

MICHAEL-N.INFO

MICHAEL
NEDWED

SAUERSTOFFATMUNG

JULI 2009

<i>Einführung</i>	3
<i>Technische Voraussetzungen</i>	3
<i>Die Hauptfaktoren der Gefährdung durch den hoch dosierten Sauerstoff für den Körper sind:</i>	6
<i>Verwendung im Freitauchbereich.....</i>	9
<i>Was löst bei Statik und Dynamik diese Leistungssteigerung aus?</i>	10
<i>Warum wird Sauerstoff beim Tauchen giftig?</i>	13
<i>Sauerstoffschädigungsmechanismen-, die im gesamten Körper vorkommen.....</i>	15
<i>Durch Sauerstoff verursachte Schäden in der Lunge Lorrain-Smith-Effekt.....</i>	16
<i>Durch Sauerstoff verursachte Schäden des Zentralnervensystems (ZNS) Paul Bert Effekt.....</i>	16
<i>Wie schützt sich der Körper gegen die Schädigung durch Sauerstoff?</i>	17
<i>Fazit.....</i>	19
<i>Quellen</i>	20

Einführung

Zum besseren Verständnis des Artikels, sind Kenntnisse über die Dekompressionserkrankung (DCI, DCS, AGE) von Vorteil. Durch die Lektüre des Artikels Dekompression kann man eventuell bestehende Fragen bezüglich des Zusammenhanges Sauerstoffatmung und DCI klären. In diesem Artikel wird auf Auswirkungen und Gefahren eingegangen, die durch einen zu hohen Sauerstoffpartialdruck hervorgerufen werden.

Im Tauchsport spielt der Sauerstoff, hinsichtlich des eigenen Lebenserhaltungstriebes, eine nicht unerhebliche Rolle und der Großteil der Tauchsportler sind so süchtig nach diesem "Stoff", dass sie ihn sogar in entsprechenden Behältern mitführen. Meist in dem Mischungsverhältnis 21% Sauerstoff, 78% Stickstoff und 1% sonstige Gase. Es gibt auch andere Mischungsverhältnisse und Gas-Typen, die im Tauchsport Verwendung finden.

Dem Großteil der Gerätetauchern ist bekannt das reiner Sauerstoff nach Dekompressionsproblemen verabreicht wird oder im technischen Tauchen im Bereich des Deko-Stopps Verwendung findet. Im Freitauchbereich findet reiner Sauerstoff neben der Deko-Unfall-Maßnahme auch als Prophylaxe an der Oberfläche Verwendung. Auch Rekorde, die mit Sauerstoffvoratmung vollzogen wurden haben eine gewisse Öffentliche Aufmerksamkeit erregt.

Obwohl dieser "Stoff" für uns so Überlebenswichtig ist, zeigt es sich auch hier, dass zu viel des Guten eben auch sehr negative Folgen haben kann. Diesbezüglich muss man verschiedene Aspekte beachten, denn es gibt Unterschiede zwischen Gerätetauchern und Freitauchern und wenn man außerhalb des Wassers entsprechende O₂ Dosierungen aufnimmt.

Wo liegen die Gefahren?

Ein wesentliches Problem stellt die Feststellung oder Festlegung von wirksamen, schützenden allgemeinen Grenzwerten dar. Hierbei spielen der Zeitfaktor und wirkender Druck zwar eine wichtige Rolle, es gibt jedoch erhebliche interindividuelle und intraindividuelle Verträglichkeitsunterschiede. Wer, wann, wie viel, wie lange und unter welchen Druckverhältnissen hoch dosierten O₂ atmen kann, ist von sehr vielen Variablen abhängig und was heute für Person A funktioniert hat, kann für Person B absolut untauglich sein und selbst morgen kann Person A bei gleicher Belastung mit der zuvor funktionierenden Dosierung (O₂%, Druck und Zeit) Grenzwerte überschreiten, die zu Schädigungen oder Unfällen führen können. Diese Schädigungen müssen natürlich nicht immer in dem unmittelbaren Super GAU enden, sondern können eben auch in schleichender Form ihre Wirkung vollziehen. Des Weiteren muss man beim Umgang mit O₂ über einige Kenntnisse verfügen, damit neben medizinischen auch keine technischen Unfälle vorkommen.

Dass Sauerstoff als Medikament eingestuft ist und bei den Dekompressionskammern ein Arzt mit entsprechender Qualifikation vor Ort sein muss, hat berechtigte Gründe.

Wenn jemand hochdosierten Sauerstoff verwendet, so sollte er bei der Verabreichung bei Anderen Vorsicht walten lassen. Insbesondere wenn derjenige das mal gerade so ausprobieren will und keinerlei Ahnung von den möglichen Auswirkungen hat.

Ich möchte hier einen Gesamtüberblick verschaffen, was im ungünstigsten Fall passieren könnte und auf was man achten sollte um Gefährdungen zu vermeiden und darzulegen wie im Apnoetauchen durch die Sauerstoffvoratmung sich die Leistungssteigerungen erklären.

Technische Voraussetzungen

Zunächst einmal werde ich grob die technische Seite skizzieren, da diese notwendig ist um am Tauchplatz reinen O₂ zur Verfügung zu haben, unabhängig davon ob Gerätetauchen oder Freitauchen angesagt ist.

Vom Prinzip kann man zwei Gerätegruppen bilden. Die Notfallgeräte, die ihrer Namensgebung entsprechend nicht für Prophylaxemaßnahmen verwendet werden sollten und in der Regel auch nicht für den Einsatz im Wasser konzipiert sind und auf der anderen Seite die wassertaugliche Ausstattung, die ihre eigentliche Verwendung im Gerätetauchen hat und wiederum für Notfälle, insbesondere für

den Transport des Patienten, oftmals ungeeignet ist. Innerhalb dieser beiden Gruppen gibt es weitere Unterteilungen und Konfigurationsmöglichkeiten, auf die ich hier allerdings nicht näher eingehen will. Selbst wenn im Notfall lediglich Nitrox oder auch EAN genannt (**enriched air nitrox**) verfügbar ist, stellt die Verabreichung dieses Luftgemisch zwar keine optimale Versorgung dar, ist jedoch besser als nichts. Hierbei handelt es sich um Atemluft die mit einer bestimmten % Zahl über dem normalen Sauerstoffgehalt angereichert wurde,

Bei der Anschaffung von Notfall-Ausstattungen ist es relevant die maximal mögliche Beatmungszeit zu kennen. Dieser Punkt ist wichtig, wenn man an Orten taucht, die nicht so schnell von Rettungsdiensten erreicht werden können oder der Transport zu einer Druckkammer bzw. ins Krankenhaus eben länger dauert.

Auch der Transport oder Bereitstellungsort der Notfall-Ausstattung ist ausschlaggebend. Es nutzt relativ wenig wenn man zusätzlich zu der zurückgelegten Wegstrecke im Wasser auch noch 30 Minuten zum Standort der Notfallsausrüstung benötigt. Wobei solche Überlegungen grundsätzlich in Tauchplanungen einfließen sollten, insbesondere dann wenn neue persönliche Bestleistungen aufgestellt werden sollen.

Bei Ausstattungen, die über kein Demandsystem verfügen fließt ständig Sauerstoff und bei gleicher Flaschengröße und Fülldruck ist die Beatmungszeit im Verhältnis zu Demandsystemen dementsprechend kürzer.

Demandsysteme funktionieren ähnlich der 2ten Stufe bei Tauchgeräten und bauen nur beim Einatmen den Sauerstofffluss auf. In unseren Breitengraden, bei denen man das Tauchgewässer auch mit einem "normalem" PKW ohne Probleme erreichen kann, benötigt man im Notfall einen geringeren Sauerstoffvorrat als in abgelegenen Gefilden. In der Regel ist zwischen 15 und 20 min nach einem Notruf ein entsprechend ausgestattetes Rettungsfahrzeug vor Ort.

Ich persönlich bevorzuge ein Demandsystem, es verlängert die Beatmungszeit um einiges. Dies muss man leider mit einem höheren Preis bezahlen. Wird ein solches Gerät zur Prophylaxe eingesetzt hat dieses System den Vorteil, dass nur bei der Atmung Sauerstoff fließt und dadurch natürlich auch die mögliche Verwendungsdauer erhöht wird.

Der Sauerstoff wird in entsprechenden Flaschen abgefüllt. Eingehende Informationen über Adapter, Flaschen, Sicherheitsausrüstung für Notfälle und Sicherheitsbestimmungen findet man unter <http://www.watersafety.net/>. Die einzelnen Konfigurationsmöglichkeiten der Geräte, sei es nun Notfallgerät oder Wassertaugliche Geräte, sollte man sich bei geplanten Anschaffungen aktuell durch den entsprechenden Anbieter informieren lassen.

Das Gas O₂ wird in verschiedenen Qualitäten verkauft, von denen diese drei die wichtigsten sind:

- Höhenatmungs-Sauerstoff
- Medizinischer Sauerstoff
- Industrieller Sauerstoff

Für unseren Gebrauch kommt nur der medizinische Sauerstoff in Frage.

Alle drei Sauerstoff-Produkte bestehen zwar zu 99,5% aus reinem Sauerstoff, jedoch bestehen Unterschiede der einzelnen Sauerstoff-Produkte in der Art der Befüllung, die Auswirkungen auf die allgemeine Reinheit des Sauerstoffs hat.

Der **Höhenatmungs-Sauerstoff** muss eine geringere Restfeuchtigkeit haben als medizinischer Sauerstoff, damit z.B. im Flugzeug oder beim Bergsteigen die Vereisungsgefahr geringer ist.

Das Füllverfahren für **medizinischen Sauerstoff** erfordert einen Geruchstest und die vollständige Entleerung der Flasche bis zu 0,8 bar Unterdruck, bevor die Flasche neu befüllt werden darf. Sollte das Ventil einer Flasche für medizinischen Sauerstoff schadhafte Wirkung oder Verunreinigungen festgestellt, dann wird die Flasche geöffnet, gereinigt und erst dann neu befüllt. Medizinischer Sauerstoff ist als Medikament eingestuft und ist nach dem Einfüllen in die Flasche innerhalb von 3 Jahren zu verbrauchen, alle 10 Jahre muss die Flasche einer TÜV Überprüfung unterzogen werden, nach dieser Prüfung ist eine Befüllung notwendig. Dies ist besonders bei Notfallgeräten zu beachten, denn sollten hier Personen zu Schaden kommen, weil Vorschriften nicht beachtet wurden, wird es sehr unangenehm für Helfer, die bei Kenntnis von Unregelmäßigkeiten

diesen Sauerstoff verabreichen. Das TÜV Intervall von 10 Jahren bezieht sich auf Geräte, die nicht im Wasser eingesetzt werden. Es gibt keine entsprechende Vorschrift, dass Flaschen, die im Wasser eingesetzt werden, kürzeren Prüfintervallen unterliegen. Bei solchen Flaschen sollte man aus eigenem Interesse ein erhöhtes Augenmerk auf Schäden richten und ggf. das Prüfintervall vorziehen. Es gibt Anbieter, die entsprechend flammsspritzverzinkte Flaschen anbieten, die dann für den häufigen Einsatz **am** Wasser geeignet sind und nicht so schnell korrodieren.

ACHTUNG, die Druckluftflaschen der Gerätetaucher unterliegen selbstverständlich anderen Prüfintervallen als die der Notfallausrüstung.

Industrieller Sauerstoff (Schweißen z. Bsp.) wird nicht für die Atmung durch Menschen empfohlen. Die Richtlinien für industriellen Sauerstoff erlauben einen gewissen Prozentsatz an Unreinheiten und Spuren anderer Gase. Die Flaschen werden in der Regel vor dem Befüllen weder entleert, noch werden diese auf eventuelle Unreinheiten überprüft.

Laufende Kosten, die bei der Beschaffung meist nicht bedacht werden machen sich mit der Zeit auch im Geldbeutel bemerkbar. Eine Füllung kostet abhängig von der Flaschengröße (hier 3-11 L) 50-70€. Der Flaschen-TÜV fällt mit~40-50€ zu Buche, die korrekte Kennzeichnung der Flaschen ab 1. Juli 2006 und die vorgeschriebene Transportsicherung und der Transportschutz (~95€). Hierzu mehr unter <http://www.scuba-sicherheitstechnik.de/>.

Meist dämpft der Preis (~ ab 1.300 €) den Willen des Tauchers sich ein Notfallgerät anzuschaffen. Die Beschaffung einer wassertauglichen O₂-Ausstattung (10 L Flasche, 1. und 2. Stufe, Finimeter) beläuft sich auf etwa 850 €. Hinzu kommen dementsprechend noch die laufenden Kosten der Instandhaltung und Befüllung. Bei der Beschaffung muss man darauf achten bis zu welchem O₂ Gehalt die Geräte freigegeben sind. In der Regel können Nitrox-Geräte auch reinen O₂ verkraften, jedoch sind Juristen von Versicherungen sehr kleinlich, wenn sie eine Möglichkeit sehen ihren Klienten (Versicherung nicht den Versicherungsnehmer) aus einer finanziellen Forderung herausnehmen zu können.

Wie für fast alles gibt es Kurse, in denen man den Umgang mit hochdosiertem Sauerstoff lernen kann und anschließend einen Nachweis in der Tasche hat. So bietet DAN (**divers alert network**) Kurse für den Umgang mit Notfallgeräten an. Übrigens auch für die AED (**A**utomatisierter **E**xterner **D**efibrillator), die in der Frühdefibrillation eingesetzt werden. Die Kursgebühren liegen bei etwa 85,- €, pro Kurs versteht sich.

Über die Zweckmäßigkeit und den Sinn der Verordnungen im Gefahrguttransport für Privatleute kann man gerne mit den kontrollierenden Ordnungsorganen diskutieren und sich anschließend in media res begeben, ob der korrekte Transport günstiger gewesen wäre oder die in Kauf genommene Zeitverzögerung und das fällige Bußgeld.

Dass eine eindeutige, allgemeinverständliche Kennzeichnung von Gasflaschen sinnvoll ist, damit Unfälle verhindert werden, dürfte unstrittig sein.

Viele machen sich auch über mögliche rechtliche Folgen, bei nicht fach- und sachgerechter Instandhaltung der Geräte und daraus resultierenden zusätzlicher Schädigungen verunfallter Personen kaum Gedanken.

Wenn man diesen Artikel gelesen hat, weiß man was einem Sporttaucher passieren würde, wenn er aus Versehen mit einer Sauerstoff gefüllten Flasche anstatt mit normaler Atemluft abtauchen würde.

Sauerstoff verstärkt Verbrennungsvorgänge und aus diesem Grund müssen beim Hantieren mit Sauerstoff besondere Sicherheitsbestimmungen eingehalten werden. Sauerstoffkontakt mit Ölen, Fetten oder anderen nicht sauerstoffgeeigneten Schmierstoffen oder Flaschen sind zu vermeiden. Dies hat zur Folge, dass Tauchflaschen, die mit reinem Sauerstoff oder mit Sauerstoff angereicherten Gasmischungen gefüllt werden sollen, entweder speziell dafür geeignet sein müssen oder sorgfältig, inklusive der Ventile, entfettet werden müssen. Des Weiteren ist auf die Verwendung von sauerstofftauglichen O-Ringen und 1ter und 2ter Stufe zu achten, da ungeeignete Dichtungen und andere Materialien vom Sauerstoff stärker angegriffen werden und somit im Laufe der Zeit Undichtheiten auftreten können. Heftigste Explosionen können die Folge sein. Nähere Informationen findet ihr unter <http://www.watersafety.net/>.

Nach deutschem Recht wird mit Sauerstoff angereicherte Luft genauso behandelt als sei es reiner Sauerstoff. Derjenige, der sich an diese restriktiven deutschen Vorgaben hält, hat im Ausland entsprechend kaum etwas zu befürchten. Jedoch sollte man diesbezüglich immer vorher mit dem aktuell geltenden ausländischen Recht vertraut machen.

Soviel zu der technischen Seite.

Die Hauptfaktoren der Gefährdung durch den hoch dosierten Sauerstoff für den Körper sind:

- Tiefe (Partialdruck)
- Einwirkzeit
- individuelle, körperliche Anfälligkeit

Beim Sauerstoff spricht man nicht von einer narkotischen Wirkung, obwohl dies nach der Meyer-Overton-Theorie möglich wäre. Dort ist Sauerstoff mit dem Faktor 1,7 und Stickstoff mit dem Faktor 1 einer relativen narkotischen Wirkung belegt. Befragte Mediziner beschieden die Möglichkeit einer Sauerstoffnarkose negativ. Wobei hier lediglich der Druckbereich der Hyperbaren Medizin und Anästhesie eingeschlossen ist.

Die Stickstoffnarkose setzt in der Regel bei einem Partialdruck von 3,2 bar ein. Hier nun ein Rechenbeispiel:

Partialdruck	Gasanteil		Gesamtdruck		WT	Rel. nark. Faktor	Mögl. nark. WT
3,2 bar	0,78 (N ₂)	△	4,1 bar	△	31m	1	31 m
3,2 bar	0,21 (O ₂)	△	15,2 bar	△	142 m	1,7	83,5 m

In diesem Beispiel gehe ich davon aus, dass bei gleichem Partialdruck die narkotische Wirkung einsetzt und reduziere dann durch den relativen narkotischen Faktor die Wassertiefe. Hier würde also bei der Verwendung von Pressluft in einem Bereich von 83,5 m die narkotische Wirkung von Sauerstoff einsetzen (nach Meyer-Overton). Es gibt nicht viele Taucher, die sich in dieser Tiefe mit Air21 bewegen und die meisten werden vor dem Erreichen dieser Tiefe schon durch den Stickstoff so berauscht sein, das ihnen diese zusätzliche narkotische Wirkung nicht mehr auffallen würde. Wenn ich den Ansatz nehme, dass ich den PO₂ erst um den Faktor 1,7 erhöhe ergibt sich eine Tiefe von 79,6 m in denen der O₂ eine entsprechende "narkotische Wirkung" entfalten würde.

So fern es eine solche Wirkung gibt.

Des Weiteren kommen bei diesem PO₂ von 3,2 bar bei den meisten Tauchern schon vorher andere Wirkungen des Sauerstoffes zur Geltung.

Bei der Verwendung von Atemluft erreicht bei 66 m der O₂ einen Partialdruck von 1,6 bar.

Die Atemluft enthält 21% Sauerstoff, was dem Partialdruck 0,21 bar unter normobaren Bedingungen entspricht (an Land, bei 1 bar Luftdruck)

0,21 bar O₂ Partialdruck bei 1 bar △ bei 66m Tiefe (7,6 bar) einem O₂ Partialdruck von 1,596 bar.

Aus den Tauchtabellen für Gerätetaucher kann man entnehmen, das der Aufenthalt in dieser Tiefe nicht länger als 45 Minuten dauern sollte um eine O₂ Vergiftung zu vermeiden. Diese Zeitspanne ist in der Theorie machbar, praktisch wird kein Sporttaucher diese Zeit erreichen. Wer daran seinen Spaß hat, kann ja mal die Anzahl der Flaschen berechnen, die für einen solchen Tauchgang mitgeführt werden müssten und daraus den Spaßfaktor für den Gerätetaucher ableiten.

Ad hock fällt mir im Moment auch kein Freitaucher ein, der einen solchen Tauchgang (Tiefe **UND** Zeit) durchführen könnte.

Die US Marine gibt für Notfallsituationen bei einer Tiefe von 85 m eine Verweildauer von 30 Minuten an. Diese Taucher sind jedoch auch permanent im Training und körperlich, sowie mental entsprechend für solche Tiefen konditioniert. Des Weiteren wird bei diesen Tauchern auch die individuelle Sauerstoffverträglichkeit durchgeführt und dadurch quasi eine körperliche Grundeignung festgestellt. Doch selbst in diesem Bereich kommt es zu Zwischenfällen, was die Unberechenbarkeit des Sauerstoffes eindrücklich veranschaulicht.

Als Vergleich für Normaltaucher also ungeeignet, aber offensichtlich scheint man auch beim Gerätetauchen die 1,6 bar Grenze etwas beeinflussen zu können.

Was wir nun haben ist eine grobe Vorstellung über welche Tiefen- und Zeitverhältnisse wir reden, wenn normale Atemluft verwendet wird. Könnte man dieses Verhältnis als linear bezeichnen, wovon ich allerdings nicht ausgehe, dann wäre für Gerätetaucher bei 123 Metern die Grundzeit 0 Minuten, im theoretischen Modell wohlgermerkt, denn hier herrscht dann schon ein PO_2 von 2,79 bar.

Im Wasser treten bei Gerätetauchern Intoxikationserscheinungen ab 2 bar PO_2 regelmäßig auf, während in einer Druckkammer ab 3 bar PO_2 identische Symptome beobachtet werden.

Wie erklären sich solche Unterschiede? Ein möglicher Erklärungsansatz dafür sind erhöhte Atemwiderstände, hydrostatischer Druck des Wassers, erhöhter Druck auf den Brustkorb durch Wasserdruck und Tauchanzug oder die Körperposition des Tauchers.

Eine eindeutige Abhängigkeit für das frühere Auftreten der O_2 -Intoxikation liegt in der körperlichen Belastung, je höher die Arbeitsleistung des Körpers, desto größer das Risiko. Auch kalte oder sehr warme Umgebungsbedingungen reduzieren die Sauerstofftoleranz.

Bei der Druckkammerbehandlung eines Tauchunfalls legt man deshalb immer wieder Pausen ein, in denen Raumluft geatmet wird.

Das unberechenbare an einer O_2 -Intoxikation ist, dass ein generalisierter Krampfanfall das einzige Symptom sein kann, ohne dass sich andere Vorwarnzeichen gezeigt haben. Ein solcher Anfall ist in einer Druckkammer durch das Personal natürlich wesentlich besser abzufangen als in einer entsprechenden Wassertiefe durch den Tauchpartner.

Ein weiterer Risikofaktor ist, dass die eigene Sauerstoffverträglichkeit keine Konstante ist. Sie kann von Tauchgang zu Tauchgang unterschiedlich sein.

Neben den schon genannten Faktoren, die das Auftreten von ZNS-Symptomen (**z**entrales **N**ervensystem) begünstigen, wie körperliche Arbeit, Immersion (Eintauchen ins Wasser) oder Kälteexposition, wirken sich auch ein erhöhter CO_2 -Gehalt, fieberhafte Erkrankungen und einige Medikamente auf die Sauerstoffanfälligkeit aus.

Die allgemeine Diskussion O_2 sei prinzipiell gefährlich wenn der PO_2 1,6 bar erreicht, suggeriert quasi das diese Gefährdung sofort bei diesen Druckverhältnissen eintreten würde. Dies stimmt so nicht und 45 min ist eine lange Zeit für einen Sporttaucher in dieser Tiefe - aus welcher Motivation auch immer sich jemand mit einem normalem Atemluftgemisch und Sporttaucherausrüstung in diese Tiefe begibt. Ich erinnere daran, dass wir hier über normale Atemluft reden, nicht über Spezialgemische oder Geräte, bei denen die 1,6 bar PO_2 schon auf wesentlich geringeren Tiefen erreicht wird und eine Tauchzeit von 45 min als Normalfall gilt!

Je nach Verband wird auch 1,4 bar als Grenzwert genommen. Dieser wird allgemein dann als wirksam angesehen, wenn körperliche Arbeit verrichtet wird, wobei hier auch der jeweilige Trainingszustand der betreffenden Person zu beachten ist.

Das Problem das bei den allgemeinen Diskussionen dieser Thematik kaum beachtet wird, ist die individuelle Anfälligkeit auf bestimmte Partialdrücke der beteiligten Gase und auch die Tagesform der Person. Die Grenzwerte sind keine absoluten Wahrheiten, sondern Anhaltspunkte, bei deren Erreichen man Vorsicht walten lassen sollte.

In meinen Augen stellen die Vertreter der Meinung: „Ich war aber schon wesentlich tiefer, da passiert nichts“ das größte Problem dar. Sie erzeugen einen Druck auf andere Taucher, die meist dem scheinbar erfahrenerem Taucher vertrauen und dann in Schwierigkeiten kommen. In meiner persönlichen Bewertung disqualifizieren sich diese Personen mit solchen Aussagen aus dem Kreis der vertrauenswürdigen Menschen, da sie sich offensichtlich nicht mit der Problematik auseinandergesetzt haben.

Bislang lag der Schwerpunkt der Ausführungen auf den Gerätetauchern. Dies begründet sich natürlich auch darin, dass hier die größten Erfahrungen im medizinischen Bereich liegen. Der Freitauchbereich ist erst am Wachsen und diesbezüglich sind die angelegten Studien relativ dürftig, da die möglichen Sponsoren solcher Studien entsprechend wenig Interesse zeigen. Die Erkenntnisse aus dem Gerätetauchen auf das Freitauchen zu übertragen ist nicht unproblematisch.

Der Freitaucher hat hier einen prinzipiellen Vorteil gegenüber dem Gerätetaucher, da die aufgenommenen Gasmengen nicht so hoch sind. Dieser Umstand kommt jedoch beim N_2 wesentlich mehr zum Tragen, wenn es um die Dekompressionserkrankung oder Tiefenrausch geht.

Der Freitaucher reduziert während des Tauchganges permanent seinen Sauerstoffvorrat und hat außer der Lunge keinen Sauerstoffspeicher, der den Partialdruck beliebig anpassen kann. Diese Reduzierung ist einerseits ein möglicher Nachteil hinsichtlich des Aufstiegs-Blackouts (früher Flachwasserblackout; siehe GTUEM) andererseits wird der Partialdruck von 1,6 bar erst bei größerer Tiefe erreicht.

Ein Aufstiegs-Blackout, kommt dann zustande wenn sich der Taucher zu lange unter Wasser befunden hat und beim Aufstieg der PO_2 dann unter 0,04 bar sinkt. Bedingt durch Trainingseinflüsse kann dieser Wert auch niedriger sein. Ich habe hier den Tabellenwert genommen, der für die Allgemeinheit als Anhalt genommen wird. Natürlich gibt es auch Menschen, die bei einem höheren PO_2 Wert schon einen Aufstiegs-Blackout erleiden können.

Da man diese Reduzierung des PO_2 durch den Verbrauch nur sehr schwer feststellen kann, werde ich bei den Beispielen diesen Faktor nicht berücksichtigen. Bei erfahrenen Freitauchern kommt der Aufstiegs-Blackout sehr selten vor. Vorbereitungstauchgänge am Leistungslimit im Wettkampfsport oder im Wettkampf selbst sind hierbei nicht berücksichtigt.

Demnach lassen sich Tauchtiefen, nur den O_2 Partialdruck betrachtend, von den oben genannten 123 m für Freitaucher entsprechend nachvollziehen. Da die Tauchzeit hier lediglich im niedrigen Minutenbereich liegt, für 100 m Tiefe beträgt die Tauchzeit etwa 3,5 Minuten, sind die Schädigungsprozesse, hier eben besonders die mittel- und langfristigen Schädigungsmechanismen durch den Sauerstoff relativ verkraftbar, während die schnellen, das ZNS betreffende Schädigungsmechanismen weiterhin im Bewusstsein des Tauchers verstärkt verankert sein müssen, wenn mit Sauerstoffprophylaxe getaucht wird.

Atmet ein Freitaucher an der Oberfläche reinen O_2 und taucht mit einer solchen Lungenfüllung ab, sollte derjenige auch wissen was geschehen kann. Selbst wenn der Freitaucher vor dem Tauchgang die Atmung des hochdosierten Sauerstoffes einstellt, liegt im Körper für einige Zeit nicht das normale Gasgemisch vor, der Sauerstoffgehalt ist noch erhöht und somit natürlich auch der PO_2 . Aus diesem Grund muss nach einer Sauerstoffatmung eine längere Pause eingelegt werden, um dem Körper die Gelegenheit zu geben die normalen Partialdruckverhältnisse wieder herstellen zu können.

Aber betrachten wir nun den leichtsinnigen Freitaucher, der an der Oberfläche reinen Sauerstoff geatmet hat und mit einer solchen Lungenfüllung abgetaucht ist.

An der Oberfläche hat er nun schon einen Partialdruck von 1 bar, da wir davon ausgehen, dass keine Nebenluft geatmet wurde. Bei 10 Meter Tiefe hat sich der PO_2 schon auf 2 bar erhöht. In einer Tiefe von 60 Metern ist der Partialdruck auf 7 bar angewachsen und spätestens bei diesem Partialdruck endet dieser Tauchgang für die Meisten mit einem Krampf, der schlagartig und ohne Ankündigung eintritt und in dieser Tiefe zum Desaster führen wird.

In der Regel wird sich der Totalausfall bei einem wesentlich niedrigeren Partialdruck einstellen, was von vielen individuellen Faktoren abhängig ist. Genauso wenig, wie man das eigene Verhalten bei Sauerstoffmangel voraussagen kann, trifft dies auch für den erhöhten Partialdruck zu.

Der menschliche Körper reagiert nicht nur auf einen zu niedrigen PO_2 , sondern auch auf einen zu hohen PO_2 und hierbei im Verhältnis zwar mit einer erheblich größeren Toleranzgrenze aber dann umso heftiger.

Aus diesem Grund erhöht die Voratmung hoch dosierten Sauerstoffes beim Tieftauchen die Unfallwahrscheinlichkeit enorm, wenn mit dem erhöhten O_2 Partialdruck getaucht wird.

Mit normaler Atemluft würde ein Sauerstoffpartialdruck von 7 bar einer Tauchtiefe von rund 330 Metern entsprechen. Herbert Nitsch hat bei seinem No Limit Weltrekord von 214m Tiefe also einen PO_2 von maximal 4,7 bar verkraftet. Also scheint es ja dem Körper zu gelingen, ähnlich dem Bereich der Extrembergsteiger, sich nicht nur an niedrige Partialdrücke, sondern auch höhere Werte anzupassen. Bei diesem Vergleich muss man allerdings auch beachten dass die Bergsteiger sich wochenlang auf großer Höhe aufhalten um dem Körper die Möglichkeit zu geben sich anzupassen.

Inwiefern man sich an einen noch höheren PO_2 als die 7 bar gewöhnen kann wurde bislang nicht untersucht. Jedenfalls sind die wenigsten Menschen derzeit in der Lage diesen hohen O_2 Partialdruck in einer solchen Tiefe zu überleben.

Wir werden es sehen ob es die No Limit Fraktion schafft, diese Schallmauer zu durchbrechen.

Ich will an dieser Stelle nochmals darauf hinweisen, dass diese Werte **NICHT** einmal annähernd für Gerätetaucher anwendbar sind. Da sie ja ständig Atemluft quasi "nachschieben" und somit den PO_2 der Tiefe entsprechend konstant halten.

Bei den Freitauchern, die lediglich über die Luftmenge der Lungenfüllung verfügen und wie schon erwähnt sich der Sauerstoffvorrat ja permanent durch den Verbrauch reduziert, verschieben sich die Partialdruckwerte etwas.

Es spielt also auch die Masse des Sauerstoffes eine Rolle und, wie schon erwähnt wurde, wird beim Freitaucher durch die Verarbeitung des Sauerstoffes der PO_2 bezüglich der O_2 Toxizität positiv beeinflusst.

Bedingt durch die sehr geringen Erfahrungswerte, geschweige denn Studien, auf denen man Freitauchertabellen nach dem Muster erstellen könnte, dass ein Freitaucher mit Lungenvolumen X, bei einer Tauchzeit Y und Tiefe Z den PO_2 A erreicht, belasse ich es somit bei den bestehenden Erkenntnissen der Gerätetauchern. Hinsichtlich des Sinnes einer solchen Freitauch-Tabelle, gebe ich zu bedenken das die inter- und intraindividuellen Unterschiede bezüglich der Sauerstoffverträglichkeit eine instabile "Konstante" ist. Sei es nun in Bezug auf einen hohen oder niedrigen PO_2 . Des Weiteren verfügen wir nicht über die Möglichkeit diesen PO_2 effektiv während eines Tauchganges zu messen.

Verwendung im Freitauchbereich

Im Wettkampfbereich der Freitauchszene wird durch die Anwendung von reinem Sauerstoff als prophylaktische Maßnahme der Verringerung des Risikos der Dekompressionskrankheit Rechnung getragen.

Im Wettkampf selbst und ab einer bestimmten Zeit vor dem Tauchgang ist es verboten hoch dosierten Sauerstoff zu atmen. Nach der bewerteten Performance kann natürlich hochdosierter Sauerstoff geatmet werden.

Durch die Verabreichung von hochdosiertem O_2 wird die weitere Aufnahme der Inertgase, in unserem Fall eben schwerpunktmäßig Stickstoff (N_2), erheblich reduziert und damit das Abatmen des Stickstoffes beschleunigt. Im Bereich der massiven Vorbereitung für Tiefenrekorde und der bedingt durch Wetterabhängigkeit, Aufbau der Infrastruktur (Kosten), eng gesetzten Ablaufplänen und anderen Faktoren, ist der Einsatz von Sauerstoff entsprechend sinnvoll.

Hierzu wird nach einem Tauchgang und zwischen den Abstiegen hoch dosierter Sauerstoff unter normobaren Bedingungen geatmet. Wenn sich der Taucher im Wasser befindet, können die Notfallgeräte nicht verwendet werden und somit kommt Material aus dem Gerätetauchen zum Einsatz.

Herbert Nitsch taucht nach No-Limit auch wieder ab um in der Tiefe mit Atemgerät zu dekomprimieren. ACHTUNG, das hat nichts mit einer nassen Dekompression, wie sie "früher" noch als sinnvoll gelehrt wurde zu tun! Es ist eine Prophylaxemaßnahme und durch die Tiefe wird der Vorgang beschleunigt.

Bestünde ein Tauchunfall würde natürlich nach den neuen Maßnahmen gehandelt und hierzu gehört nicht die nasse Dekompression.

Mediziner empfehlen für Freitauchgänge jenseits der -40m Marke als Prophylaxe nach dem Tauchgang das Atmen von O_2 über etwa 10 Minuten, oder/und die Anzahl der Tieftauchgänge zu reduzieren mit gleichzeitig verlängerten Oberflächenpausen um die Gefährdung durch die Dekompressionskrankheit (DCS) zu minimieren.

Für das Tieftauchen eignet sich das Atmen reinen Sauerstoffes für den Tauchgang hinsichtlich einer Leistungssteigerung nicht, da es mehr Gefahren birgt als Nutzen bringt.

Die Notfallbehandlung mit Sauerstoff bei Tauchunfällen, sowie die Behandlungsmethode der hyperbaren Oxygenation (HBO) sind Standardprozeduren bei Tauchunfällen mit entsprechender DCI Symptomatik. Je schneller und kompetenter Symptome vor Ort **erkannt** und behandelt werden, desto effektiver beschleunigt die Sauerstoffgabe und Druckkammerbehandlung in einem entscheidenden Maß die Wiederherstellung des verunglückten Tauchers.

In den Druckkammern ist auch ausgebildetes Fachpersonal vor Ort. Mittlerweile sind Behandlungen in Druckkammern nicht nur für Tauchunfälle sondern auch für eine Vielzahl von Erkrankungen oder Verletzungen üblich, die sich nicht auf Tauchunfälle begründen.

Für den Funbereich macht die Sauerstoffatmung zur Reduzierung von Risikofaktoren, unter dem Aspekt des Aufwandes und der Gefahr bei unsachgemäßem Umgang, meiner Meinung nach keinen Sinn.

Es gibt wesentlich kostengünstigere Möglichkeiten, damit man in diesem Bereich ebenfalls sicher tauchen kann. Dazu gehören einfache Maßnahmen wie genug trinken, Pausen zwischen den Abstiegen und wir haben doch Zeit, es soll ja Spaß machen, oder?

Die Leistungssteigerung durch das Atmen hochdosierten Sauerstoffes liegt hauptsächlich in den Bereichen der Statik und des Streckentauchens. Wie sich jeder denken kann, werden unter solchen Bedingungen erbrachte Leistungen nicht als Rekorde innerhalb der Verbände anerkannt. Solche "Weltrekorde" sind dann meist im Guinness-Buch der Rekorde eingetragen.

Aber das ist ein Thema für sich.

Was löst bei Statik und Dynamik diese Leistungssteigerung aus?

Es wurden schon mehrere Experimente mit der Sauerstoffatmung durchgeführt. Dr. Keats und einer seiner Schüler haben durch 15 minütige Hyperventilation und Atmung reinen Sauerstoffes eine Apnoezeit von über 13,5 Minuten erreicht und dies obwohl sie keine trainierten Freitaucher waren. Der derzeitige Rekord im Guinness-Buch mit Sauerstoffvoratmung liegt bei 17 min 19 sec und wurde von dem Apnoetaucher Tom Sietas, ohne Hyperventilation, aufgestellt. Der reguläre Weltrekord liegt bei 11 min 35 sec und wird von Stéphan Mifsud gehalten.

Wie werden diese Leistungssteigerungen durch das Atmen hochdosierten O₂ ausgelöst?

Dazu muss man sich vor Augen führen, wo der Sauerstoff im Körper gespeichert, transportiert und eingelagert wird.

Der Mensch verfügt als Speichermedium für den Sauerstoff lediglich die Lunge. Blut sehe ich nicht als Speicher-, sondern als Transportkapazität.

Bei normalen Atembedingungen wird im Blut der größte Teil des Sauerstoffes chemisch an das Hämoglobin gebunden, was auf 100 ml Blut etwa 20 ml Sauerstoff ausmacht, während der physikalisch gelöste Sauerstoff im Plasma nur 0,3 ml pro 100 ml Blut beträgt. Bei dieser Rechnung werden also 20,3 ml Sauerstoff pro 100 ml Blut transportiert.

Damit die innere Atmung funktioniert, werden 4-6 ml pro 100 ml Blut benötigt und in Ruhe verbraucht ein Mensch etwa 300 ml Sauerstoff pro Minute und bei schwerer körperlicher Arbeit etwa 4.000 ml/min.

Es gibt auch noch die Möglichkeit das Sauerstoffvolumen über das Hämoglobin zu ermitteln. Menschen haben durchschnittlich etwa 750 g Hämoglobin, welches pro Gramm etwa 1,34 ml O₂ binden kann. Daraus ergibt sich rund 1 Liter gebundener Sauerstoff. Hierzu muss man eben seinen eigenen Hämoglobinbestand kennen, da die 750 g wie so oft nur den Durchschnitt widerspiegeln.

Ich bevorzuge bei solchen Dingen dann Mittelwerte, die sich zumindest etwas genauer anwenden lassen. In diesem Fall: Blutvolumen pro Körpergewicht.

Rechnet man nun noch den physikalisch gelösten Sauerstoff hinzu kommt man bei der Annahme von dem Mittelwert 79 ml/Kg Körpergewicht und 75 Kg Körpergewicht, auf 5,925 L Blut, das immerhin fast 18 ml Sauerstoff physikalisch transportiert. Rechnet man bei dem chemisch gebundenen Sauerstoff auch hier mit dem Blutvolumen, kommt man auf 1,185 L Sauerstoff. Bezieht man noch die Speicherkapazität einer 5 L Lunge (TLC) erhöht sich das ganze um 1,050 L reinen Sauerstoff, der sich

in der Lunge befindet.

2,253 L Sauerstoff, den man fast gnadenlos verprassen kann. Man muss lediglich den Rest-Partialdruck beachten, der zum Überleben notwendig ist.

Ich sehe schon die ersten rechnen wie hoch ihre Statikzeit dann wäre. Bitte daran denken, das dies Theorie ist und wie komplex die Experimentelle Anordnung wäre um alle Körperwerte entsprechend zu überwachen und auszuwerten. Rein wissenschaftlich gesehen sind aufgrund der niedrigen Probandenzahl und der Auswahl der Probanden (trainierte Taucher) solche Tests nicht wirklich aussagekräftig. Es sind lediglich Spots und zeigen zu welchen Leistungen kleine Gruppen von Menschen fähig sind. Daraus abzuleiten, das eine große Anzahl von Menschen, im Sinne des Breitensportes, diese Leistungen ebenso erbringen können ist unrealistisch.

Man bedenke wie viele Tauchgänge im Bereich der Gerätetaucher ausgewertet wurden um entsprechende Tauchtabellen generieren zu können. Manchmal ist es eben doch nicht so einfach wie es in den Lehrbüchern steht.

Aber zurück zum Sauerstoff.

Der Sauerstoff wird durch das Blut transportiert, einmal chemisch an das Hämoglobin gebunden und zum Anderen physikalisch gelöst.

Das Hämoglobin ist bei einem Sauerstoffpartialdruck von 150 mmHg (rund 0,2 bar) schon zu 97% mit Sauerstoff gesättigt und chemisch kann keine nennenswerte höhere Sauerstoffbindung erfolgen. Um die verfügbare Sauerstoffmenge zu erhöhen bleibt nur noch die physikalische Möglichkeit und dies kann man durch Atmung von reinem Sauerstoff schon unter normobaren Druckbedingungen bewerkstelligen. Die Menge des physikalisch gelösten Sauerstoffes ist linear steigend zu dem alveolaren Sauerstoffpartialdruck.

Druck	ml O ₂ / 100 ml Blut (physikalisch gebunden)
atmosphärische Atemluft	0,3
1 bar reiner O ₂	2,1
2 bar reiner O ₂	4,4
3 bar reiner O ₂	6,8

Das Blut enthält bei 1 bar also schon die siebenfache Menge an physikalisch gelöstem Sauerstoff. In unserem Beispiel (75 Kg Taucher) also 126 ml. Ist auch nicht wirklich der absolute Knaller und durch diese 108 ml mehr Sauerstoff lassen sich die Höchstleistungen auch nicht erklären.

Betrachtet man die voranstehende Tabelle, kann man feststellen das zwischen 2 und 3 bar somit Werte entstehen, die theoretisch unter Ruhebedingungen eine Sauerstoffversorgung aller Körperzellen allein über die physikalische Bindung gewährleisten könnten.

Jetzt könnte die These aufgestellt werden, dass die innere Atmung auch ohne Hämoglobin funktionieren könnte. Dies funktioniert aber nur wenn man sich jeglicher körperlicher Belastung entzieht und andere Versorgungs- und Funktionsaspekte komplett außer Acht lässt!

Bei solchen Druckverhältnissen wird der Sauerstoffbedarf des Gewebes nun durch den physikalisch gebundenen Sauerstoff gedeckt. So kann das CO₂ auch nur auf diesem Weg aus dem Gewebe abtransportiert werden. Der Abtransport des CO₂ aus den Zellen wird also um eine Transportmöglichkeit verringert, da der chemisch gebundene Sauerstoff nicht in die Zellen diffundiert. Dadurch erhöht sich der PCO₂, das Atemzentrum wird stimuliert, dies wiederum steigert die Durchblutung des Gehirns, da die Kohlensäurespannung als Auslöser hierzu dient.

Der Anstieg des PCO₂ könnte man unter diesem Aspekt als sekundäre Toxizität des Sauerstoffes bezeichnen. Es löst eine Hypokapnie aus und wird sich als Azidose manifestieren. Der pH Wert des Blutes erreicht kritische Werte. Feierabend. Übertrieben kurz skizziert.

Die Azidose wirkt sich auf die verschiedenen Regelsysteme des Körpers aus. Da wir Apnoetaucher durch unser Training eine höhere Toleranzschwelle bezüglich der Auswirkungen des PCO₂ haben, treten diese Wirkungen nicht so schnell zu Tage.

Freitaucher atmen während des Tauchganges im Normalfall nicht ab, dadurch entsteht früher oder später eine respiratorische (atmungsbedingte) Azidose, wann ist wiederum vom Trainingszustand der Person abhängig.

Das entstandene Kohlenstoffdioxid (CO₂) führt zu einem erhöhten PCO₂, dadurch werden die Gehirngefäße erweitert (Vasodilatation) und die Autoregulation im Hirnbereich wird außer Kraft gesetzt. Durch die erweiterten Hirngefäße kommt es zu einer Erhöhung des Hirndrucks mit Symptomen wie Kopfschmerzen, Übelkeit und Verwirrheitszuständen. Wenn sich der PCO₂ um 1 mmHg erhöht, steigt das intracerebrale Blutvolumen um 1ml. Gehe ich nun von den Normalen Werten aus und berücksichtige nicht, dass Apnoetaucher in der Regel einen höheren CO₂ Pegel vertragen, dann erhöht sich das Blutvolumen im Gehirn um 25 ml! Als Grundlage habe ich die Schwellenwerte genommen, 35 mmHg PCO₂ und 60mmHg für die CO₂-Narkose. Für die meisten mag dieser Volumenzuwachs wenig sein, ich gebe zu bedenken dass das Gehirn jedoch allein durch seine sehr stark begrenzte Räumlichkeit, extrem empfindlich auf solche Zuwächse reagiert.

Der erhöhte Kohlendioxidgehalt des Blutes führt zu Blutdruck- und Pulsanstieg. Die rechte Hälfte des Herzens wird vermehrt belastet, da auch der Druck in der Lunge zunimmt. Die erhöhte Schlagfrequenz führt letztendlich zur Beeinträchtigung des Herzens. Bei einem starken Abfall des pH-Wertes auf etwa 7,1 kommt es zu einer Beschleunigung der Herzfrequenz (Tachykardie; Puls anhaltend über 100/min), Fällt der pH-Wert weiter: Es tritt eine Verlangsamung der Herzfrequenz ein (Bradykardie), dies weist auf eine gestörte Wirkung der Katecholamine (Adrenalin, Noradrenalin, Dopamin u. a.) hin. Diese Verminderung der Herzleistung und gleichzeitig des Spannungszustandes der Gefäße führen zur Hypotonie (niedriger Blutdruck ♂ 115 mmHg, ♀ 105 mmHg) und kann

lebensbedrohlich sein, da ein starker Blutdruckabfall und in der Folge ein Kreislaufversagen droht. Der durch die Azidose ausgelöste Kaliumanstieg im Blut aufgrund vermehrter Kaliumfreisetzung aus den Zellen kann zu Herzrhythmusstörungen führen.

Die oben erwähnte Hyperventilation bei dem Sauerstoffvoratmungs-Rekord diente dazu den PCO_2 zu senken, was die Senkung des Kohlendruckes zur Folge hat und die Durchblutung des Gehirnes um fast 50% reduziert! Des Weiteren wird durch diese Senkung natürlich der Zeitrahmen vergrößert, bis der Körper wieder soviel CO_2 produziert hat und die Atemreizschwelle erreicht wird. Die Gefahren, die durch die Anwendung dieser Technik auftreten können, werden im Artikel Hyperventilation näher beschrieben.

Als weitere Punkte hinsichtlich der Leistungssteigerung und für den "praktischen Gebrauch" des hochdosierten Sauerstoffes wesentlich interessanter, werden die Inertgase der Atemluft (78% N_2 und 1% sonstige Gase) durch Sauerstoff ersetzt. Allein dieser Umstand erhöht den nutzbaren Sauerstoffvorrat in der Lunge auf rund 375% über normal, was selbst bei einigen wenigen Atemzügen zu einer erheblichen Verbesserung der statischen Tauchzeit und beim Streckentauchen führt. Unserem fiktiven Probanden stehen bei der Sauerstoffvoratmung nun 6,311 L Sauerstoff zur Verfügung.

Bei solchen Rekorden wird etwa 30 Minuten reiner Sauerstoff geatmet. Obwohl doch schon nach wenigen Minuten die bisher genannten Ressourcen Hämoglobin und physikalische Transportkapazität gesättigt sind. Warum wird dann solange O_2 geatmet?

Unsere Gewebe sind beim Umgebungsdruck an Land natürlich ebenfalls mit Stickstoff gesättigt. Das Prinzip des Gleichgewichtes gilt in diesem Fall natürlich auch und da wir eine wesentlich längere Zeit unter dem 1 bar Druckverhältnis leben, sind alle Gewebe dem Druck entsprechend zu 100% mit Stickstoff gesättigt. Deshalb atmen wir ja auch die 78% N_2 bei jedem Atemzug wieder aus. Man geht davon aus dass pro Kg Körpergewicht etwa 0,014 L Stickstoff sich im Körper befindet. Bei einem 75 Kg Taucher wäre das 1,05 L Stickstoff. Da der Mensch über etwa 200 Gewebearten verfügt und diese sich unterschiedlich schnell sättigen und entsättigen (zwischen 5 und 640 Minuten) kann man davon ausgehen, das auch nach 30 min O_2 Atmung sich noch Stickstoff im Gewebe befindet. Die Körperstruktur spielt hier eine wesentliche Rolle. Ist man stark übergewichtig und untrainiert wird der N_2 langsamer abtransportiert als bei einem durchtrainierten Normalgewichtigen Athleten. Da im Blut bei der Sauerstoffatmung kein Stickstoff mehr vorhanden ist, diffundiert der Stickstoff vom Gewebe ins Blut und umgekehrt nimmt der Sauerstoff dessen Platz im Gewebe ein. Damit steht nun auch ein größerer Sauerstoffvorrat zur Verfügung.

Gehen wir von einem gut trainierten Athleten, mit geringem Fettanteil aus, können wir nochmal 0,7 L Sauerstoff gutschreiben. Nun hat er einen Sauerstoffbestand von rund 7 L. Bei einem optimalen Verbrauch von 300 ml/min wäre das dann eine Statikzeit von 23 Minuten. Ist doch ganz einfach, oder?

Warum wird Sauerstoff beim Tauchen giftig?

Obwohl Sauerstoff ein lebensnotwendiger Stoff für uns ist, fügt er uns ständig Schäden zu. Dies geschieht nicht nur während des Tauchgangs, sondern auch schon unter normobaren Bedingungen an Land. Wir merken nur nichts davon, weil der Körper über eine Reihe effektiver Schutzmechanismen verfügt.

Wenn wir sagen Sauerstoff wird ab einem Partialdruck von 1,6 bar giftig, so ist dies nicht so zu verstehen, dass sich die Eigenschaften des Sauerstoffs bei hohem Druck ändern, sondern die Schutzmechanismen des Körpers werden schlichtweg überfordert. Wie bei jedem Gift oder Medikament ist alles eine Frage der Dosierung und ein zu hoher Sauerstoffpartialdruck ist eine Überdosierung und somit für den Organismus giftig und bei geschwächten oder geschädigten Schutzmechanismen kann folglich hoch dosierter Sauerstoff auch unter normobaren Druck gefährlich werden.

Sauerstoff-Effekte, die schon unter normobaren Bedingungen (erhöhte Sauerstoffkonzentration bei normalem Umgebungsdruck) auftreten, werden bei einem Überangebot von Sauerstoff, also auch unter hyperbaren Bedingungen (Normale oder erhöhte Sauerstoffkonzentration bei erhöhtem Umgebungsdruck) verstärkt zur Wirkung kommen. Die Schutzmechanismen werden dann nicht mehr in der Lage sein, alle negativen Folgen des Sauerstoffes auszugleichen und die Schädigung oder Beeinträchtigung der Körperfunktionen wird fortschreiten.

Die giftige Dosis beim Tauchen setzt sich aus der Tiefe (Druck), Verweildauer und der persönlichen, sich stets ändernden Sauerstoffverträglichkeit zusammen.

Bei den Schädigungen durch den Sauerstoff sind für uns Apnoetaucher, im Prinzip nur die schnell auftretenden (ZNS – Paul-Bert-Effekt) von primärer Relevanz. Allerdings sollte man sich meiner Meinung nach nicht den anderen Schädigungen verschließen oder sie als uninteressant abtun. Oft kann eine noch unbekannt Vorschädigung durch den Gebrauch hochdosierten Sauerstoffes forciert werden. Sei es nun durch das Tauchen mit NITROX oder anderer "hochprozentiger" Atemluftgemische aus dem Bereich des Technischen Tauchens, häufige Druckkammerfahrten oder eben durch den regelmäßigen Gebrauch von Sauerstoff um der Dekompressionskrankheit vorzubeugen.

Die Lunge und das zentrale Nervensystem sind natürlich nicht die einzigen Bereiche, die durch die Schädigung betroffen sind. Kapillarendothels (Schicht in Blutgefäßen), Herzmuskel, Leber, Nieren oder Erythrozyten sind diesen Schädigungsmechanismen ebenfalls ausgesetzt. Der Umfang der Schädigung ist von Druck, Einwirkzeit und der individuellen Anfälligkeit der entsprechenden Bereiche abhängig. Da die Grenzen hierfür nicht absolut klar gezogen werden können, ist es dementsprechend schwierig allgemeingültige Empfehlungen zu treffen, welche die Unversehrtheit des Einzelnen garantieren. Von den beobachteten Vergiftungserscheinungen sind im wesentlichen die Schädigung des Surfactants (pulmonale Sauerstoffvergiftung/Lorrain-Smith-Effekt) und die zerebrale Sauerstoffvergiftung (Paul Bert Effekt) am besten dokumentiert und erforscht.

Reiner Sauerstoff kann in der Regel bei einem Druck von 1 bar über mehrere Stunden geatmet werden, wenn keine Vorschädigungen vorliegen.

Folgende Ausführungen beziehen sich auf eine stationäre Behandlung und sind im Prinzip für den Taucher nicht unbedingt relevant, jedoch finde ich, dass solche Informationen hinsichtlich eines möglichen Gesamtablaufes bei einem schweren Tauchunfall hilfreich für das Verständnis sind. Bei einer Beatmung über mehrere Tage muss der O₂ Gehalt auf mindestens 60%-40% bei 0,6 bar gesenkt werden. Der Sauerstoff kann sonst, auch bei gesunden Menschen, die Lipid-Proteinschicht auf der Innenseite der Alveolen schädigen oder sogar zerstören (Lorrain-Smith-Effekt). Bliebe der O₂ Gehalt bei 100% und diesem Druck, so müsste man nach 11-15 Stunden mit Schädigungen rechnen. Ob diese Beeinträchtigungen reversibel sind, hängt zu einem nicht unerheblichen Teil von der jeweiligen Person ab.

Diese Werte gelten für den Druckkammerbetrieb ohne körperliche Belastung! Mit körperlicher Belastung verkürzen sich diese Zeiten drastisch, dies kann man entsprechend auf den Tauchgang übertragen. Wobei die Tauchzeit natürlich wesentlich kürzer ist und im Wesentlichen für Berufstaucher interessant ist.

Es können sich auch individuell abweichende Werte ergeben, wenn bei der ärztlichen Voruntersuchung eine entsprechende Diagnose gestellt wird.

Aus diesen Gründen empfiehlt sich, meiner Meinung nach, vor der ersten Anwendung, sowie die regelmäßige Anwendung von O₂, auch unter normalem Umgebungsdruck, mit seinem Taucharzt zu besprechen. Der Arzt kann dann auch bei der jährlichen Tauglichkeitsuntersuchung auf eventuell bestehende Schädigungen hin untersuchen, auf entsprechende Symptome verstärkt achten oder auftretende Symptome besser zuordnen.

Es wurde beobachtet, dass bei einem erhöhten Kohlendioxidpartialdruck (PCO₂) die Empfindlichkeit gegenüber einer Sauerstoff-Vergiftung zunimmt, was für Freitaucher wiederum interessanter ist als für Gerätetaucher, da diese ihr anfallendes CO₂ ohne Probleme abatmen können.

Man hat bislang zwei Erklärungsmöglichkeiten für diese Beobachtung.

1. Wie schon erwähnt, wirkt Kohlendioxid gefäßerweiternd. Dadurch erhöht sich die Durchblutung des Gehirns und die Zufuhr an Sauerstoff wird gesteigert. Dies ist unter normobaren Bedingungen eine durchaus sinnvolle Reaktion, aber bei einem ohnehin schon erhöhten Sauerstoffpartialdruck, bei dem Sauerstoffmengen angeliefert werden, die das Gehirn bei weitem nicht benötigt, kommen dann die schädlichen Nebenwirkungen des Sauerstoffs verstärkt zum Tragen.

2. Die Hyperkapnie (erhöhter PCO_2) führt zu einer gesteigerten Catecholamin-Produktion im Zentralnervensystem (Catecholamine gehören zu den dort wirkenden Neurotransmittern). Diese Catecholamine müssen auch wieder abgebaut werden, was durch das Enzym Monoaminoxidase unter Bildung von Wasserstoffperoxid geschieht. Da die Sauerstoff-Vergiftung nicht direkt durch Sauerstoffmoleküle, sondern durch die Bildung unerwünschter reaktiver Folgeprodukte erfolgt, zu denen auch Wasserstoffperoxyd gehört, treten Vergiftungerscheinungen durch diese zusätzliche Produktion von Wasserstoffperoxyd schneller auf.

Was geschieht wenn folgende Grenzwerte des PO_2 erreicht werden (Normalwerte!)?

- < 0,04 Bar = spontane Ohnmacht <35 mmHg PO_2 ; wobei laut Dr. Muth bei Apnoeisten schon Werte von 25mmHg gemessen wurden!
- 0,05 bar (40 mmHg; 75% saO_2) Grenzwert mit abnehmenden Körper-Funktionen
- 0,06 Bar absoluter Grenzwert zur Versorgung aller Gewebe (50 mmHg; 85% saO_2)
- 0,07 Bar hypoxisch (90% saO_2)
- 0,16 Bar = Minimaler Teildruck für normale Lebensfunktionen
- 0,21 Bar = Normalwert
- 0,30 Bar = Grenze für Langzeitaufenthalte ohne Lungenschädigung
- 0,50 Bar = Grenze für längere Tauchgänge
- 1,40 Bar = Maximalgrenze für Tauchgänge, bei Anstrengung / Kälte
- 1,60 Bar = Maximalwert für Dekompression in Ruhe
- 2,0 Bar - bis 4,0 Bar - Werte für Behandlung in der Druckkammer

Sauerstoffschädigungsmechanismen-, die im gesamten Körper vorkommen

Da Sauerstoff im gesamten Körper benötigt wird, können dementsprechend Schädigungen erfolgen. Eine hohe Wahrscheinlichkeit von Schäden durch Sauerstoff besteht überall dort, wo Sauerstoff in intensiven Kontakt mit Fe^{2+} oder Ubisemichinon (entsteht aus Ubimichinon oder auch Coenzym Q_{10} genannt) tritt.

Fe^{2+} kommt im Körper nicht in freier Form vor, sondern ist immer an andere Moleküle gebunden. 67% des gesamten Eisens des menschlichen Körpers befinden sich im roten Blutfarbstoff, dem Hämoglobin, und somit in den roten Blutkörperchen (Erythrozyten). Das Hämoglobin besteht aus Proteinanteilen, dem Globin, und einem Nicht-Protein-Anteil, dem Häm. Im Zentrum des Häms liegt das Fe^{2+} .

Die Funktion des Hämoglobins besteht darin, Sauerstoff von der Lunge zu den verschiedenen Zellen zu transportieren, wobei der Sauerstoff während des Transports am Eisenion gebunden wird. Normalerweise wird der Sauerstoff am Ort des Bedarfs freigesetzt, ohne dass es zu Elektronenübertragungen zwischen Sauerstoff und Eisen kommt, manchmal jedoch geschieht die oben beschriebene Redoxreaktion. Dies hat gleich zwei negative Konsequenzen, zum einen die Bildung von freien Radikalen mit allen Folgen, zum anderen wird das Zentralion des Häms zu Fe^{3+} . Ist das der Fall, dann nennt man das gesamte Molekül nicht mehr Hämoglobin sondern Methämoglobin. Sauerstoff kann nur an Fe^{2+} , nicht jedoch an Fe^{3+} gebunden werden, Methämoglobin ist somit nicht in der Lage, Sauerstoff zu transportieren und stellt dadurch nur noch unbrauchbaren Ballast dar. Ungefähr 3% des gesamten Hämoglobins werden täglich zu Methämoglobin umgesetzt, wobei sich etwa 50 mg Superoxidanionen bilden.

Ein weiterer Ort an dem freie Radikale entstehen, sind die Mitochondrien der Zellen. Mitochondrien sind die Zellen, in denen die oben erwähnte innere Atmung in vier Schritten abläuft. Sie sind in fast allen Zellen in mehr oder weniger großer Anzahl vorhanden, da sie eine herausragende Rolle bei der Energieversorgung der Zellen spielen. Läuft die Atmungskette regulär ab, so werden insgesamt vier Elektronen auf ein Sauerstoffmolekül übertragen, das letztlich zu Wasser umgesetzt wird. Die potentiell giftigen Zwischenprodukte werden dabei von einem Enzym mit der Bezeichnung Cytochromoxidase festgehalten und können nicht in die Umgebung entkommen bis das harmlose

Endprodukt Wasser entstanden ist. Bevor jedoch die Elektronen beim Durchlaufen der Atmungskette die Cytochromoxidase erreichen, können sie von einem Bestandteil der Atmungskette, dem schon erwähnten Ubisemichinon direkt auf freien Sauerstoff übertragen werden. Dies stellt praktisch ein Leck dar, wobei normalerweise knapp 1% der transportierten Elektronen auf diese Weise der regulären Atmungskette entkommen und zur Entstehung von freien Radikalen führen.

Das hört sich natürlich besorgniserregender an, als es in Wirklichkeit ist. Unter normalen Umständen kann unser Körper diese Gefährdungen problemlos neutralisieren. Wenn man sich im Maximaltraining befindet oder im Aufbautraining sollte man sich vorher durch ein Blutbild entsprechende Informationen holen, ob man hier schon Defizite aufweist. Diese kann man durch eine entsprechende Ernährungsanpassung dann korrigieren.

Die Wirkung der freien Radikale wird im gleichnamigen Artikel beschrieben.

Durch Sauerstoff verursachte Schäden in der Lunge Lorrain-Smith-Effekt

Dass die Lunge ein von Sauerstoffvergiftung bevorzugt betroffenes Organ ist, ist leicht nachvollziehbar, da sie diesen dem Körper zuführt und dort der Sauerstoff auch in geballter Form vorliegt. Innerhalb der Lunge gibt es das Surfactant (surface active agent), welches enorm wichtig für die Atmung ist. Surfactant bildet an der Schnittstelle zwischen Luft und der wässrigen Oberfläche der Alveolen einen Film, der durch Herabsetzen der Oberflächenspannung ein Kollabieren der Alveolen verhindert. Ohne Surfactant wäre die Kraft, die zur Öffnung der Alveolen nötig wäre, auf Grund der Adhäsionskräfte extrem groß. Die Alveolen würden einfach ineinander verkleben. Die Zerstörung dieser Schicht zieht den Kollaps der Alveolen nach sich und bewirkt die zunehmende Verringerung des Lungenvolumens. Anfänglich sind die Schädigungen noch reversibel und werden von der betroffenen Person auch nicht sofort als Defizit erkannt. Erst bei fortgeschrittener Schädigung und spürbarer, permanenter Atemnot würde der Betroffene einen Arzt aufsuchen.

Surfactant besteht zu 90% aus Phospholipiden, die zentraler Bestandteil aller biologischen Membranen sind und vielfältige biologische Funktionen wahrnehmen, und zu 10% aus Proteinen. Damit ist sie Ziel für die Wirkung von freien Radikalen. Einerseits schützt Surfactant die Membranen der Alveolarzellen vor oxidativen Schäden, andererseits wird der Surfactant selbst dabei geschädigt. Stärkere Schädigungen äußern sich in Störungen der Gasdifffusion, Atemnot und können letztendlich ein Lungenödem zur Folge haben. Bei Langzeitanwendungen wurden hier auch Verkleinerungen der Vitalkapazität (VC) festgestellt. Schädigungen dieser Art schreiten bei gesunden Menschen langsam voran.

Folgen bei der Zerstörung der Surfactant (mittel-; langfristige Schädigung):

- Verdickung der Membran
- Anschwellen und Ödembildung der Alveole
- Es droht Erstickungstod!

Symptome:

- Engegefühl unter dem Brustbein
- Schmerzen in den Bronchien
- quälende Atemnot
- unbeherrschbarer Hustenreiz
- Abnahme der Vitalkapazität.

Durch Sauerstoff verursachte Schäden des Zentralnervensystems (ZNS) Paul Bert Effekt

Die Sauerstoffvergiftung des ZNS kann sich durch Kopfschmerzen, Lippenzittern, innere Unruhe, Ohrgeräusche, Augenflimmern und Schwindel ankündigen, sie kann aber auch ganz schlagartig als schwerer Krampfanfall in Erscheinung treten.

Ein hoher PO_2 hemmt eine Reihe von Enzymen und es bilden sich schädliche Sauerstoffradikale, so dass Teile des Zellstoffwechsels blockiert werden. Es wird unter anderem die Gamma-Aminobuttersäure (GABA) gehemmt.

Die Symptome der Sauerstoffvergiftung als Folge eines erniedrigten GABA-Spiegels lassen sich erklären, wenn man sich die Funktion der GABA vor Augen hält. GABA gehört zu den Neurotransmittern, das heißt zu den Botenstoffen, die Nervensignale von einer Zelle zur nächsten Zelle übertragen. GABA ist ein wichtiger, hemmender Neurotransmitter, vermindert also die Wirkung aktivierender Neurotransmitter. Fällt dieses hemmende Enzym weg, können Nerven in einigen Bereichen ungehemmte Aktivität entfalten, wodurch im Bereich der motorischen Nerven Muskelkrämpfe die Folge sind.

Die allgemeinen Symptome einer O_2 –Vergiftung (ZNS):

- Augenflimmern (Sehschärfe)
- Übelkeit
- Muskelzuckungen
- Epilepsie ähnliche Anfälle
- Bewusstlosigkeit

Gegenmaßnahme vor Ort:

- Die normale Luftatmung wieder herstellen (Druckkammer, Oberfläche)
- Tauchtiefe verringern

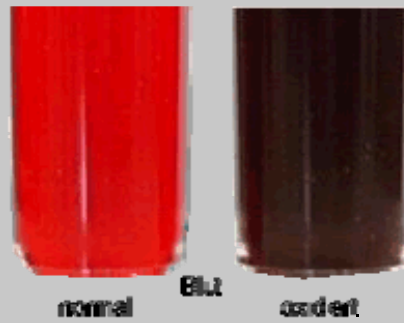
Wie schützt sich der Körper gegen die Schädigung durch Sauerstoff?

Wenn man sich die vielfältigen möglichen Schäden, die durch Sauerstoff verursacht werden können, betrachtet, muss man sich eigentlich wundern, dass wir überhaupt noch leben. Schon eine einfache Rechnung zeigt, dass die Situation dann doch nicht ganz so einfach sein kann.

Wie oben erwähnt, werden täglich 3% des Hämoglobins zu Methämoglobin umgesetzt, dies würde bedeuten das innerhalb von etwa einem Monat kein funktionsfähiges Hämoglobin mehr vorhanden sein dürfte. Berücksichtigt man die Bildungsgeschwindigkeit neuer Erythrozyten, so können innerhalb dieser Zeitspanne etwas mehr als ein viertel des "alten Hämoglobins" durch neues ersetzt werden, was natürlich auch nicht ausreicht, um lebensfähig zu bleiben.

Die realen Konzentrationen an Methämoglobin liegen bei Nichtrauchern unter 0,8% und bei Rauchern bei bis zu 2,7%.

Methämoglobin	Beschwerden, Anzeichen
kleiner 5 %	meist keine Beschwerden oder Zeichen
15 - 20 %	Leichte Zyanose (Blausucht; bes. der Lippen), Kopfschmerzen, Benommenheit
20 - 45 %	Deutliche Zyanose, Übelkeit
Ab etwa 30%	das Blut ist deutlich brauner
45 - 70 %	Schwere Zyanose, Erbrechen, Verwirrtheit, Kollaps
über 70 %	Tod



Es muss also Mechanismen geben, die solche Schädigungen wieder umkehren können. In diesem Fall ist es das NADH-Methämoglobin-Reduktase-System ein Enzymsystem, welches Methämoglobin wieder zu Hämoglobin unter Mitwirkung eines in der Zelle vorkommenden Reduktionsmittels reduzieren kann.

Der Körper verfügt über Möglichkeiten, vorhandene Schäden teilweise zu reparieren, oder aber freie Radikale in ungefährlichere Substanzen umzusetzen bevor ein Schaden entsteht. Prinzipiell sind zwei Mechanismen dafür vorhanden:

- nicht-enzymatisch oder
- enzymatisch.

Eine nicht-enzymatische Schutzwirkung wird durch Antioxidantien wie die Vitamine E, C und A hervorgerufen. Diese Stoffe sind in der Lage, Radikale abzufangen und somit Kettenreaktionen der Radikale zu unterbrechen. Vitamin E ist besonders gut geeignet, Membranschäden durch Lipidperoxidation zu verhindern, da es selbst gut lipidlöslich ist und sich so in die Membran einlagern kann.

Zu den Enzymen, die eine Reparatur- oder Schutzwirkung haben, gehören neben der erwähnten Methämoglobin-Reduktase die Superoxid Dismutase, Katalase, Glutathion-Peroxidase, Glutathion-Reduktase sowie Enzyme des Pentosephosphat-Wegs. Die Bedeutung dieser Enzyme erkennt man bei seltenen Erbkrankheiten, bei denen eines dieser Enzyme defekt ist. Solche Patienten sind anfälliger gegen oxidativen Stress.

Ich führe diese Vorgänge hier auf, jedoch nicht näher darauf eingehen, da diese doch recht umfangreich und nicht unmittelbar beeinflussbar sind.

Die Erforschung der freien Radikale hat in den letzten Jahren einen Boom erfahren und aus diesem Grund kennt man deren Wirkungsweise recht gut. Jedoch bleiben, insbesondere im Bereich der Gehirnfunktionen, viele offene Fragen. Derzeit wird auch die These geführt, dass freie Radikale an der Sauerstoffvergiftung beteiligt sind, allerdings verfügt man bislang noch nicht über schlüssige Nachweise.

Fazit

Für den Hobbytaucher ist es in meinen Augen nicht erforderlich sich per Sauerstoff vor den Gefahren der DCS zu schützen. Hier gibt es genügend kostengünstigere Maßnahmen um sich nicht in Gefahr zu bringen.

Für den Bereich der ambitionierten Athleten, die sich jenseits der -40m Marke bewegen und eine entsprechende Trainingsintensität aufweisen um in den Spitzensport vorzustoßen ist es eine Überlegung wert sich mit der entsprechenden Ausstattung und Ausbildung zu versorgen. Für den etablierten Spitzensportler sollte es eigentlich Standard sein.

Wenn hochdosierter Sauerstoff im Trainingslager als Daueranwendung zum Einsatz kommt, sollte man dies unbedingt mit seinem Mediziner absprechen, insbesondere wenn es schon einmal Lungenprobleme gab. Natürlich kann ein entsprechend ausgebildeter Mediziner auch keine Gewährleistung übernehmen, dass es zu keinen Vorfällen kommt, aber er kann durch eine individuelle Diagnose, eine Prognose über mögliche Gefährdungspotentiale abgeben. Hinsichtlich der Schädigungsszenarien, die man in kurzfristige und mittelfristige Auswirkungen einteilen kann, sollte man doch Blutbild und Lungenfunktion, auch im Vorfeld einer massiven Anwendung, etwas genauer im Blick haben. Während sich die kurzfristigen Auswirkungen über das ZNS direkt bemerkbar machen, können sich die langfristigen Wirkungen in einer sehr schleichenden, kaum wahrnehmbaren Form ihren Tribut nach einem größeren Zeitraum fordern.

Was sich bei den mittelfristigen Schädigungen auf einen ständigen und auch nicht fachgerechten Gebrauch von hoch dosiertem Sauerstoff bezieht, kann im kurzfristigen Bereich schon beim ersten Gebrauch eintreten.

Man muss auch immer bedenken, dass innerhalb des Körpers sehr viele Vorgänge gleichzeitig und oft auch in einer Abhängigkeit voneinander ablaufen. Hier ist lediglich der Aspekt Sauerstoff für sich grob angerissen worden, andere Abläufe die ebenfalls entscheidende Einflüsse haben, werden als Einzelthemen in anderen Artikeln abgehandelt. O₂, CO₂, N₂, Laktat, Blutzucker, Hormone, Enzyme und vieles mehr ergeben ein Orchester, das selbst die heutigen Mediziner nicht wirklich in allen Details dirigieren können.

Für einen körperlich gesunden Menschen, der auch noch in der glücklichen Lage ist über einen gesunden Menschenverstand zu verfügen, stellt der fach- und sachgerechte Gebrauch von hoch dosiertem Sauerstoff keine Gefahr dar.

Die größte Gefährdung sehe ich in den Bereichen der Fehlinformation, bei ausgelassenen Pausen zwischen der Sauerstoffatmung und dem Abtauchen, oder gar das Tieftauchen mit einer sauerstoffgefüllten Lunge.

Die Sauerstoffprophylaxe mag dem DCS Risiko effektiv entgegenwirken, man sollte jedoch andere Aspekte wie den Tiefenrausch nicht vernachlässigen. Bei erfahrenen Tauchern mag dies ein geringeres Problem sein, da sie mehr oder weniger an den Rausch gewöhnt sind. Wie sieht es aber bei Einsteigern aus, die sich mit der Sauerstoffmethode im Training dermaßen pushen und mehr Tauchgänge absolvieren um rasch in die Spitzengruppe vorzustoßen. Sie verlassen sich auf den schützenden Charakter des Sauerstoffes.

Der Tiefenrausch wird bei Apnoetauchern eben nicht in 31 m zur Wirkung kommen sondern später (Gas-Masseverhältnis Gerätetaucher – Freitaucher). Sie sind an ein niedriges N₂ Level gewohnt, da sie nach jedem Tauchgang ihr N₂ Level durch Sauerstoffatmung wieder herunterdrücken, dadurch sind sie entsprechend anfälliger für den Tiefenrausch, wenn sie im Wettkampfbereich auf den Sauerstoff verzichten müssen.

Der Tiefenrausch nimmt in der Tauchunfallstatistik der Gerätetaucher auch einen der vorderen Plätze ein.

Letztendlich muss jeder für sich entscheiden ob und wie viel Technik er einsetzen will. Im Prinzip betreiben wir als Apnoeisten einen nativen Sport und sollten ohne große technische Ausrüstung auskommen.

Quellen

- <http://www.watersafety.net/>: Technische Belange; Ausstattung
- <http://www.scuba-sicherheitstechnik.de/>: Sicherheit bei Tauchflaschen, Kennzeichnung, Transport
- http://www.bmvbs.de/Verkehr/Gesetze_-Verordnungen_-Richtli-,2840/Integrierte-Verkehrspolitik.htm Hier findet man die aktuellen Texte der GGVS/ADR
- **Notfallmanager Tauchunfall** ISBN 3-609-68840-8
- **Der neue Ehm – Tauchen noch sicherer** ISBN 3-275-01216-9
- **Bau und Funktion des menschlichen Körpers** ISBN 3-437-26190-8
- **Sauerstoff – Mythos und Wirklichkeit**; Dr. med. C. M. Muth
- **Sauerstoffintoxikation**; Dr. M. Almeling
- **Moderne Tauchmedizin**; Klingmann und Tezlaff ISBN 3-87247-645-9