucks.

Essoufflément

Dieser französische Ausdruck für "*außer Atem sein*" bezeichnet eine Form der CO2-Vergiftung, die besonders in größeren Wassertiefen auftritt, wenn dort entweder schwere Arbeit verrichtet wird oder größere Schwimmstrecken zurückgelegt werden.

Durch die Tauchausrüstung (Neopren-Anzug, Begurtung, Stabilizing-Jacket oder Rettungs-

Copyright by Taucherwelt ©

und Tarierweste) ist die Atmung tiefenunabhängig ohnehin bereits eingeschränkt. Ab Wassertiefen von etwa 40 m kommt es durch die erhöhte Atemgasdichte zu einer zusätzlichen Belastung der Atemmuskulatur, wenn über längere Zeit eine erhöhte Atemfrequenz und Atemtiefe erforderlich ist.

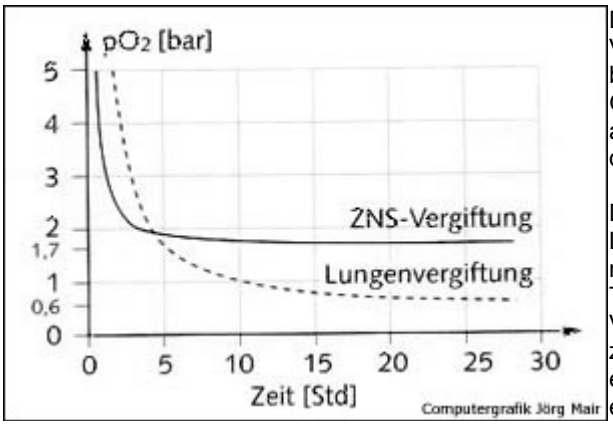
Eine kraftsparende, aber zu flache oder zu langsame Atmung führt dann zu einer zunehmenden Erhöhung des CO2-Teildrucks im arteriellen Blut, da das produzierte CO2 nicht ausreichend abgeatmet werden kann. Bei den ersten Anzeichen des "außer Atem seins" sollte das Streckenschwimmen oder die Arbeit sofort eingestellt und eine deutlich geringere Wassertiefe aufgesucht werden.

Hier sollte dann bewusst tief durchgeatmet werden.

O2-Vergiftung

Auftreten

Bei einem zu hohen Teildruck ist O2 für alle Körpergewebe giftig. Am empfindlichsten reagieren die Lungen und das zentrale Nervensystem.



Das Auftreten von Vergiftungssymptomen dieser beiden Gewebe stellt daher die Grenze der O2-Verträglichkeit dar, abhängig vom O2-Teildruck und der Expositionszeit.

Die Vergiftung des Lungengewebes entwickelt sich relativ langsam ab einem O2-Teildruck von 0,5 bar. Vergiftungssymptome des zentralen Nervensystems entstehen schneller, jedoch erst ab einem O2-Teildruck über 1,7 bar.

Für die im Sporttauchen auftretenden relativ kurzen Expositionszeiten steht die **O2-Vergiftung des zentralen Nervensystems** eindeutig im Vordergrund, bei längeren Expositionen mit niedrigerem O2-Teildruck, z.B. bei Druckkammerbehandlungen, sind die Lungenveränderungen der begrenzende Faktor der Verträglichkeit.

Anfälligkeit

Ähnlich der Situation beim Tiefenrausch gibt es auch bei der O2-Vergiftung große Unterschiede in der Anfälligkeit zwischen verschiedenen Personen und bei derselben Person von Tag zu Tag.

Verschiedene Faktoren können die Empfindlichkeit für eine O2-Vergiftung erhöhen, jedoch gibt es trotzdem keine sichere Vorhersage für das Auftreten einer Vergiftung. Bei

- körperlicher Belastung,
- schlechter Tagesform,
- erhöhter Körpertemperatur (Fieber) und bei
- Einnahme bestimmter Medikamente (z.B. Cortison)

können die o.g. Grenzwerte für das Auftreten einer O2-Vergiftung unterschritten werden.

Presslufttauchen

Copyright by Taucherwelt ©

Für das Tauchen mit Pressluft hat die O2-Vergiftung keine praktische Bedeutung. Der erst nach mehreren Stunden kritische Grenzwert von 1,7 bar O2-Teildruck bei Pressluftatmung in Wassertiefen über 80 m erreicht. Derartige Tauchzeiten und Tiefen sind für einen Taucher mit Pressluft kaum erreichbar.

Abgesehen von der Problematik der Luftversorgung und der Auskühlung hindert ihn daran schon in 30 bis 40 Meter Wassertiefe der Tiefenrausch, die erhöhte Atemgasdichte (Essoufflément) und das deutlich erhöhte Risiko einer Dekompressionskrankheit.

Mischgastauchen

Beim Mischgastauchen mit erhöhtem O2-Anteil des Atemgases oder gar beim Tauchen mit O2-Kreislaufgeräten (100% Sauerstoff) besteht das Risiko einer **O2-Vergiftung** schon in wesentlich geringeren Tiefen, bei Verwendung eines O2-Kreislaufgerätes z.B. **bereits ab 7 m Wassertiefe**. Generell ist beim Tauchen mit erhöhtem O2-Anteil im Atemgas die Verwendung einer Vollgesichtsmaske zu empfehlen.

Pressluft-Tauchgeräte

Beim Tauchen mit Mischgas und 100% O2 kann es in bestimmten Situationen zu O2-Mangelerscheinungen kommen:

- Ein verbrauchter Gasvorrat kann bei Mischgas-Kreislaufgeräten zu der Situation führen, dass der O2-Gehalt im Gemisch ständig weiter abnimmt, während das nicht verbrauchte Inertgas weiter zirkuliert und dem Taucher ein funktionstüchtiges Gerät vortäuscht.

Kreislauf-Tauchgeräte

- Bei **Mischgastauchgeräten** mit einer (einstellbaren) Konstantdosierung des Atemgases kann es durch falsche Kombination eines relativ O2-armen Gasgemisches mit einer zu geringen Dosierung besonders im Flachwasserbereich zu einem unzulässigen Absinken des O2-Teildrucks im Kreislauf kommen.
- **O2-Kreislaufgeräte** arbeiten nur dann sicher, wenn sich in dem geschlossenen Kreislauf, zu dem auch die Lunge zählt, nur O2 und CO2 befinden. Ist im Kreislauf auch Inertgas vorhanden, so besteht bei lungenautomatgesteuerter O2-Zufuhr die Gefahr eines O2-Mangels durch einen reinen Inertgaskreislauf.

Bei einer gleichbleibend flachen Atmung würde in diesem Fall die O2-Zuführungseinrichtung trotz eines stetigen O2-Verbrauchs im Kreislauf nicht ansprechen, da immer ein (Inert-)Gasvolumen im Kreislauf vorhanden bleibt.

Um beim Anlegen eines O2-Kreislaufgerätes das normalerweise in der Lunge vorhanden N2 zu entfernen, atmet der Taucher zunächst mehrmals tief aus dem Gerät ein (100% O2) und atmet in die Umgebung und nicht in den Kreislauf wieder aus (sogenannte "**Voratmung**").

Ist das N2 auf diese Weise aus der Lunge "*ausgewaschen*", atmet der Taucher nach den ersten Atemzügen auch in das Gerät aus und schließt so den Kreislauf.

Weil im Körper auch vor Beginn eines Tauchgangs N2 unter Umgebungsdruck gelöst ist, diffundiert bei einer reinen O2-Atmung aufgrund des Diffusionsgradienten N2 aus Blut und Körpergeweben in die Lunge und damit in den geschlossenen Gerätekreislauf.

Auf diese Weise kann nach einiger Zeit der Atmung aus einem O2-Kreislaufgerät

Copyright by Taucherwelt ©

die gleiche Problematik entstehen, die auch bei einer ungenügenden Voratmung auftritt. Durch Wiederholung der "Voratmung" nach einer bestimmten Tauchzeit lässt sich diese Gefahr ausräumen.

Die hier beschriebene Problematik trifft prinzipiell auf alle Kreislaufgeräte zu. Die erwähnten Maßnahmen (Voratmung und Wiederholung der Voratmung) sind daher bei Verwendung aller halbgeschlossenen und geschlossenen Mischgastauchgeräte durchzuführen.

Schnorcheln

Beim Schnorcheln kann es zu einem O2-Mangel kommen, wenn der **Schnorchel zu lang** ist. Überschreitet das Volumen des Schnorchels das normale Atemzugvolumen, so kommt es zur sogenannten "*Pendelatmung*".

Mit **Pendelatmung** bezeichnet man eine Atmung, bei der kein Gasaustausch zwischen der Umgebungsluft und der Luft in den Lungenalveolen stattfindet, da immer nur die CO2-reiche Ausatemluft durch die (eventuell künstlich verlängerten) Atemwege hin- und herbewegt wird.

Dabei verringert sich mit jedem Atemzug der Sauerstoffanteil der Alveolarluft.

Schwimmbad-Blackout

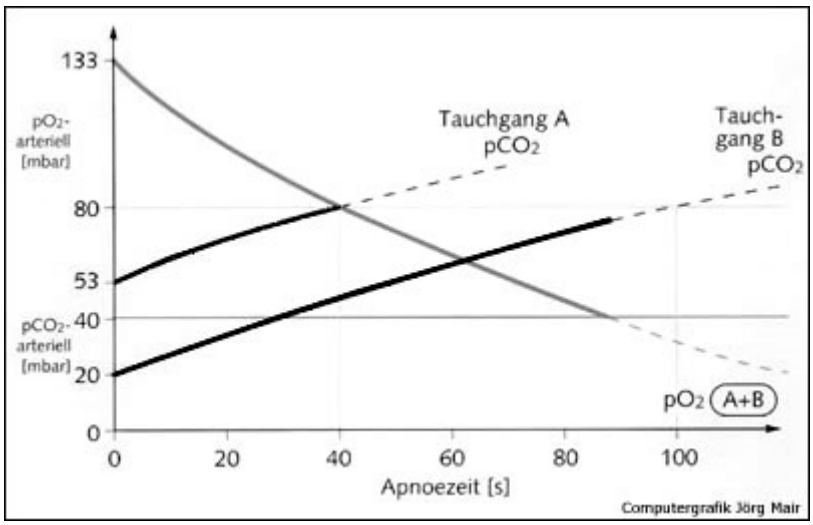
Beim **Apnoetauchen** unterscheidet man zwei verschiedene Entstehungsmechanismen für einen O2-Mangel, denen man wegen der charakteristischen Verläufe eigene Namen gegeben hat.

- Beim Streckentauchen kann es zum "**Schwimmbad-Blackout**" kommen,
- beim Tieftauchen zu einem "**Aufstiegs-Blackout**", früher auch als "*Flachwasser-Ohnmacht*" bezeichnet.

Als **Schwimmbad-Blackout** bezeichnet man eine Bewusstlosigkeit, die während des Streckentauchens ohne Warnsymptome durch plötzlichen O2-Mangel des zentralen Nervensystems auftritt.

Der Schwimmbad-Blackout tritt häufig nach einer Hyperventilation vor dem Tauchversuch auf, jedoch ist er bei trainierten Tauchern auch ohne Hyperventilation möglich.

Copyright by Taucherwelt ©



In Grafik 16a sind die Teildrücke von O2 und CO2 im arteriellen Blut in Abhängigkeit von der Tauchzeit dargestellt.

Als Beispiel sind hier ein Apnoe-Streckentauchversuch ohne vorherige Hyperventilation (Tauchgang A) und einer mit vorheriger Hyperventilation (Tauchgang B) dargestellt.

- Der arterielle O2-Teildruck beträgt zu Beginn des Streckentauchens ca. 133 mbar, unabhängig von einer eventuell durchgeführten Hyperventilation.
- Während des Atemanhaltens verbraucht der Körper ständig O2, ohne dass über die Atemwege weiter O2 in die Lunge gelangen kann. Der O2-Teildruck in der Lunge und der arterielle O2-Teildruck fallen kontinuierlich ab, bis der Atemreiz zum Auftauchen zwingt oder der Taucher ab ca. 40 mbar O2-Teildruck im arteriellen Blut bewusstlos wird und zu Ertrinken droht.
- Neben dem schwächeren Atemreiz O2-Mangel sorgt hauptsächlich der arterielle CO2-Teildruck für eine rechtzeitige Stimulierung der Atmung.
- Durch die fehlende Abatmung während des Apnoetauchgangs steigt der CO2-Teildruck im arteriellen Blut ausgehend vom Normalwert von 53 mbar kontinuierlich an, bis ab ca. 80 mbar der Atemreiz nicht mehr zu unterdrücken ist.
- Zu diesem Zeitpunkt (nach 40 sek. Apnoe) beträgt der O2-Teildruck im arteriellen Blut noch 80 mbar und es besteht keine Gefahr eines O2-Mangels (Tauchgang A).
- Wurde vor dem Atemanhalten hyperventiliert, so kann der CO2-Teildruck im arteriellen Blut bei Beginn des Streckentauchens bis auf 20 mbar gesenkt werden.
- Dies hat zur Folge, dass der CO2-Teildruck im arteriellen Blut wegen der unveränderten CO2-Produktion erst viel später zu einem starken Atemreiz führt und die Gefahr eines O2-Mangels ohne Warnsymptome für den Taucher besteht.

Im Beispieltauchgang B wird der Taucher *nach ca. 90 Sek. bewusstlos*, da hier die kritische 40 mbar Grenze für die O2-Versorgung des zentralen Nervensystems unterschritten wird. In diesem Beispiel wäre der arterielle CO2-Teildruck erst nach ca. 100 Sek. so weit angestiegen, dass er zum Tauchgangsabbruch durch unüberwindlichen Atemreiz geführt hätte (bei 80 mbar).

Die in der Grafik gezeigten Grenzwerte sind idealisiert. Die Toleranz hoher CO2-Teildrücke ist individuell sehr verschieden und bei trainierten Tauchern ausgeprägter als bei Anfängern. Dies führt bei trainierten Taucher zu einer Gefährdung durch einen "Schwimmbad-*Blackout*" auch ohne vorherige Hyperventilation.
Aus diesem Grund muss jeder Streckentauchversuch individuell überwacht

Copyright by Taucherwelt ©

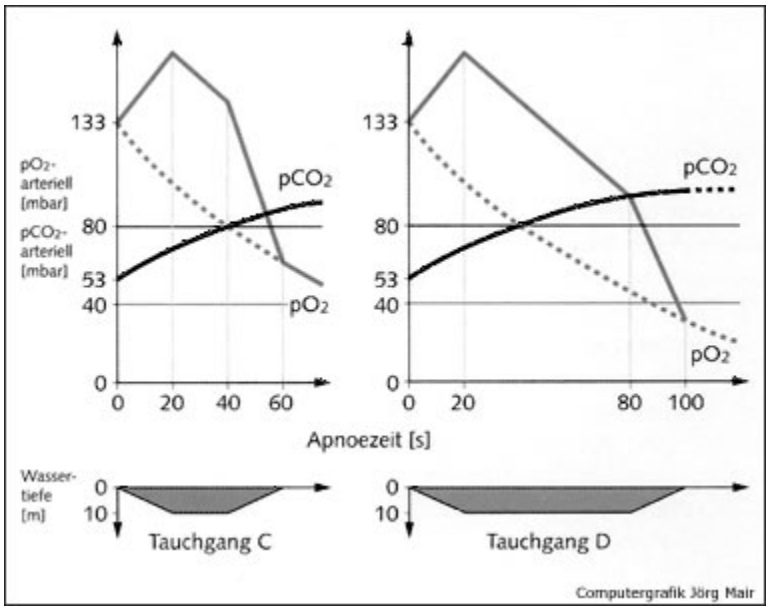
werden.

Apnoe-Tieftauchen

Eine Bewusstlosigkeit, die während der Auftauchphase eines **Apnoe-Tieftauchgangs** in geringer Wassertiefe ohne Warnsymptome durch plötzlichen O2-Mangel des zentralen Nervensystems auftritt, nennt man "**Aufstiegs-Blackout**".

Die frühere Bezeichnung "*Flachwasser-Ohnmacht*" wird nicht mehr verwendet, da sie zu Verwechslungen mit anderen Krankheitsbildern führen kann. Hyperventilation (s. unter Physiologie: Atemsteuerung) ist keine zwingende Voraussetzung für das Auftreten eines Aufstiegs-Blackouts.

In Grafik 16b sind zwei unterschiedlich lange Tauchgänge mit der gleichen Tauchtiefe von 10 m dargestellt (Tauchgang C und D). Die Darstellung entspricht Grafik 16a, zusätzlich ist hier lediglich das Tiefenprofil des jeweiligen Apnoe-Tauchganges angegeben.



Während des Auftauchens nimmt der Atemreiz durch den schnell sinkenden O2-Teildruck bei weiter steigendem CO2-Teildruck rasch zu.

Der arterielle O2-Teildruck ist bei Erreichen der Wasseroberfläche noch ausreichend hoch. Der Aufstieg wurde bei Tauchgang C begonnen, obwohl in 10 m Wassertiefe noch kein starker Atemreiz bestand.

Bei Apnoe-Tieftauchgängen darf mit dem Auftauchen nie bis zum Atemreiz gewartet werden. Bleibt der Taucher in 10 m Tiefe bis er einen starken Atemreiz verspürt, so besteht während des Aufstiegs durch den rasch abnehmenden O2-Teildruck die Gefahr eines akuten O2-Mangels.

In diesem Beispiel wird der Taucher nach ca. 90 Sek. kurz vor Erreichen der Oberfläche (im "Flachwasser") bewusstlos.

Derartige Unfälle sind selbst im Hallenbad mit wenigen Metern Wassertiefe möglich, daher **muss jeder derartige Tauchversuch sorgfältig überwacht werden**. Bei Bewusstlosigkeit ist der Verunfallte sofort aus dem Wasser zu bergen

Copyright by Taucherwelt ©

und entsprechend den Regeln der Ersten Hilfe zu versorgen.

Warnsymptome

Alle hier beschriebenen Mechanismen beim Gerätetauchen und Schnorcheln können zu niedrigen O2-Teildrücken und damit zu O2-Mangelsymptomen führen. Bei einer langsameren Abnahme des O2-Teildrucks können ab einem Teildruck von 0,17 bar verschiedene Warnsymptome auftreten.

Bei einem schnelleren O2-Teildruckabfall kann auch ohne erkennbare Warnsymptome schlagartig Bewusstlosigkeit einsetzten.

Inertgas-Sättigung

Vor dem Tauchgang

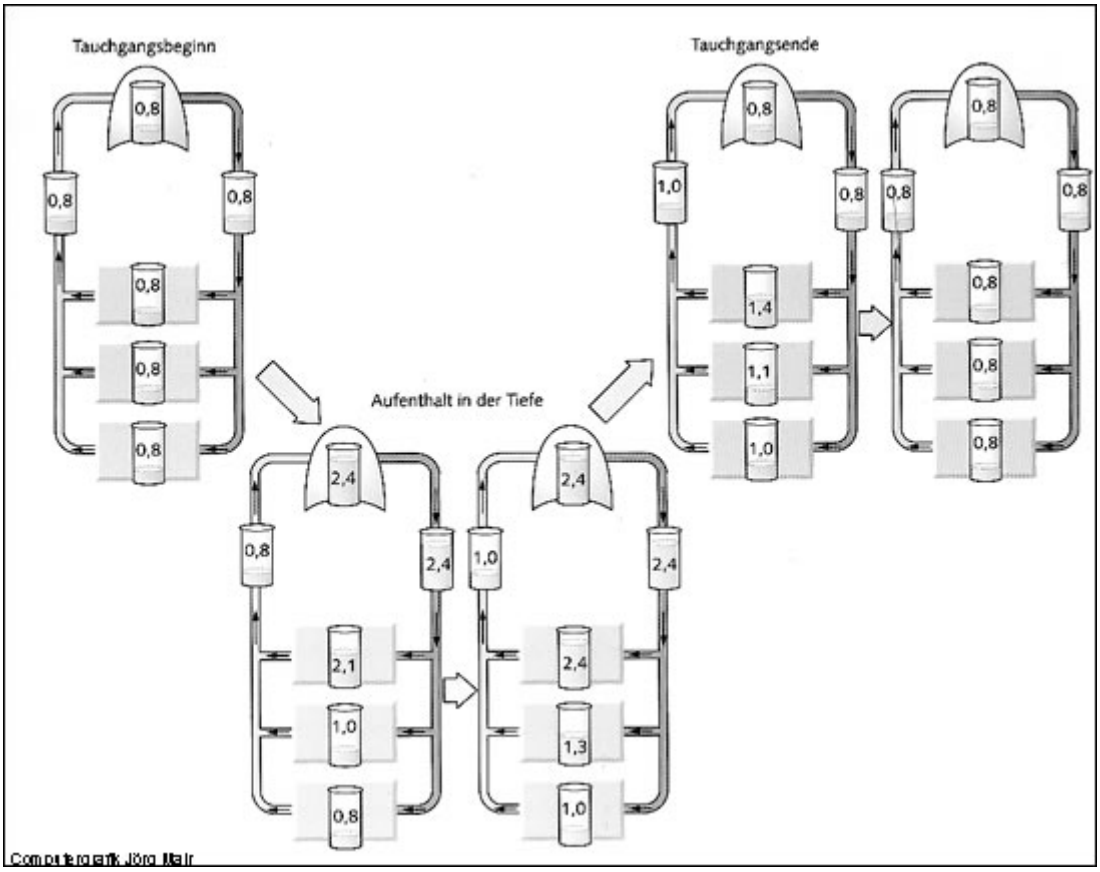
Solange sich ein Taucher im Wasser höheren Umgebungsdrucken aussetzt, sättigen sich Blut und Körpergewebe nach dem *Gasgesetz von Henry* entsprechend dem Umgebungsdruck mit den in der Lunge vorhandenen Gasen auf. Beim Tauchen mit Druckluft ist dabei nur die Aufsättigung mit dem Inertgas N2 von Bedeutung.

Auf Grafik 17 sind großer und kleiner Blutkreislauf mit dem äußeren Gasaustausch in der Lunge und dem inneren Gasaustausch in drei "Beispiel"-Körpergeweben dargestellt, rechtes und linkes Herz wurden der Einfachheit halber nicht eingezeichnet.

In der Lunge, im arteriellen Blut, in den drei Beispielgeweben und dem venösen Blut zeigen die grünen Balken den N2-Teildruck an. Das obere Beispielgewebe ist sehr gut durchblutet, das mittlere Gewebe hat eine mittelstarke Durchblutung und das untere Beispielgewebe eine geringe Durchblutungsrate, wie z.B. das Unterhautfettgewebe.

Aufgrund des dauernden Aufenthaltes bei einem Umgebungsdruck von 1 bar herrscht in allen Körpergeweben, im Blut und in der Lunge vor dem Tauchgang der gleiche N2-Teildruck von ca. 765 mbar (Fließgleichgewicht).

Copyright by Taucherwelt ©



Abtauchen

Grafik 28 B zeigt die Situation kurz nach dem Erreichen einer größeren Wassertiefe. Der Teildruck des gasförmigen N2 in der Lunge stellt sich sofort entsprechend der Gesamtdruckerhöhung ein. Aufgrund der großen Austauschfläche zwischen Lunge und Blut herrscht im Blut wenige Minuten später der gleiche Teildruck des (hier allerdings gelösten) N2 wie in der Lunge.

In Abhängigkeit von der Durchblutungsrate kann das arteriell unter einem erhöhtem Teildruck angebotete N2 unterschiedlich schnell in die Gewebe diffundieren und dort zu einem Anstieg des N2-Teildrucks führen. Aufgrund der Gewebeaufsättigung liegt der N2-Teildruck im venösen Blut besonders zu Beginn eines Tauchgangs nur wenig über der N2-Sättigung unter Normalbedingungen bei 1 bar.

Aufenthalt in der Tiefe

Je länger der Aufenthalt unter erhöhtem Druck dauert, umso mehr sättigen sich die verschiedenen Gewebe mit N2 auf. Dies führt auch dazu, dass der N2-Teildruck im venösen Blut langsam ansteigt. Dauert der Aufenthalt in der Tiefe lang genug, so stellt sich wie zuvor bei 1 bar auch hier ein Fließgleichgewicht mit überall gleich hohen N2-Teildrucken ein.

Um die Sättigungsvorgänge der Körpergewebe nachvollziehen zu können, führt man Berechnungen mit "Modell"-Geweben mit jeweils unterschiedlichen Sättigungsgeschwindigkeiten durch. Eine große Rolle spielen bei diesen Berechnungen die sogenannten Sättigungshalbwertzeiten der einzelnen Gewebe.

Diese Halbwertzeiten beschreiben die Zeitspanne, die ein Gewebe nach einer Druckerhöhung benötigt, um die Hälfte der N2-Menge aufzunehmen, die dem Umgebungsdruck entspricht. Da bei großen Konzentrationsunterschieden die N2-Diffusion vom Blut ins Gewebe wesentlich schneller geschieht als bei geringen Druckunterschieden, ist ein Gewebe also nicht etwa nach zwei Sättigungshalbwertzeiten vollständig mit N2 gesättigt, sondern erst nach ca. 5 Halbwertzeiten.

Beispiel:

Copyright by Taucherwelt ©

Beim Tauchgang auf 30 m Wassertiefe (Umgebungsdruck 4 bar) soll die N2-Aufsättigung eines Gewebes mit einer Sättigungshalbwertzeit von 20 Minuten beobachtet werden. Dieses Beispielgewebe wird so durchblutet, dass nach einem 20-minütigen Aufenthalt bei 4 bar der N2-Teildruck im Gewebe 50% des N2-Teildrucks erreicht hat, der dem Umgebungsdruck von 4 bar entspricht.

Innerhalb der nächsten 20 Minuten (Minute 21 - Minute 40) erreicht das Gewebe einen N2-Teildruck von 75 % des in 4 bar erreichbaren N2-Teildrucks, nämlich 50% der verbleibenden Differenz zwischen der akutellen Gewebesättigung und der maximal erreichbaren Gewebesättigung. In der dritten Halbwertzeit bis zur 60. Minute wird so eine relative N2-Sättigung von 87,5 % erreicht.

In der vierten Halbwertzeit bis zur 80. Minute werden 93,75 % erreicht. Nach insgesamt fünf Sättigungshalbwertzeiten werden nach 100 Minuten 96,875 % der maximal möglichen Sättigung des Gewebes mit N2 erreicht. Das heißt, dieses Gewebe ist nach 5 Sättigungshalbwertzeiten fast vollständig N2-gesättigt.

Bei der üblichen Dauer von Sporttauchgängen zwischen 20 und vielleicht 60 Minuten erreichen nur sehr gut durchblutete Gewebe mit kurzen Sättigungshalbwertzeiten eine N2-Sättigung, die meisten Gewebe werden nur zum Teil aufgesättigt. Nach heutigem Kenntnisstand gibt es im menschlichen Körper Gewebe mit Sättigungshalbwertzeiten zwischen wenigen Minuten und über 10 Stunden.

Entsättigung

Die Anpassung der N2-Sättigung der einzelnen Körpergewebe bei sinkendem Umgebungsdruck erfolgt analog der Sättigung. Auch hier reagieren gut durchblutete Gewebe mit einer schnelleren Anpassung an den aktuellen Umgebungsdruck. Schlecht durchblutete Gewebe haben noch eine gewisse Zeit lang einen N2-Teildruck, der über dem aktuellen N2-Teildruck in der Umgebungsluft liegt.

Aufgrund der Austauschfläche zwischen Lunge und Blut stellt sich im arteriellen Blut sehr schnell der aktuelle N2-Teildruck ein. Während der Durchblutung der verschiedenen Gewebe wird entsprechend dem Konzentrationsgefälle solange N2 in das Blut abgegeben, bis hier wieder ein Fließgleichgewicht auf dem ursprünglichen Niveau vor Beginn des Tauchgangs erreicht ist.

Bis zu diesem Zeitpunkt wird das überschüssige N2 über das venöse Gefäßsystem zur Lunge transportiert und dort abgeatmet. Wie die Sättigung der Gewebe so erfolgt auch die Entsättigung exponentiell, d. h. in den Geweben wird noch für ca. 5 Halbwertzeiten ein erhöhter N2-Teildruck bestehen.

Sättigungstauchen

Verweilt ein Taucher so lange in der Tiefe, bis alle seine Körpergewebe vollständig gesättigt sind, so spricht man von einem Sättigungstauchgang (engl.: *Saturation-Dive*). Beim Tauchen mit Pressluft wäre dieser Zeitpunkt erst nach über 2 Tagen erreicht, da die langsamsten Gewebe eine Sättigungs-Halbwertzeit von über 10 Stunden haben.

Ab Erreichen der Sättigung bleiben die erforderlichen Dekompressionszeiten für den Taucher konstant, d.h. die Relation zwischen effektiver Arbeitszeit unter Wasser und unproduktiver Dekozeit wird umso günstiger, je länger der Taucher unter Druck bleibt.

In der Offshore-Industrie (Öl-/Gasförderung etc.) führen Taucher daher oft mehrwöchige "Tauchgänge" durch. Zwischen ihren Einsätzen im Meer verbringen die Taucher dabei die Ruhezeiten in Druckkammern auf einer Bohrplattform oder an Bord eines Schiffes. Zum Arbeiten werden sie mit einer kleinen Druckkammer (engl.: "*Bell*") wie mit einem Fahrstuhl bis zu ihrer Arbeitstiefe gebracht.

Blasenbildung

Die Bildung von N2-Blasen im Körper ist vergleichbar mit der Bildung der CO2-Blasen in einem Glas Sekt, einem Weizenbier, CO2-haltiger Erfrischungsgetränke oder Mineralwasser. Bei all

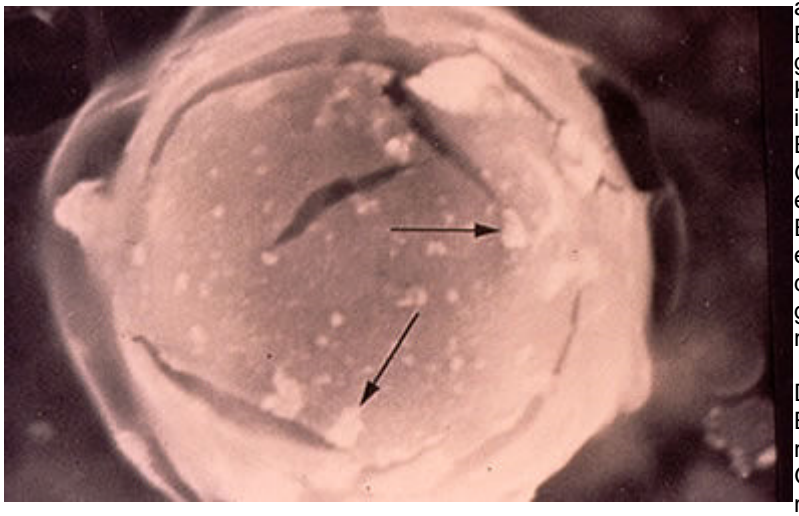
Copyright by Taucherwelt ©

diesen Getränken löst sich bei relativ niedrigen Temperaturen eine gewisse CO2-Menge in der Flüssigkeit.

Da wärmere Flüssigkeiten weniger Gase in Lösung halten können als kühle Flüssigkeiten, werden die Flaschen mit festen Verschlüssen versehen. Das Ausgasen von CO2 aus der Flüssigkeit führt zu einer Druckerhöhung in der Flasche und bewirkt damit, dass das restliche CO2 aufgrund des erhöhten Umgebungsdrucks in Lösung gehalten wird.

Stickstoff-Blasen

Lässt man Temperaturunterschiede zunächst einmal außer Acht, so besteht gegen Ende des Tauchgangs beim Aufstieg aufgrund des sinkenden Umgebungsdrucks in den verschiedenen Körpergeweben eine relative N2-Übersättigung, abhängig von der während des Tauchgangs erfolgten Aufsättigung.



Diese Übersättigung allein führt nicht zur Bildung von gasförmigem N2 in Körpergeweben oder im Blut, da zur Bildung einer Gasblase eine erhebliche Energiemenge erforderlich ist, die durch die relativ geringe N2-Sättigung nicht erbracht wird.

Die Bildung von N2-Blasen ich nur möglich, wenn zur Gewebeübersättigung noch andere Faktoren hinzukommen.

Es gibt hierzu verschiedene Überlegungen:

Scherkräfte

Zum einen kann es durch Scherkräfte im Gewebe, z.B. bei der Anspannung von Muskulatur, zu ungleichen lokalen Druckverhältnissen kommen. An den so entstehenden Orten mit einem relativen Unterdruck kann es zur Bildung von Stickstoffblasen kommen, im Gewebe oder in den Blutgefäßen.

Blasenkerne

Der wahrscheinlichste Entstehungsmechanismus für N2-Blasen ist in Grafik 29 dargestellt. Zieht man den Vergleich mit dem Sektglas noch einmal heran, so kann man bei näherer Betrachung beobachten, dass die CO2-Blasen ihren Ursprung von wenigen, immer gleichen Stellen des Glasrandes haben.

Es handelt sich dabei in der Regel um Unhebenheiten in der Glasoberfläche, die beim Befüllen des Glases nicht komplett mit Flüssigkeit benetzt worden sind.

Copyright by Taucherwelt ©

In diese wandständigen Gasblasen diffundiert das CO2 aus der übersättigten Flüssigkeit und führt solange zur Vergrößerung der wandständigen Blase, bis sich eine kleine CO2-Blase ablöst und zur Oberfläche steigt.

Die zur Zeit wahrscheinlichste Entstehungshypothese für N2-Blasen im Körper geht davon aus, dass sich in den Blutgefäßen ähnliche Unebenheiten wie im Sektglas befinden. Da sich die Gase in derartigen wandständigen Hohlräumen entsprechend dem *Gesetz von Boyle-Mariotte* verhalten, vergrößern oder verkleinern sie sich je nach Veränderung des Umgebungsdruckes.

Die Teildrucke der Gase entsprechen dabei immer dem aktuellen Umgebungsdruck, das heißt es gibt hier keine Über- oder Untersättigung.

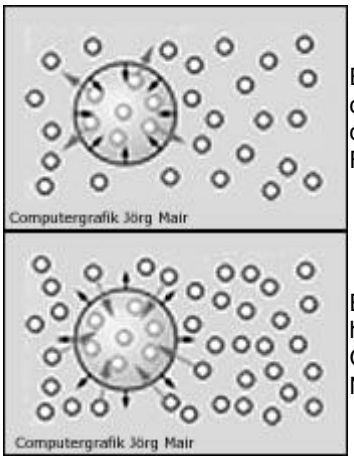
Während der Dekompressionsphase eines Tauchgangs kann das in den N2-übersättigten Geweben gelöste N2 entsprechend dem Konzentrationsgefälle in eine solche wandständige Blase hinein diffundieren, da in der Blase keine N2-Übersättiung vorliegt.

Nach zunehmender Vergrößerung der wandständigen Blase durch N2-Einstrom können sich N2-Blasen ablösen und mit dem venösen Blutstrom aus dem Gewebe in Richtung rechtes Herz und Lunge transportiert werden.

Blasenwachstum

Auf ihrem Weg im venösen Blut kann eine N2-Blase durch weiteren Einstrom von N2 oder durch Zusammenschluss mehrerer kleinerer Blasen wachsen oder aber wieder schrumpfen, wobei das gesammte N2 wieder in Lösung geht. Für das Schicksal einer N2-Blase sind dabei unter anderem zwei Kräfte maßgeblich:

Die Oberflächenspannung der Gasblase und die N2-Sättigung der umgebenden Flüssigkeit. Im Inneren einer N2-Blase herrscht ein Druck, der etwas über dem Umgebungsdruck liegt, da zusätzlich zum Umgebungsdruck auch die Oberflächenspannung auf das Blaseninnere wirkt.



Entspricht der N2-Teildruck in der umgebenen Flüssigkeit dem Umgebungsdruck, so führt der relative Überdruck in der Gasblase zur Diffusion von N2 aus der Blase in die Flüssigkeit und damit zur Schrumpfung der N2-Blase.

Erst wenn der N2-Teildruck der umgebenen Flüssigkeit höher ist als der Blaseninnendruck (Umgebungdruck plus Oberflächenspannung), kommt es durch einen weiteren N2-Einstrom in die Blase zum Wachstum.

Gastransport

Abatmung in der Lunge

Unabhängig davon, ob das **N2 im venösen Blut** physikalisch gelöst ist oder **in Form**

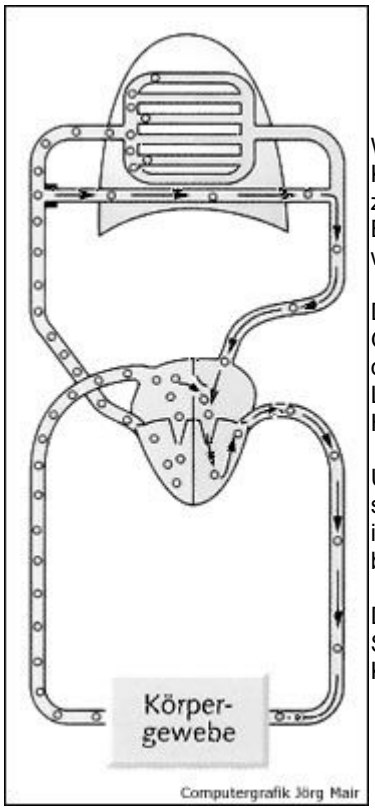
Copyright by Taucherwelt ©

kleiner Gasblasen zur Lunge transportiert wird, kann das überschüssige N2 in der Regel über die Lunge abgeatmet werden. Das im Blut gelöste N2 diffundiert entsprechend dem Konzentrationsgefälle aus den Lungenkapillaren in die Lungenalveolen, wie es vom äußeren Gasaustausch des CO2 her bekannt ist.

Die Blasen des gasförmig transportierten N2 werden in den Lungenkapillaren wie in einem Filter festgehalten und führen hier zu einem lokalen Durchblutungsstop.

Das in der Blase befindliche N2 diffundiert dann wie das gelöste N2 entsprechend dem Konzentrationsgefälle in die Lungenalveolen und führt so zur Verkleinerung und schließlich zum Verschwinden der N2-Blase.

Shuntgefäße in der Lunge



Wenn pro Zeiteinheit sehr viele N2-Blasen aus den Körpergeweben in die Lunge gelangen, so können bis zu 30% aller Lungenkapillaren gleichzeitig durch N2-Blasen verlegt werden, ohne dass es zu subjektiv wahrnehmbaren Symptomen kommt.

Diese Situation führt allerdings durch den erhöhten Gesamtwiderstand der Lunge zu einem Blutrückstau, der zu einer Erhöhung des Blutdrucks in den Lungenarterien und zu einer Belastung des rechten Herzens führt.

Überstiegt der Lungenarteriendruck ein gewisses Maß, so werden sogenannte Kurzschluss- oder Shunt-Gefäße in der Lunge geöffnet, durch die N2-reiches und blasenreiches Blut direkt in die Lungenvenen gelangt.

Derartige, normalerweise nicht oder kaum durchblutete Shuntgefäße gibt es übrigens an vielen Stellen im Körper.

Foramen ovale

In der oben beschriebenen Situation mit Erhöhung des arteriellen Drucks in der Lunge und im rechten Herz kann es bei einigen Menschen noch zu einem weiteren Effekt kommen.

Bei Menschen mit einem nicht fest verwachsenen ovalen Fenster in der Herzscheidewand kann es zum Blutübertritt aus dem rechten Vorhof in den linken Vorhof kommen, wenn der Blutdruck im rechten Vorhof den im linken Vorhof überschreitet. Normalerweise tritt dies nicht auf, da das den gesamten Körper versorgende linke Herz stets höhere Innendrücke aufweist als das rechte Herz.

Bei einer Erhöhung des Lungenwiderstandes oder bei Pressatmung mit einer Druckerhöhung im Brustraum kann jedoch der Druck im rechten Vorhof den im linken Vorhof überschreiten. Dies führt dann zum Übertritt von N2-reichem und blasenreichem Blut unter Umgehung des Lungenkreislaufs direkt in den linken Vorhof.

Arterialisierung von Blasen

Beide Möglichkeiten, geöffnete Shuntgefäße in der Lunge und Rechts-links-Shunt durch ein offenes Foramen ovale, führen so zur Einschwemmung von N2-Blasen in den

Copyright by Taucherwelt ©

Körperkreislauf und zu einer verzögerten N2-Entsättigung des Körpers, da das schon N2-vorgesättigte arterielle Blut zu einem geringeren Konzentrationsgefälle in den Geweben führt.

Spätschäden

Spätschäden nach Tauchgängen werden heute in der Systematik der Dekompressionskrankheits-symptome geführt, obwohl ihr Entstehungsmechanismus noch nicht eindeutig geklärt ist.

Aseptische Knochennekrosen

Monate bis Jahre nach dem Tauchen kann es in den langen Röhrenknochen zur Entstehung von Bereichen mit totem Gewebe kommen, zu den "**aseptischen Knochennekrosen**". Die häufigsten Entstehungsorte für derartige Schäden sind die Oberschenkelknochen, die Oberarmknochen und die Schienbeinknochen.

Befinden sich die Nekrosen in Gelenknähe, so ist eine Zerstörung des Gelenks möglich. Hierdurch können Beschwerden ähnlich bei einer chronischen Gelenksentzündung (*Arthrose*) entstehen. Treten die Nekrosen jedoch fern von Gelenkflächen auf, so kommt es zu keinerlei subjektiven Beschwerden.

Da die Anzahl der gelenkfernen Knochennekrosen überwiegt, bleiben die meisten Spätschäden ohne klinische Folgen und werden lediglich bei Routine-Röntgenkontrollen festgestellt, die bei Berufstauchern regelmäßig durchgeführt werden. Aseptische Knochennekrosen sind eine anerkannte Berufskrankheit von Berufstauchern.

Treten derartige Spätschäden auf, so muss in der Vergangenheit nicht unbedingt eine Dekokrankheit vorangegangen sein. Prinzipiell können solche Knochennekrosen auch nach einer Reihe von Tauchgängen mit nur geringen Regelverstößen auftreten.

Sonstige Schäden ?

Um herauszufinden, ob es durch Tauchen zu weiteren Veränderungen und Störungen kommen kann, auch wenn es nie zu offensichtlichen Tauchunfällen kam, wurden eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt.

Die meisten dieser Untersuchungen wurden an Berufstauchern durchgeführt, die mit Heliox oder Trimix belastende Sättigungstauchgänge durchführen. Dabei interessierte man sich hauptsächlich für mögliche Störungen der Gehirn- und Nervenfunktionen.

Die Studien zeigten verschiedene Veränderungen des Nervensystems, teilweise waren die Ergebnisse widersprüchlich.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass es bis heute keine einigermaßen sicheren Hinweise darauf gibt, dass es durch Tauchen (nicht durch Tauchunfälle!) zu Veränderungen des Nervensystems kommt, die in ihrer praktischen Auswirkung eine Beeinträchtigung der Lebensqualität, eine Persönlichkeitsveränderung oder eine sonst offensichtliche Veränderung bedeuten.

Im Vergleich zu den Berufstauchern wird das Risiko für Sporttaucher dabei allgemein eher als geringer eingeschätzt.

Geschichte

Erste Deko-Tabelle

Bis Anfang dieses Jahrhunderts wurde das Problem der **Dekompressionserkrankungen bei Tauchern und Druckluftarbeitern** mit sehr unterschiedlichen Dekompressionsverfahren angegangen. Die ersten brauchbaren Auftauchvorschriften in Tabellenform für verschiedene Tauchtiefen und Tauchzeiten wurden 1908 vom britischen Physiologen Haldane der britischen Marine vorgelegt.

In seiner Tabelle verwendete er erstmals das auch heute noch übliche Verfahren, den Aufstieg von der (Arbeits-)Tauchtiefe zur Oberfläche je nach N2-Sättigung mit Wartezeiten

Copyright by Taucherwelt ©

in bestimmten Tiefen zu verlängern (Deko-Stops).

Im damals in Großbritannien üblichen System der Längeneinheiten wählte er die Deko-Stufen im Abstand von 10 Fuß (= 3 Meter). Wie bei den heutigen Tabellen konnten die Taucher eine gewisse Zeit in einer bestimmten Tiefe verweilen, ohne dass sie Deko-Stops in 3m, 6m, etc. einhalten mussten.

Je länger und je tiefer der Tauchgang, umso länger die Deko-Zeiten und umso tiefer der erste erforderliche Deko-Stop.

Grundlagen

Grundlage der **Dekompressionstabelle von Haldane** waren die praktischen Erfahrungen mit Dekompressionserkrankungen aus der Vergangenheit, theoretische Überlegungen zur N2-Sättigungsphysiologie, Druckkammerversuche mit Ziegen sowie nach Fertigstellung der Tabellen Versuchstauchgänge von Tauchern der britischen Marine.

Diese erste klassische Dekompressionstabelle war weltweit sehr erfolgreich, d h. bei Verwendung der Tabelle gab es im Gegensatz zu den bis dahin üblichen Dekompressionsverfahren eine sehr geringe Unfallrate.

Weiterentwicklung

In den nächsten Jahren wurden zahlreiche neue Tabellen entwickelt, die z.B. für längere Tauchzeiten oder für größere Tauchtiefen ausgelegt waren. Die meisten dieser Tabellen, wie auch die heute verwendeten Dekompressionstabellen für Sporttaucher, fußen aber auf den grundlegenden Forschungen von Haldane.

Bei der Entwicklung der neuen Tabellen konnten dabei jeweils die praktischen Erfahrungen in der Anwendung der bisherigen Tabellen mit einfließen. Waren Tauchunfälle bei einem bestimmten Zeit-Tiefen-Profil aufgetreten obwohl man der Dekompressionstabelle gefolgt war, so wurden die Rechenmodelle in diesem Bereich modifiziert.

Insgesamt stellt die Geschichte der Dekompressionsverfahren bisher eine Mischung aus theoretischen Überlegungen und Erfahrungen in der Tauchpraxis dar.

Rahmenbedingungen

Da neben der Tauchzeit und Tauchtiefe eine Vielzahl von Faktoren die N2-Sättigungsphysiologie mitbestimmen, sind bei der Anwendung der Dekompressionstabellen gewisse Rahmenbedingungen einzuhalten. Auch bei Einhaltung aller Rahmenbedingungen kommt es bei korrekt durchgeführten Tauchgängen regelmäßig zur Bildung von N2-Blasen.

Sie führen jedoch so gut wie nie zu Symptomen einer Dekompressionskrankheit, da sie in der Lunge festgehalten und abgeatmet werden.

Körperliche Fitness

Die körperliche Fitness spielt eine wesentliche Rolle für die N2-Aufnahme verschiedener Gewebe, da sich ein trainierter Organismus bei körperlicher Belastung bezüglich der Kreislauffunktionen (Herzfrequenz, Herzpumpvolumen, Blutdruck) anders verhält als ein untrainierter Organismus.

Dies wiederum kann die N2-Aufnahme des Körpers wesentlich beeinflussen.

Flüssigkeitshaushalt

Eine unzureichende Flüssigkeitszufuhr bewirkt einer Eindickung des Blutes mit Verschlechterung des Fließverhaltens (= erhöhte Viskosität).

Dies kann dazu führen, dass N2-Blasen eher ein Blutgefäß verschließen als dies in einem

Copyright by Taucherwelt ©

dünnflüssigen Medium der Fall wäre. Bei der Verrichtung schwerer körperlicher Arbeit vor Beginn des Tauchgangs kann es in der Muskulatur zur vermehrten Entstehung von N2-Blasenkernen kommen.

Umgebungsbedingungen

Auch die Umgebungsbedingungen während des Tauchgangs wie Wassertemperatur, Strömung und hoher Wellengang können den Taucher unterschiedlich stark beanspruchen und so Einfluss auf die N2-Sättigung und -Entsättigung nehmen.

Tiefe

In Wassertiefen über 30 m besteht nach den aktuellen Unfallstatistiken von DAN Europe generell ein erhöhtes Risiko für das Auftreten von Dekompressionserkrankungen, selbst wenn man sich im Rahmen der Dekompressionstabelle bewegt.

Dekompressionspflicht

Ähnliches gilt auch für längere Tauchzeiten. Wird so lange getaucht, bis beim Auftauchen das Einhalten von Deko-Stops erforderlich wird, erhöht dies das Risiko für eine Dekompressionserkrankungen, selbst wenn die Austauchvorschriften strikt eingehalten werden.

Tauchprofil

Das Tauchprofil sollte immer so gestaltet werden, dass die größte Tauchtiefe zu Beginn des Tauchgangs erreicht wird und danach zunehmend flachere Wassertiefen aufgesucht werden.

Andere Tauchprofile haben zum Teil erhebliche Auswirkungen auf die N2-Sättigungsphysiologie mit zum Teil deutlich vermehrter N2-Blasenbildung.

Schwere Arbeit

Wird unter Wasser schwere Arbeit verrichtet, so verändert sich das N2-Sättigungsverhalten einzelner Gewebe durch die insgesamt angeregte Herz-Kreislauf-Tätigkeit und die vermehrte Muskeldurchblutung zum Teil erheblich.Gleiches gilt für das Verhalten während der Dekompression und nach Ende des Tauchgangs.

Auch hier sollten schwere Arbeiten, schnelles Flossenschwimmen oder gymnastische Übungen unterbleiben. Bei derartigen Belastungen kann es ggf. durch die verstärkte Muskeldurchblutung kurzeitig zu einem massiven Auftreten von N2-Blasen im venösen Blut kommen.

Aufstiegsgeschwindigkeit

Die Aufstiegsgeschwindigkeit zum Ende eines Tauchgangs ist wie die Dekompressionsstufen selbst ein wesentlicher Bestandteil der Dekompressionsvorschriften.

Werden die vorgeschriebenen Geschwindigkeiten deutlich über- oder unterschritten, so hat dies direkte Auswirkungen auf die N2-Sättigungsphysiologie und die Tendenz zur Blasenbildung. Fast alle modernen Dekotabellen fordern auf den letzten 10 Metern bis zur Oberfläche eine Aufstiegsgeschwindigkeit von unter 10 m/min.

Im Klartext bedeutet das, dass z.B. der Aufstieg von 3 m Tiefe zur Oberfläche ca. 20 s dauern soll !

Sicherheits-Stop

Allgemein wird heute für jeden Tauchgang die Einhaltung eines Sicherheits-Stops vor dem

Copyright by Taucherwelt ©

Aufstieg zur Wasseroberfläche gefordert. Die Empfehlungen bewegen sich zwischen 3-5 min auf 3-6 m Tiefe.

Null-Zeit

Als Null-Zeit bezeichnet man die Zeit, die in einer bestimmten Tiefe getaucht werden kann, ohne dass Deko-Stops erforderlich werden. Die Null-Zeit beginnt mit dem Verlassen der Wasseroberfläche und endet mit dem Beginn des Aufstiegs, wenn mit der vorgeschriebenen Auftauchgeschwindigkeit aufgestiegen wird.

Steigt man langsamer als vorgeschrieben auf (z.B. unter 10 m/min), so ist die gesamte Zeit bis zum Erreichen der Sicherheits-Stop-Tiefe zu berücksichtigen.

Wiederholungs-Tauchgänge

Da nach Ende eines Tauchgangs in den verschiedenen Geweben je nach Sättigungshalbwertszeit noch für Minuten bis Stunden eine gewisse Restübersättigung mit N2 besteht, müssen sogenannte Wiederholungstauchgänge, d. h. Tauchgänge eines nicht komplett entsättigten Tauchers, hinsichtlich der erforderlichen Dekompression anders berechnet werden.

Bei der Planung von Wiederholungstauchgängen nach ausgedehnten, tiefen Ersttauchgängen mit einem erheblichen N2-Blasenaufkommen und entsprechender Verlegung der Lungenkapillaren muss mit einer langsameren N2-Entsättigung während der Oberflächenpause gerechnet werden, als es in der Dekompressionstabelle angenommen wird.

(siehe oben: Shuntgefäße in der Lunge und offenes Foramen ovale)

Oberflächenpause

Nach üblichen Sporttauchprofilen ist die N2-Entsättigung durch erhöhtes N2-Blasenaufkommen in der Lunge besonders während der ersten drei Stunden nach Tauchgangsende verzögert.

Die während eines Vortauchgangs entstandenen N2-Blasen oder wandständigen Blasenkerne können in der Dekompressionsphase nach einem Wiederholungstauchgang zu einem frühzeitigen und vermehrten Auftreten von weiteren N2-Blasen führen.

Je größer die Oberflächenpause zwischen zwei Tauchgängen, umso mehr entsprechen die Voraussetzungen des Wiederholungstauchgangs einem Einzeltauchgang. Von einer kompletten Wiederherstellung des Fließgleichgewichtes für die N2-Sättigung der einzelnen Körpergewebe kann bei Sporttauchgängen in der Regel nach einer Tauchpause von 24 Stunden ausgegangen werden.

Non-Limit-Tauchen

Bei über mehrere Tage hintereinander durchgeführten Wiederholungstauchgängen, z.B. während eines Tauchurlaubs, wird empfohlen, nach spätestens sechs Tauchtagen einen freien Tag zur kompletten Entsättigung einzulegen.

Restrisiko

Insgesamt ist das **Sporttauchen eine recht sichere Freizeitbeschäftigung**. Auch aus Sicht der Versicherungen ist Tauchen im Vergleich mit anderen Sportarten keine Risiko-Sportart.

Copyright by Taucherwelt ©

So sind z.B. beim Reiten die Anzahl der Unfälle deutlich höher als beim Tauchen. Schweregrad und mögliche Spätfolgen der Unfälle in diesen sehr unterschiedlichen Sportarten sind dabei durchaus vergleichbar.

Trotz aller Sicherheitsvorkehrungen und trotz eines sicherheitsorientierten Tauchens lässt sich eine absolute Sicherheit mit einem Null-Risiko für das Auftreten einer Dekompressionserkrankung aber nicht erreichen.

Wer diesen Sport ausübt, muss die Existenz eines geringen Restrisikos akzeptieren, so wie er auch die Möglichkeit eines tödlichen Autounfalls, eines Bahnunglücks oder eines Flugzeugabsturzes akzeptieren muss.

Bei der Vielzahl von Faktoren, die bei N2-Sättigung, -Entsättigung und -Blasenbildung eine Rolle spielen, werden schnell die Schwierigkeiten klar, die bei dem Versuch auftreten, eine "sichere" Dekompressionstabelle zu erstellen.

Es liegt in der Natur der Sache, dass derartige Tabellen nur statistisch gesehen sicher sein können, jedoch nie eine absolute Garantie gegen das Auftreten von Dekompressionserkrankungen bieten können.

Abgesehen davon, dass darüber zu diskutieren wäre, ab wann eine Dekompressionstabelle als "sicher" bezeichnet werden kann (Bei einem Dekompressionsunfall auf 10.000 korrekt durchgeführte Tauchgänge? oder bei einem Dekompressionsunfall auf 1.000.000 korrekt durchgeführte Tauchgänge?), muss jedem klar sein, dass die Sicherheit eines Tauchgangs eben nicht nur durch Tauchzeiten und Tauchtiefe bestimmt wird, sondern durch die Beachtung einer Vielzahl von Faktoren, die zusammen zu einer Erhöhung der Tauchsicherheit führen.

Tabellen

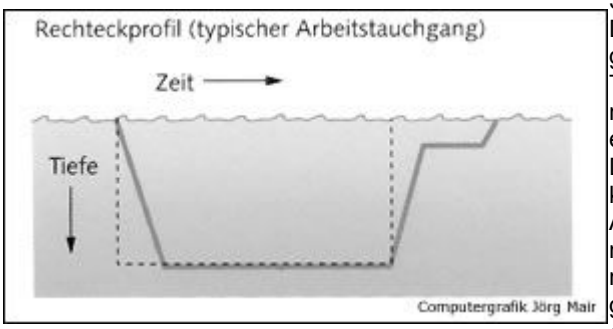
Die zur Zeit international gebräuchlichen und von verschiedenen Tauchsportorganisationen empfohlenen Dekompressionstabellen (Bühlmann, Comex, DECO ´92, NAUI, PADI, YMCA, BS-AC, etc.) verfügen alle über ein vergleichbar hohes Sicherheitsniveau, wenn man sich an die für die einzelnen Tabellen zum Teil unterschiedlichen Rahmenbedingungen hält.

Ein einfacher Vergleich der für einen Ersttauchgang vorgeschriebenen Dekompressionszeiten erlaubt keine zuverlässige Aussage über die Güte einer Dekompressionstabelle.

Großzügigere Dekompressionsvorschriften für den Ersttauchgang können durch sehr eng gefasste Bestimmungen für Wiederholungstauchgänge kompensiert werden und andersherum.

Grundlagen

Rechteck-Tauchgänge



Solange des Dekompressionsvorschriften gibt, gibt es auch das Bestreben der Taucher, die Tauchgänge möglichst lang und die erforderlichen Dekompressionszeiten möglichst kurz zu gestalten, um die Arbeitszeit möglichst effektiv nutzen zu können bzw. den mitgebrachten Luftvorrat möglichst gut für einen interessanten und erlebnisreichen Tauchgang nutzen

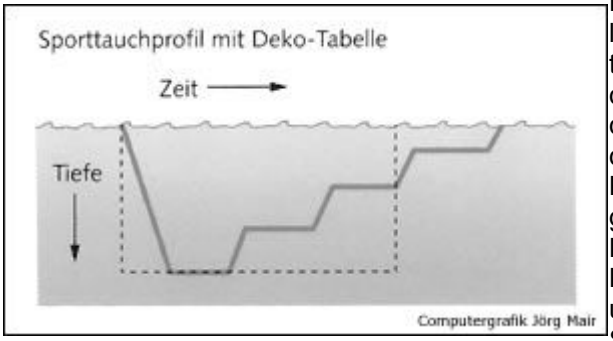
Copyright by Taucherwelt ©

zu können.

Für das **Berufstauchen** stellen die **modernen Dekompressionstabellen** zur Zeit eine befriedigende Lösung dar, da in der Berufstaucherei tatsächlich häufig rechteckförmige Tauchgänge mit dem Aufenthalt in einer konstanten Tiefe über eine gewisse Zeit durchgeführt werden, wie sie auch den theoretischen Überlegungen der Dekompressionstabellen zugrunde liegen.

Multi-Level-Tauchgänge

Im Gegensatz zu den klassischen Berufstauchern führen **Sporttaucher** (aber auch Forschungstaucher, Rettungstaucher etc.) in den seltensten Fällen reine Rechtecktauchgänge durch, üblich ist vielmehr ein **mehrfacher Wechsel der Tauchtiefe**. Führt ein Sporttaucher nach einem solchen Tauchgang die Dekompressionsberechnung mit Hilfe einer Tabelle durch, so ist er gezwungen, die gesamte Tauchzeit bis zum Beginn des Aufstiegs und die maximal erreichte Tauchtiefe zugrunde zu legen.

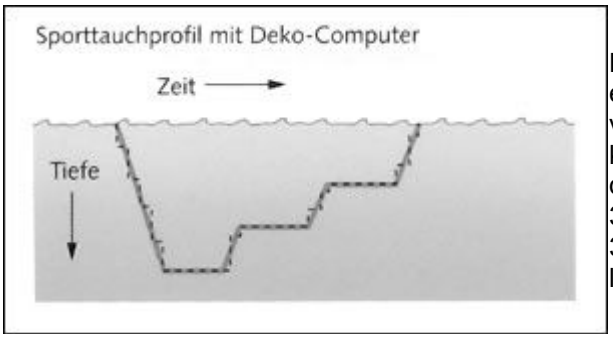


Die aus der Tabelle abgelesene erforderliche Dekompressionszeit ist hierbei länger, als es den tatsächlichen Erfordernissen dieses Tauchgangs entspricht, da während eines Großteils des Tauchgangs das N2 im Körper unter einem wesentlich geringerem als dem Maximaldruck in die Körpergewebe diffundiert ist und so die gesamte N2-Sättigung geringer ist als für die Tabellenberechnung angenommen.

Versuche, mögliche Einsparungen der Dekompressionszeit mit Hilfe von Tabellen zu berechnen, sind aufwendig, relativ unübersichtlich, erfordern eine sehr genaue Planung des Tauchgangs und bergen ein hohes Risiko von Rechenfehlern.

Dekompressions-Computer

Die Lösung dieses Problems liegt in einer **automatischen Erfassung von Tauch-Tiefe und -Zeit mit einer kontinuierlichen Berechnung der aktuellen N2-Sättigung und -Entsättigung**.



Ein grob vereinfachtes Beispiel eines Tauchgangs in verschiedenen Tiefen mit kontinuierlicher Berechnung der N2-Sättigung zeigt Grafik 32 C. Hier ist auch der in Grafik 32 A und B erforderliche längere Deko-Stop nicht nötig.

Neben der möglichen Verkürzung von Dekompressionszeiten lassen sich mit Hilfe einer übersichtlichen Digitalanzeige eines Tauchcomputers die bei der Verwendung von Dekompressionstabellen in der Praxis häufig vorkommenden Rechnenfehler vermeiden.

Copyright by Taucherwelt ©

Wie wird gerechnet?

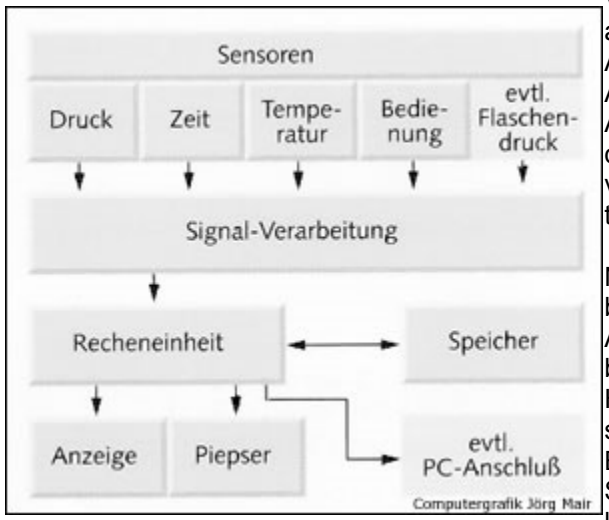
Die in den Dekompressionstabellen angegebenen Deko-Stufen werden mit Hilfe von speziellen Verfahren (sog. "*Algorithmen*") berechnet, die die N2-Sättigung und -Entsättigung in den verschiedenen Geweben nachvollziehen.

Mit einem solchen, auch den Dekotabellen zugrunde liegenden Verfahren berechnet ein Tauchcomputer in sehr kurzen Zeitabständen immer wieder die aktuelle N2-Sättigung verschiedener "Modell"-Gewebe mit verschiedenen Sättigungshalbwertszeiten unter Berücksichtigung des aktuellen Drucks und der Zeit.

Neben diesen beiden Grundinformationen berücksichtigen einige Computer auch Wassertemperatur für die Abschätzung der N2-Sättigung und -Entsättigung im Unterhautfettgewebe. Manche Computer bieten die Möglichkeit, zur berechneten N2-Sättigungssituation pauschale Sicherheitszuschläge zu machen.

Nach Aufbereitung der verschiedenen Eingangssignale werden die Informationen der Recheneinheit zugeführt. Unter Berücksichtigung der gespeicherten aktuellen N2-Sättigung der verschiedenen Gewebe wird die N2-Sättigung mit Hilfe der aktuellen Werte korrigiert und wieder abgespeichert.

Aufgrund der momentanen Gewebesättigungen wird in der Regel ein Dekompressionsplan errechnet und angezeigt. Auf dem Display erscheint dann die verbleibende Null-Zeit, die insgesamt erforderliche Dekompressionszeit sowie Tiefe und Dauer des ersten erforderlichen Deko-Stops.



Viele Computer verfügen über akustische und/oder optische Anzeigen der Aufstiegsgeschwindigkeit mit Alarmierung bei einer deutlichen Überschreitung des vom Computer maximal tolerierten Aufstiegstempos.

Nur wenige Computer verfügen bisher über die Möglichkeit, das Atemminutenvolumen zu berechnen, anhand dessen die Herzkreislaufbelastung zu schätzen und dies in die Berechnung der Stickstoffsättigung einfließen zu lassen.

Rahmenbedingungen

Prinzipiell gelten für die Verwendung von Tauchcomputern die gleichen Rahmengbedingungen, die oben bereits für die Verwendung von Dekompressionstabellen angesprochen wurden. Den Berechnungen der Tauchcomputer liegen nämlich die gleichen Algorithmen zugrunde, auf denen auch die Dekompressionstabellen beruhen.

Ein Teil dieser Rahmenbedingungen lassen sich durch den Computer kontrollieren, als da sind Umgebungstemperatur, maximale Tiefe, Tauchzeit, Profil des Tauchgangs (erst tief, dann flach), Arbeit unterwasser (indirekt über den Luftverbrauch), Aufstiegsgeschwindigkeit und Oberflächenpause.

Ein Großteil der Rahmenbedingungen sind jedoch auch weiterhin vom Taucher selbst zu beachten, da sie bisher vom Computer nicht erfassbar und berechenbar sind (Körperliche Fitness, Verhalten vor dem Tauchgang, Verhalten nach dem Tauchgang etc.).

Copyright by Taucherwelt ©

Individuelle Risiken

Ein **höheres Lebensalter** scheint (statistisch) mit einer generellen Erhöhung des Risikos für Dekompressionsunfälle verbunden zu sein. Auch bei **Übergewicht** besteht eine höhere Anfälligkeit für eine Dekompressionskrankheit. Hier spielen die beiden Aspekte **mangelhafte körperliche Fitness** und vermehrte Aufnahmekapazität für Stickstoff im Fettgewebe eine wichtige Rolle.

Vor dem Tauchgang

Vor einem Tauchgang sollte unbedingt auf eine ausreichende Flüssigkeitzufuhr geachtet werden. Dabei führen **alkoholische Getränke**, vor allem Bier, in größeren Mengen genossen, eher zu einer **negativen Flüssigkeitsbilanz**, da die Harnproduktion angeregt wird. Koffeinhaltige Getränke können ebenfalls harnfördernd wirken und sollten nur in Maßen vor dem Tauchgang getrunken werden.

Ideale Flüssigkeitslieferanten sind wässigere Getränke, Fruchtsäfte etc. Schwere Arbeiten sollten vor einem Tauchgang nicht durchgeführt werden, da dies zu einer Vermehrung von Blasenkernen und damit zu einer erhöhten Stickstoffblasenproduktion während der folgenden Dekompressionsphase führen kann.

Während des Tauchgangs

- Bei Tauchgängen in kaltem Wasser kommt es je nach Güte des verwendeten Tauchanzugs (Trockentauchanzug, Neopren-Nasstauchanzug) zu einer unterschiedlich schnellen **Auskühlung**.

  Im ersten Teil des Tauchgangs, wenn die größte Tauchtiefe erreicht wird und die Extremitäten noch relativ warm und gut durchblutet sind, erfolgt eine entsprechend hohe Aufsättigung der Extremitäten-Gewebe mit N2.

  Wenn gegen Ende des Tauchgangs während der Dekompression der Taucher ausgekühlt ist, werden die Extremitäten weniger gut durchblutet, um ein Auskühlen des Körperkerns zu verhindern. In dieser Situation ist die N2-Entsättigung der Extremitäten verzögert.
- Tauchunfallstatistiken von Divers Alert Network (DAN) zeigen ein deutlich erhöhtes Risiko für Dekompressionsunfälle, wenn der Tauchgang in eine Wassertiefe **über 30 m** führte oder solange dauerte, dass die Einhaltung von Dekompressionsstufen erforderlich war.
- Das Verrichten **schwerer körperlicher Arbeit** unter Wasser führt aufgrund der erhöhten N2-Aufnahme bei insgesamt angeregter Herz-Kreislauf-Situation ebenfalls zu einer Erhöhung des Dekokrankheits-Risikos.
- Bei sogenannten "*Jojo-Tauchgängen*", d h. bei Tauchgängen mit **mehreren deutlichen Tiefenwechseln in kurzer Zeit** (z.B. 0 m - 30 m - 10 m - 25 m - 10 m - 30 m - 0 m), kann es bei den mehrfachen Beinahe- Aufstiegen bereits während es Tauchgangs zur Entstehung von N2-Blasen kommen.

  Diese Blasen gehen während der erneuten Abstiege nur zu einem geringen Teil wieder in Lösung und sorgen so für eine insgesamt wesentlich größere Anzahl von N2-Blasen gegen Ende des Tauchgangs als bei einem Rechtecktauchgang der Fall wäre.

  Obwohl also die Aufsättigung der verschiedenen Gewebe mit N2 bei einem Jojo-Tauchgang rein rechnerisch geringer ist als bei einem Rechtecktauchgang, ergibt sich aus der größeren Blasenzahl insgesamt ein erhöhtes Dekokrankheits-Risiko.
- Ein **zu schneller Aufstieg** bedeutet einen genauso schwerwiegenden Verstoss gegen die Dekompressionsvorschriften wie das **Missachten eines**

Copyright by Taucherwelt ©

vorgeschriebenen Deko-Stops. Besonders für Gewebe mit kurzer Sättigungshalbwertszeit und für Blut stellt die Einhaltung der Auftauchgeschwindigkeit einen wesentlichen Faktor zur Verhütung einer nicht tolerierbaren Übersättigung mit N2 dar.

Sind bei einem Tauchgang Deko-Stops erforderlich, so bedeutet die Missachtung eines Deko-Stops eine Risikoerhöhung für die Dekokrankheit, da einzelne Gewebe eventuell deutlich mit N2 übersättigt sind und mit einer massiven Bildung von N2-Blasen reagieren können.
Bei **Wiederholungstauchgängen** muss die N2-Vorsättigung durch den vorangegangenen Tauchgang berücksichtigt werden.

Da nicht alle Faktoren für die N2-Sättigung und -Entsättigung in einer Dekompressionstabelle oder im Rechenalgorithmus eines Tauchkomputers berücksichtigt werden können, lässt sich die Vorsättigung nur näherungsweise bestimmen.

Da die Berechnung der Dekovorschriften für den Wiederholungstauchgang also auf geschätzten Ausgangsbedingungen beruht , besteht für Wiederholungstauchgänge ein prinzpiell erhöhtes Risiko für Dekompressionserkrankungen.

- Beim sogenannten "**Non-Limit-Tauchen**" kann es dazu kommen, dass ein Tauchcomputer nach einem einwöchigen Tauchurlaub mit jeweils drei Tauchgängen pro Tag den 17. Widerholungstauchgang berechnet, da es zwischen den einzelnen Tauchgängen nie zu einer kompletten Normalisierung der N2-Sättigung aller Gewebe gekommen ist.

Aufgrund der schon beim Wiederholungstauchgang beschriebenen Rechenunsicherheiten und der Tatsache, dass die Berechnung des Tauchgangs jeweils auf der geschätzten Vorsättigung der verschiedenen Gewebe beruht, kann es im Einzelfall zu einer erheblichen Abweichung zwischen tatsächlicher N2-Sättigung der Gewebe und der vom Computer berechneten Sättigung kommen.

In Anbetracht dieser Tatsache **wird empfohlen**, **täglich nicht mehr als zwei Tauchgänge** durchzuführen und nach dem dritten bis sechsten Tauchtag einen tauchfreien Tag einzulegen.

Nach dem Tauchgang

Körperliche Arbeit direkt nach einem Tauchgang stellt einen Risikofaktor für die Dekokrankheit dar, da es bei Anstrengung zu einer vermehrten Muskeldurchblutung und dadurch zu einem kurzzeitigen massiven Auftreten von N2-Blasen im venösen Blut kommen kann.

Kurze Oberflächenpausen bedeuten ein erhöhtes Risiko für Dekokrankheiten nach dem folgenden Tauchgang, wenn die verzögerte N2-Entsättigung nach dem Ersttauchgang (durch die Blasen in den Lungenkapillaren) nicht ausreichend berücksichtigt worden ist.

Diese Situation kann besonders in den ersten drei Stunden nach einem Tauchgang zu Fehlberechnungen der N2-Restsättigung führen.

Wird **kurze Zeit nach einem Tauchgang eine Flugreise** gemacht, stellt die Druckreduzierung in der Flugzeugkabine auf 0,7 bis 0,8 bar eine weitere Decompression des Tauchers dar, entsprechend einem Aufenthalt im Gebirge in 2.000 bis 3.000 m Höhe.

In verschiedenen Dekotabellen und Computerprogrammen sind Empfehlungen für die Wartezeit bis zum Flug eingearbeitet. Generell sollten nach Einzeltauchgängen 12 Stunden, nach Wiederholungstauchgängen 24 Stunden, nach dekopflichtigen Tauchgängen besser 24 - 48 Stunden abgewartet werden.

Werden diese Empfehlungen missachtet, so kann es durch eine Übersättigung einzelner Gewebe zum Auftreten einer Dekokrankheit während des Fluges kommen.

Copyright by Taucherwelt ©

Bergseetauchen

Tauchen im Bergsee heißt Tauchen bei **vermindertem Umgebungsdruck**. Bis 4000 m Höhe sinkt der Luftdruck um ca. 0,1 bar pro 1000 m. In 1000 m Höhe über Meeresspiegel beträgt der Luftdruck z.B. 0,9 bar. Der Umgebungsdruck, der in Dekompressionstabellen und Tauchcomputern in der Regel als Oberflächendruck angenommen wird (1,0 bar), herrscht in diesem Bergsee nicht an der Wasseroberfläche, sondern in 1 m Tiefe.

Ein Taucher, der nach einem Meerestauchgang gerade noch ohne Dekompressionsstopp zur Oberfläche aufsteigen dürfte („Nullzeit-Tauchgang“), müsste nach einen Bergseetauchgang mit der gleichen Stickstoffaufsättigung in 1 m Tiefe warten, bis seine Gewebe so viel Stickstoff abgegeben haben, dass sie 0,9 bar Umgebungsdruck tolerieren. In 2000 m Seehöhe müsste er bereits einen entsprechenden Dekompressionsstopp in 2 m Tiefe einhalten.

Wenn ein Taucher in 500 m Seehöhe wohnt (Umgebungsdruck 0,95 bar) und direkt vor dem Tauchgang mit dem Auto zu einem Bergsee in 2.500 m Höhe fährt (Umgebungsdruck 0,75 bar), so ist der Stickstoffdruck in seinen Körpergeweben deutlich höher, als wenn er vor dem Tauchgang am Bergsee übernachtet hätte. Der Gewebedruck kann sich während eines schnellen Aufstiegs nicht ausreichend an den geringeren Umgebungsdruck am Bergsee anpassen. Wenn der Tauchgang mit einem im Vergleich zum Umgebungsdruck erhöhten Stickstoffdruck begonnen wird, so ist dies mit einer „**Vorsättigung**“ durch einen vorangegangenen Tauchgang vergleichbar. Der Aufstieg zum Bergsee hat ähnliche Auswirkungen wie ein voraus gegangener Tauchgang, sodass die erlaubte Nullzeit kürzer ist oder die erforderliche Dekompression länger dauert.

Die Dekompression nach Bergseetauchgängen wird somit nicht nur durch die Seehöhe, sondern auch durch den **Aufstieg** zum Bergsee verlängert. Durch die Verwendung von Nitrox-Gemischen mit geringerem Stickstoffanteil kann dies ggf. wieder ausgeglichen werden.

Früher wurden Umrechnungsformeln verwendet, mit denen man für Meerestauchgänge errechnete Dekompressionsvorschriften auf die Verhältnisse am Bergsee umrechnen sollte. Diese „Bergsee-Formeln“ werden nicht mehr empfohlen, da es bei der Berechnung leicht zu für den Taucher **gefährlichen Rechenfehlern** kommen kann, und weil wichtige Faktoren nicht berücksichtigt wurden.

Heute werden zur Dekompressionsberechnung im Allgemeinen besondere "**Bergseetabellen**" verwendet, bzw. Tauchcomputer mit bergseetauglichem Rechenprogramm. Wichtig ist hier, dass der Taucher die Vorgaben der jeweiligen Bedienungsanleitung einhält. Leider ist auch die Verwendung von Bergseetabellen **nicht unproblematisch**, weil z.B. Taucher in unterschiedlichen Höhenbereichen wohnen und tauchen und weil nur bei einzelnen Tabellen angegeben wurde, wie der Aufstieg zum Bergsee berücksichtigt werden muß.

Copyright by Taucherwelt ©