

WALDEMAR BOCZEK · JENS HILBERT

# Tauchen mit Sauerstoff- Kreislaufgeräten

**SSI** SCUBA SCHOOLS INT.  
® Albrecht Salm  
Instructor No. 12653

AS



**PADI**

**Albrecht Salm**  
Master Scuba Diver Trainer  
PADI MSDT # 33913

12/2008

אלבי

**Delius Klasing**  
EDITION NAGLSCHMID

Alle in diesem Buch enthaltenen Angaben, Daten, Ergebnisse usw. wurden von den Autoren nach bestem Wissen erstellt und von ihnen und vom Verlag mit größtmöglicher Sorgfalt überprüft. Gleichwohl sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen. Daher erfolgen die gemachten Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung oder Garantie des Verlages und der Autoren. Sie alle übernehmen keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Baden, Schnorcheln, Tauchen und Technisches Tauchen können Gefahrenmomente beinhalten, die sich allein durch ständiges Training und sachkundige Ausbildung bei lizenzierten Tauchschiulen und Vereinen minimieren lassen. Wir empfehlen dringend, nur innerhalb der durch Ausbildung, eigene Erfahrung und Tagesform gesetzten Grenzen zu tauchen. Der Verlag und die Autoren übernehmen keine Haftung für Unfälle oder Todesfälle, die aufgrund von Informationen aus diesem Buch entstanden sind oder sein könnten.

Geschützte Warennamen und Warenzeichen werden nicht besonders gekennzeichnet. Aus dem Fehlen solcher Hinweise kann also nicht geschlossen werden, dass es sich um einen freien Warennamen oder ein freies Warenzeichen handelt.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Auflage  
ISBN 978-3-7688-2422-4  
© Verlag Stephanie Naglschmid, Stuttgart / Delius, Klasing & Co. KG, Bielefeld

Herausgeber: Dr. Friedrich Naglschmid  
Fotos: Boczek, Waldemar 11, 16, 17, 28, 30, 31, 34, 35 u., 40, 41, 42, 43, 46, 47 l. o., 50, 63, 91, 96, 97, 98, 99, 100, 104 r. u., 105 l. o., 106 r., 115, 116, 117, 123, 126, 127, 128; Comper, Walter 19; Firma A.P.D. Germany 21; Firma Dräger 84 u., 125 o. und l. u.; Firma Mavotec 121, 125 r. u.; Hartwig, Thomas 92; Hilsenbeck, Andreas 8, 25, 26, 47 r. M., 49, 66, 69, 70, 72, 74, 75, 87 u., 101, 102, 103, 107, 119, 120, 130 u., 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137; Jung, Michael 12, 13, 15; Kotzur, Anja 36 o.; Krause, Daniel 106 l. o.; Nittel, Markus 130 o. r.; Probst, Norbert 10, 105 l. u., 109 r.; Rusch, Bernd 31 o. l., 32, 36 u., 37, 38, 39, 45, 84 o., 85, 87 o., 104 l., 105 r. u.; Verlag Naglschmid 64, 107 u., 109, 114.  
Grafiken: Boczek, Waldemar 18, 22, 23, 24, 27, 44 Mitte, 45, 53, 54, 56, 73, 78, 80, 81, 90, 102, 113; Firma Dräger 20, 29, 33 oben, 40, 44 o. und u.; Hartwig, Thomas 88, 92, 93, 94; Hilsenbeck, Andreas 124; Scheyer, Werner 33 u., 51, 122.  
Titelbild: Andreas Hilsenbeck  
Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg  
Printed in Germany 2008

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Vertrieb: Delius Klasing Verlag, Siekerwall 21, D - 33602 Bielefeld  
Tel.: 0521/559-0, Fax: 0521/559-115  
E-Mail: [info@delius-klasing.de](mailto:info@delius-klasing.de)  
[www.delius-klasing.de](http://www.delius-klasing.de)

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	7
<b>1. Wir über uns – warum dieses Buch entstand</b> .....	8
<b>2. Warum Sauerstoff-Kreislaufgeräte?</b> .....	10
<b>3. Historie oder »Auf den Spuren von Hans Hass«</b> .....	12
<b>4. Tauchgeräte</b> .....	19
<b>5. Vor- und Nachteile von Sauerstoff-Kreislaufgeräten</b> .....	25
<b>6. Rebreather-Bauteile</b> .....	29
<b>7. Rund um den Sauerstoff</b> .....	48
<b>8. Tauchmedizin</b> .....	52
<b>9. Atemkalk</b> .....	83
<b>10. Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten</b> .....	96
<b>11. Besonderheiten beim Tauchen mit Sauerstoff</b> .....	118
<b>12. Sauerstoff-Umfüllanlagen</b> .....	121
<b>13. Tauchausbildung</b> .....	126
<b>Anhang</b>	
<b>Formeln und Tabellen</b> .....	138
<b>Danksagung</b> .....	142
<b>Register</b> .....	143
<b>Die Autoren</b> .....	152

## Verehrte Leserinnen und Leser,

unabdingbare Voraussetzungen für die sichere und verantwortungsbewusste Durchführung eines jeden Tauchganges sind eine fundierte Ausbildung, eine passende Ausrüstung und ein Mindestmaß an Erfahrung. Dies gilt insbesondere für die in diesem Buch abgehandelte Tauchdisziplin, das Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten. »Tauchen gehört nicht zu den gefährlichen Sportarten, jedoch kann es bei fehlerhafter Planung und unsachgemäßer Ausführung eines Tauchgangs im Einzelfall zu ernsthaften Komplikationen bis hin zu tödlichen Zwischenfällen kommen.« Das vorliegende Buch ist als begleitendes Ausbildungsmaterial für das Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten gedacht.

Dieses Buch ersetzt auf keinen Fall eine qualifizierte Ausbildung durch eine anerkannte Ausbildungsorganisation.

Wie in allen Bereichen der Technik, der Medizin und der Naturwissenschaften ist auch im Bereich des Tauchens mit Sauerstoffgeräten mit steter Weiterentwicklung durch Zugewinn an Kenntnissen und Erfahrungen. Solche Entwicklungen können zu Veränderungen der Vorgaben und Vorschriften führen.

Wir empfehlen daher jedem Taucher, der Sauerstoffgeräte einsetzen möchte, sich an entsprechend qualifizierte Institutionen zu wenden und sich im Interesse seiner Sicherheit regelmäßig weiterzubilden.

*Waldemar Boczek und Jens Hilbert*

## 1. Wir über uns – warum dieses Buch entstand

Jeder der leidenschaftlich eine Sportart ausübt oder sich intensiv mit einem Hobby beschäftigt, stößt früher oder später unweigerlich an Grenzen. Was wir damit meinen, sei im Folgenden kurz dargestellt. Millionen von Tauchern steigen jährlich ins Wasser und erfreuen sich an ihrem Sport. Viele von ihnen betrachten ihre Ausrüstung als Mittel zum Zweck, ohne sich jemals mit der dahinterstehenden Technik auseinandergesetzt zu haben. Nur wenige versuchen zu erfahren, wie z. B. ein Atemregler genau funktioniert. Wer sich mit diesem kleinen Wunderwerk zwischen Mund und Flasche auseinandersetzt, kommt auf Dauer nicht umhin, sich mit der heutzutage sehr umfangreichen Fach-

literatur zu beschäftigen. Interessierte, die einen Schritt weitergehen und sich mit Materialien, Legierungen und unterschiedlichen Dichtungen beschäftigen, werden mit einer Flut an Informationen konfrontiert, die kaum ein Hobbytaucher mit vertretbarem Aufwand bewältigen können. Jeder Tauchbegeisterte, der den Wunsch hat, sich über die technische Seite des Tauchens kundig zu machen, wird feststellen, dass keines der heute verfügbaren Fachwerke alle ihn interessierenden Themen und Aspekte der Tauchtechnik zufriedenstellend abhandelt. Gerade jene umfangreichen Fachwerke, die in ihrer Inhaltsangabe versichern, sich mit allem Wissenswerten zu beschäftigen,



In der Verzasca, einem idealen Tauchrevier für Sauerstoff-Kreislauf-Tauchgeräte.

können diesen Anspruch meistens nicht erfüllen. Oft werden Probleme des Tauchens angesprochen oder Teilbereiche des Gesamtgebietes abgehandelt, ohne jedoch Antworten auf drängende Fragen zu geben. Vielfach ist der Interessierte gezwungen, selber zu recherchieren und zu versuchen, die passende Lösung durch das Studium weiterer Quellen zu finden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Wissbegierige gezwungen ist, einen erheblichen Umfang an Zeit und Energie zu investieren, um mithilfe der heute verfügbaren Medien, dem Internet, der Fachliteratur sowie Informationsbroschüren oder Zeitschriftenartikeln die richtigen Antworten auf seine Fragen zur Tauchtechnik zu erhalten. Das vorliegende Buch richtet sich deshalb an alle Tauchbegeisterten, deren Wunsch es ist, sich umfassend über die Grundlagen des Sauerstoff-Kreislauf-Tauchens zu informieren. Des Weiteren war es uns ein Anliegen, Aussagen, die in vielen Medien immer wieder falsch dargestellt werden, zu korrigieren und richtigzustellen. Verfasst wurde dieses Werk von Militär- und Berufstauchern sowie Experten mit langjähriger Erfahrung auf diesem Spezialgebiet des Tauchens, deren Absicht es war, eine Lücke in der einschlägigen Literatur zu schließen. Das Ziel dieser Abhandlung besteht darin, alle für das facettenreiche Gebiet des Sauerstoff-Kreislauf-Tauchens relevanten Themen zu behandeln und dem Leser den Einstieg in diese faszinierende Tauchdisziplin sowie das notwen-

dige theoretische Rüstzeug zu vermitteln. Keinesfalls erhebt dieses Buch Anspruch auf Vollständigkeit.

Es wäre vermessen zu behaupten, im Informationszeitalter eine vollständige Übersicht über alle für das Sauerstoff-Kreislauf-Tauchen relevanten Entwicklungen und Erkenntnisse aus den Bereichen Technik, Naturwissenschaften und Medizin in Form eines einzigen Buches herausgeben zu können.

Vielmehr soll dieses Buch dem Interessierten alle notwendigen Informationen zum Thema Sauerstoff-Kreislauf-Tauchen zur Verfügung stellen und ihm die Kenntnisse und Erfahrungen ausgewiesener Experten auf diesem Gebiet des Tauchens nutzbar machen.

## 2. Warum Sauerstoff-Kreislaufgeräte?

Das Tauchen mit O<sub>2</sub>-Kreislaufgeräten bietet verschiedene Vorteile. Diese Systeme ermöglichen sowohl blasenfreies, fast lautloses Tauchen als auch lange Tauchzeiten. Diese Vorteile gegenüber mit Pressluft arbeitenden Geräten machten Sauerstoff-Kreislaufgeräte zuerst für militärische Verwendungen interessant. Nicht ohne Grund erfreuen sich Rebreather großer Beliebtheit bei Kampfschwimmereinheiten und anderen militärischen Spezialisten, die unter Wasser agieren. Die Vorteile des Tauchens mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten wurden auch

von zivilen Tauchern wie z. B. Biologen, Fotografen oder Unterwasserarchäologen entdeckt. So gestattet etwa die Möglichkeit »lautlos« zu tauchen dem Biologen, nahe an ein ihn interessierendes aquatisches Lebewesen heranzuschwimmen, ohne es zu verscheuchen. Taucher, die sich mit Unterwasserforschungen befassen, können sich aufgrund der langen Tauchzeiten besonders intensiv mit ihren Studienobjekten befassen. Diese Argumente überzeugten schließlich immer mehr Tauchinteressierte, nicht zuletzt auch Sporttaucher.



Militärtaucher bei der Navigation.

Mit dem zunehmenden Interesse am Sauerstoff-Kreislauftauchen entstand der Bedarf an qualifizierter Anleitung und Ausbildung in dieser Spezialdisziplin des Tauchens. Überall dort, wo es nicht darum geht, große Tauchtiefen zu erreichen, finden O<sub>2</sub>-Kreislaufgeräte immer stärkere Beachtung. So rücken Rebreather auf internationalen Messen und Präsentationen zunehmend in den Vordergrund.

Auf keinen Fall darf übersehen werden, dass eine gute Ausbildung im Umgang mit diesem Typ von Tauchgeräten von entscheidender Bedeutung ist. Unachtsamkeit und Fehler im Umgang mit Rebreathern können schnell zur lebensbedrohlichen Gefahr werden. So wäre etwa Hans Hass, der legendäre Naturforscher und Tauchpionier und gleichzeitig einer der bekanntesten Vertreter des Sauerstoff-Kreislauftauchens fast den Tücken dieses Systems zum Opfer gefallen.

*Falscher Umgang mit O<sub>2</sub>-Kreislaufgeräten kann bereits bei geringen Tauchtiefen gefährlich werden!*

Wir weisen an dieser Stelle ausdrücklich darauf hin, dass sich Rebreather technisch und von ihrem Tauchverhalten her gegenüber anderen Systemen unterscheiden. Jeder Tauchbegeisterte, der über eine gute Ausbildung im Umgang mit Rebreathern verfügt, kann die Vorteile dieses Tauchsystems genießen, ohne sich vermeidbaren Gefahren auszusetzen. Dem Aktiven, der Sauerstoff-Kreislaufgeräte einsetzt und sich über deren Möglichkeiten und Grenzen im Klaren ist, eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten, sich in der Welt unter Wasser zu bewegen.



Fotografen und Unterwasserfilmer können durch die geräuscharmen Sauerstoff-Kreislaufgeräte sehr nahe an Tiere herantauchen.

### 3. Historie oder »Auf den Spuren von Hans Hass«

Das Meer hat schon in vorchristlicher Zeit eine eigentümliche Faszination auf den Menschen ausgeübt und ihn immer wieder dazu animiert, diesen unbekanntesten Raum zu erforschen. Bereits aus dem antiken Griechenland sind Berichte über Einsätze und Abenteuer mutiger Taucher überliefert. Das neuzeitliche Tauchen begann mit Helmtauchern im 16. Jahrhundert. Tauchhelme waren die Vorläufer der Kreislaufgeräte. Ihnen wurde die Luft per Handpumpe von der Oberfläche zugeführt und das CO<sub>2</sub> aus den Tauchhelmen gespült oder durch ein mit Weinessig und Seewasser getränktes Handtuch aufgenommen. 1680 hatte Giovanni Borelli die Vision von einem kryogenischen Rebreather. Seine Vorstellung, Ausatemluft durch ein mit Seewasser gekühltes Rohr zirkulieren zu lassen, um damit Verunreinigungen an der Innenwand des Rohres zu binden, funktionierte nicht. Wie bei vielen guten Ideen lag der ausbleibende Erfolg nur am falsch gewählten Versuchsaufbau. Hätte Borelli das Seewasser durch Stickstoff ersetzt und einen Tank mit flüssigem Sauerstoff eingebaut, dessen Gasphase in Verbindung mit dem Atemkreislauf steht, wäre seine Vision Wirklichkeit geworden. Bei diesem Verfahren wird das CO<sub>2</sub> an der Wand des Stickstofftanks (der auch die Temperatur des Sauerstofftanks konstant hält) ausgefroren. Unzählige Forscher und Tüftler versuchten das Helmtauchergerät weiterzuentwickeln und zu optimieren. Neben dem Bestreben, damit erfolgreich Arbei-



Helmtaucher in Vollmontur mit Dräger Tauchergerät.

ten unter Wasser zu bewerkstelligen, reizte insbesondere die Bergung und Hebung versunkener Schiffsladungen. Der Reiz des Unbekannten und die Neugier waren schon immer wichtige Triebfedern des menschlichen Entdeckungsdranges. Wie gut kann man da den Eifer verstehen, Möglichkeiten zu schaffen, in die unbekanntesten Tiefen der Ozeane und Binnengewässer abtauchen zu können. Der traditionelle Kugelhelm aus Metall auf einem wasserdichten Anzug aus einer Lage Gummi zwischen zwei Lagen Körperstoff wurde von dem Engländer John Deane bereits 1820 entwickelt. Die industrielle Umsetzung dieser Erfindung gelang Siebe Gorman in London. Er wurde dadurch zum bekanntesten Hersteller von Tauchausrüstungen.

1772 wurde der Sauerstoff von Carl Wilhelm Scheele und unabhängig davon 1774 von Joseph Priestley entdeckt. Schon ein Jahr danach befasste sich der Berliner J.F. Zöllner damit, reinen Sauerstoff für das Tauchen zu verwenden. Ein wichtiger technischer Schritt zum ersten Sauerstoff-Kreislaufgerät war die Reinigung des Atemgases vom Kohlenstoffdioxid. Das Prinzip der Kohlenstoffdioxidabsorption durch einen chemisch aktiven Stoff wurde schon 1853 von dem deutschen Naturforscher, Mediziner und Physiologen Prof. Dr. Theodor Schwann in Form des ersten frei tragbaren Sauerstoff-Kreislaufgerätes mit Atemluftregeneration angewendet. Erst 1878 konnte Henry Fleuss den ersten Meilenstein in der kommerziellen Entwicklung von Sauerstoff-Kreislaufgeräten setzen. Der nach England ausgewanderte Deutsche konstruierte eine Vollgesichtsmaske mit einem daran befestigten Atemgerät. Als Atemkalkpatrone zur Aufnahme des entstehenden Kohlenstoffdioxids verwendete



Tauchergerät von Fleuss um 1878 (Archivbild).

er ein mit Ätzkalk-Lösung getränktes Seilknäuel.

Das Gerät wurde ursprünglich dafür verwendet, eingeschlossene Bergleute zu retten. In diesem wurde das Restgas im Kreislauf geführt und durch Zudosierung von reinem Sauerstoff weitergenutzt. Fleuss' Entwicklung fand großes Interesse und hatte viele Nachahmer. Aus welchem Holz die Taucher in den Pionierjahren der Unterwassererkundung geschnitzt sein mussten, beschreibt Professor Trevor Norton in seinem Buch »In unbekannte Tiefen«. Er bezieht sich darin auf die Voraussetzungen, die Helmtaucher der englischen Marine mitzubringen hatten:

1. Sie sollten von Natur aus nicht leicht schwitzen.
2. Sie sollten bei guter Gesundheit sein.
3. Sie sollten einen ruhigen, besonnenen Charakter haben.
4. Sie sollten nicht unter Alkohol stehen.

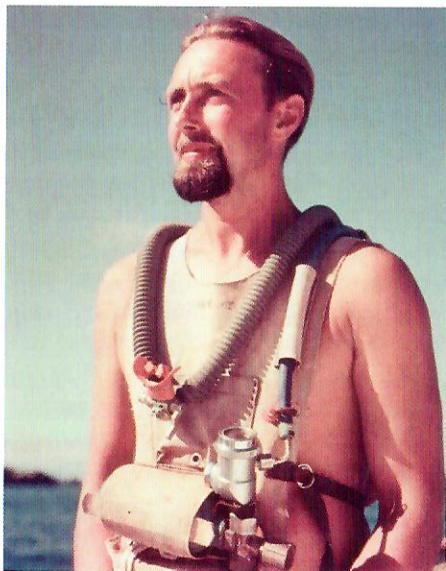
Die Entwicklung von Unterwasserausrüstungen orientierte sich sehr stark am Bedarf. Als zu Beginn des 20. Jahrhunderts die ersten U-Boote Einzug in die Kriegsmarine hielten, entstand der Bedarf an Rettungsmitteln. Um Soldaten einen sicheren Ausstieg aus einem gesunkenen Unterseeboot zu ermöglichen, wurde das Fleuss-Konzept weiterentwickelt und führte durch den ebenfalls bei der Firma Siebe-Gorman arbeitenden Ingenieur Robert Davis zum »Davis-Tauchretter«. In Deutschland arbeitete die Firma Dräger an der Entwicklung und Fertigung von Tauchhelmen und U-Boot-Rettungsgeräten.

1912 war der U-Boot-Tauchretter DM 2 serienreif und zählte zur Standardausrüstung der deutschen, dänischen, schwedischen und holländischen Marine.

Den Startschuss für die wissenschaftliche Nutzung von Sauerstoff-Kreislaufgeräten hat der bekannte Biologe und Unterwas-

serpionier Hans Hass gegeben. Er entwickelte und erprobte mit dem damals bei der Fa. Dräger tätigen Ingenieur Hermann Stelzner im Versuchstank der Drägerwerke die Funktion einer »Gegenlung«. Stelzner war ein Mitarbeiter von Bernhard Dräger und sehr an den Ideen von Hass interessiert. Auf der Basis des Tauchretters DM 2 wurde das Kleintauchgerät 138 entwickelt und 1942 von Hans Hass während einer Tour durch die Ägäis erprobt. Hans Hass war mit seinem Kleintauchgerät 138 sehr erfolgreich. Das Gerät war klein, handlich und mittels einer Umfüllpumpe konnte reiner Sauerstoff in die 0,6 Liter-Vorratsflasche des Gerätes auf 200 bar komprimiert werden. Damit waren Tauchzeiten bis zu einer Stunde realisierbar. Hans Hass bewegte sich dabei auf Tauchtiefen von 15 m und war der erste Taucher, der Schwimmflossen benutzte, um die Unterwasserwelt dreidimensional zu erforschen. Damit war der Schwimmtaucher geboren.

Zu dieser Zeit war bekannt, dass es sich beim Sauerstoff um ein für den Menschen überlebenswichtiges Element handelt. Jedoch wurden die Gefahren bei der Atmung von reinem Sauerstoff unterschätzt, obwohl in den 1930er-Jahren der toxische Einfluss von hyperbarem Sauerstoff auf den menschlichen Organismus beobachtet wurde. Die physiologischen Zusammenhänge unter erhöhten Sauerstoffpartialdrücken (gravierende Störungen des Zellstoffwechsels) wurden vom französischen Physiologen Paul Bert 1878 nachgewiesen. Ab den 1970er-Jahren wurden mit moderneren Methoden die schädlichen Auswirkungen des Sauerstoffs intensiver untersucht. Die Atmung von Gasen mit hohem O<sub>2</sub>-Anteil kann zu Übelkeit, neurologischen Störungen bis hin zu Krampfanfällen führen. Dies muss-



Hans Hass mit dem legendären 138er Kleintauchgerät.

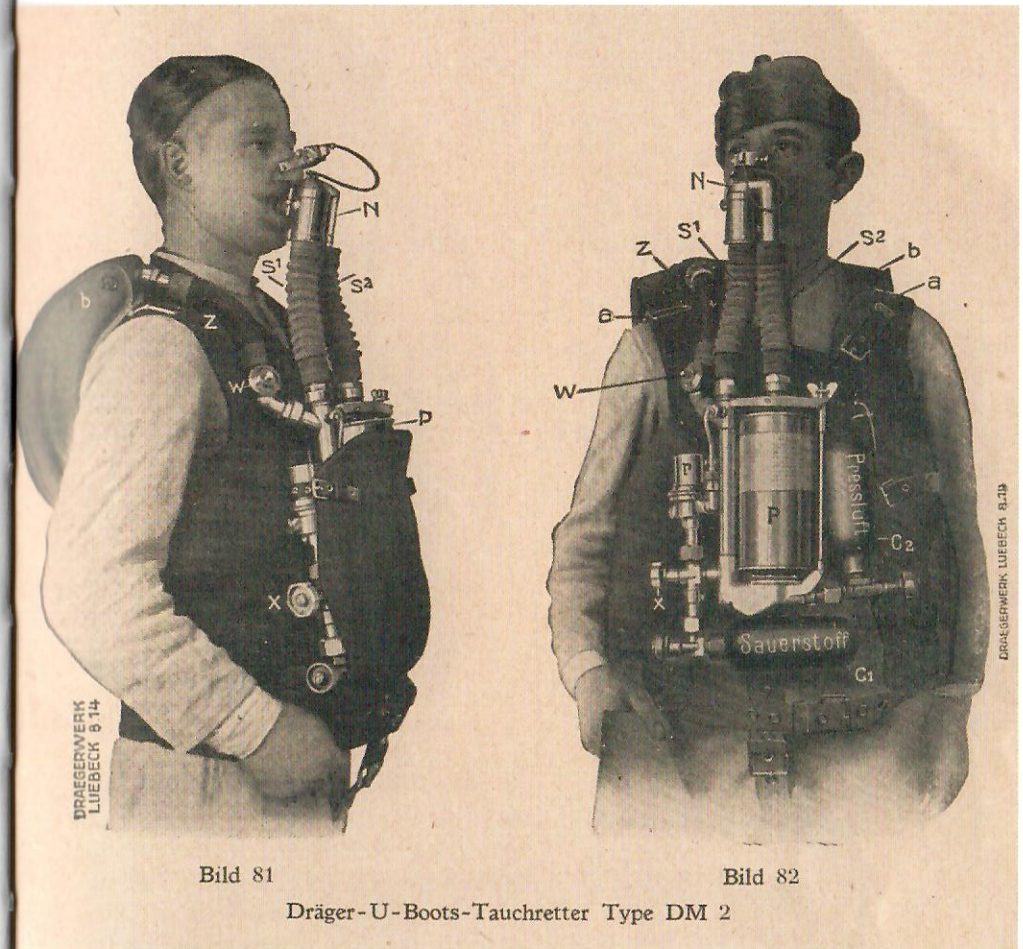


Bild 81

Bild 82

Dräger-U-Boots-Tauchretter Type DM 2

Dräger DM 2.

- |  |   |
|--|---|
| a = Tragesystem (Harnes)   | r = Druckminderer, der einen Gasstrom in den Einatemschlauch dosiert. Dazu dient das starre schlanke Rohr, das aus dem Ventil (r) führt. (Nur eine Vermutung) |
| b = Gegenlung (Atembeutel)   | w = Überdruckventil   |
| c <sup>1</sup> = Sauerstoffflasche (Vorratsgas)  | x = Ventil  |
| c <sup>2</sup> = Pressluftflasche (Verdünnungsgas)   | z = Verbindungsschlauch zur Gegenlung   |
| n = Mundstück mit Verschluss   |   |
| p = Atemkalkbehälter (Absorber)  |   |
| s <sup>1</sup> = Einatemschlauch   |   |
| s <sup>2</sup> = Ausatemschlauch (dieser wird zunächst in den Kalk zum Abbinden des CO <sub>2</sub> geführt) |   |

Halolara Belshke .... ~ 1940!

te bereits Hans Hass bei einem seiner tiefen Tauchgänge am eigenen Leib erfahren und wäre dabei beinahe ums Leben gekommen.

Einem seiner Teammitglieder, dem Engländer Jimmy Hodges, wurde das Experimentieren mit den Kreislaufgeräten zum tödlichen Verhängnis. Auch ein anderer Pionier des Tauchens mit reinem Sauerstoff, Jacques-Yves-Cousteau, erlitt mehrmals O<sub>2</sub>-Vergiftungen. 1939 brach er schließlich seine Experimente zum Sauerstoff-Kreislauftauchen ab, nachdem die Atmung reinen Sauerstoffs bei ihm während eines Tauchgangs zu Sehstörungen und Krämpfen geführt hatte. Cousteau schlug daraufhin einen anderen Weg ein und widmete sich dem »Offenen System«, an dessen Entwicklung er maßgeblich beteiligt war. Während dieser Entwicklungsarbeiten erdachte und konstruierte Emile Gagnan, einer von Cousteaus Mitarbeitern, das Funktionsprinzip des Bedarfsventils. Diese Neuerung kann



Italienischer Kampfschwimmer.



als Geburtsstunde des Atemreglers, oft auch als Lungenautomat bezeichnet, angesehen werden. Die Entwicklung von O<sub>2</sub>-Rebreathern ging trotz aller Rückschläge weiter. Im Zweiten Weltkrieg verschafften sich italienische Kampfschwimmer bei ihren Kommandoeinsätzen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten internationale Anerkennung für ihre taucherischen Leistungen. Nach dem Zweiten Weltkrieg wurden Sauerstoff-Kreislaufgeräte fast ausschließlich im militärischen Bereich benutzt. 1954 wurde das geschlossene Kreislauftauchgerät »Leutnant Lund II« von der Firma Dräger entwickelt. Dieser Nachfolger des legendären Kleintauchgerätes 138 war die Basis für die folgenden Sauerstoff-Kreislaufgeräte der Waffentaucher der Bundeswehr.



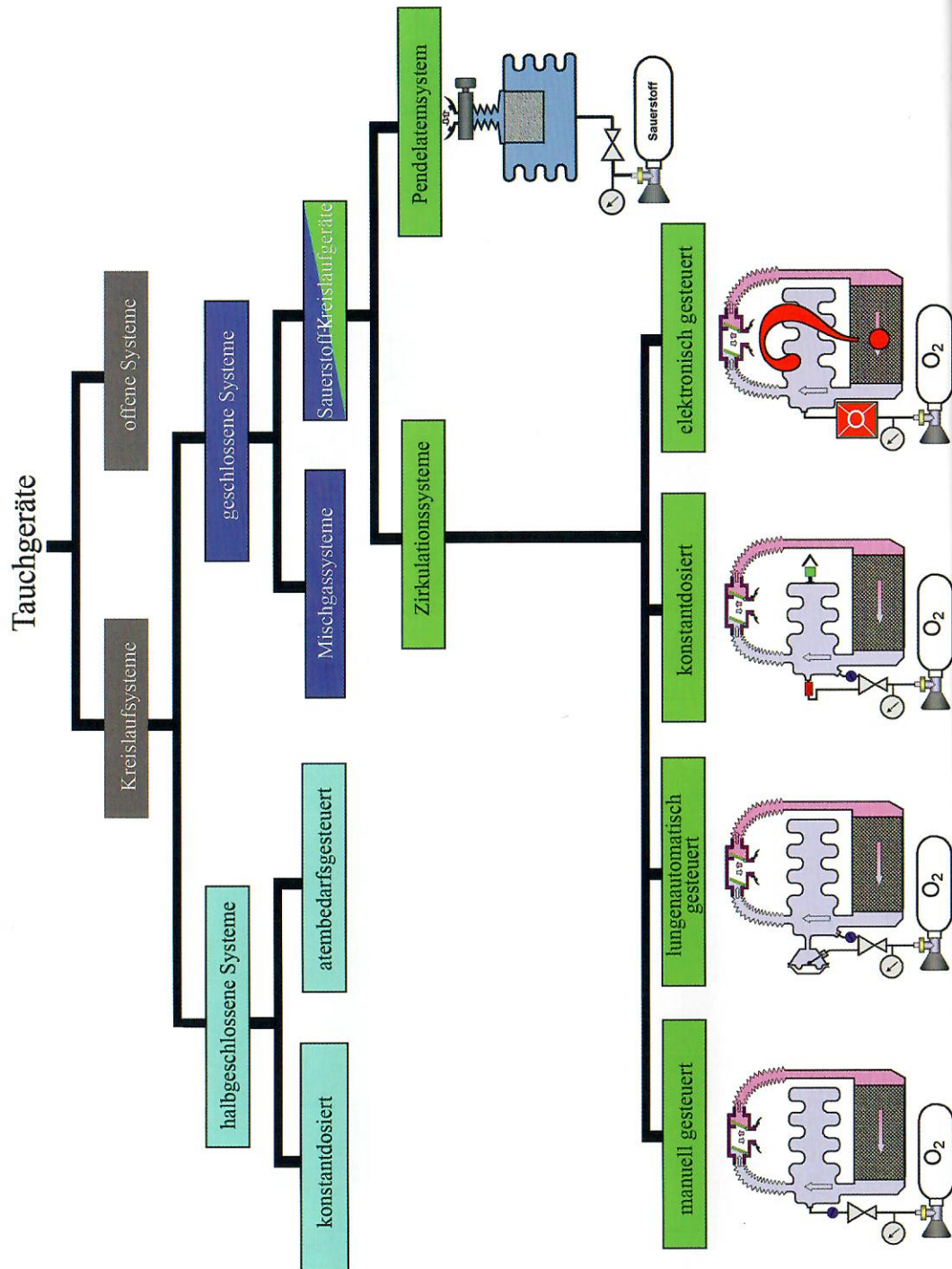
Taucher mit angelegtem Leutnant Lund II-Gerät in Seiten- und Frontalansicht.



Auf dem Werbeposter der Bundeswehr erkennt man – auf dem vergrößerten Ausschnitt (rechts) – im Boot einen Kampfschwimmer mit einem Leutnant Lund-Gerät.



Auf dem Werbeposter der Bundeswehr erkennt man – auf dem vergrößerten Ausschnitt (rechts) – im Boot einen Kampfschwimmer mit einem Leutnant Lund-Gerät.



Tauchgeräte im Überblick.

## 4. Tauchgeräte

Wie bereits beschrieben, eröffnen Kreislauftauchgeräte völlig neue Möglichkeiten. Um diese besser zu verstehen, möchten wir zunächst die offenen Tauchgeräte, die weltweit als Sporttauchgeräte eingesetzt werden, den Kreislaufgeräten gegenüberstellen, um dann auf die unterschiedlichen Kreislauftauchsysteme einzugehen.

Tauchgeräte werden nach folgenden Systemen unterschieden:

- ▶ Offene Systeme
- ▶ Geschlossene Systeme (Kreislauftauchgeräte)



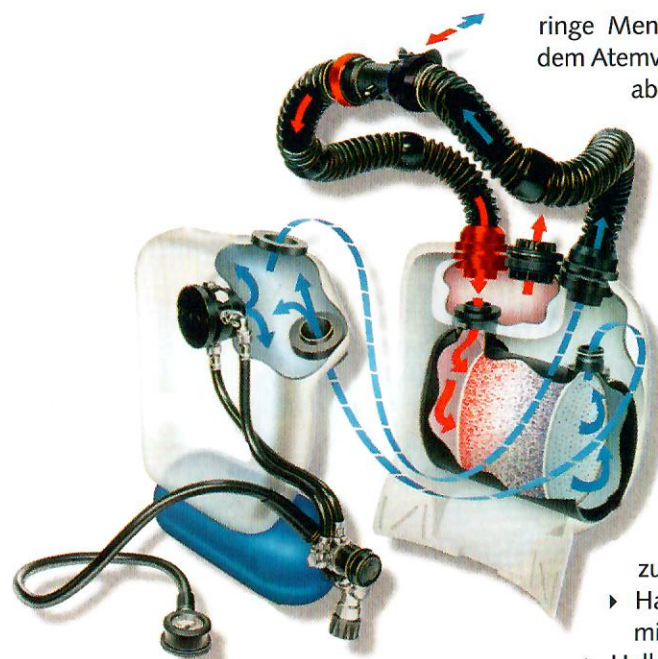
Jens Hilbert mit offenem System beim Training für einen Tiefsaunrekordversuch.

### Offene Systeme

Beim offenen Atemsystem besteht die Ausrüstung aus einem Druckgasbehälter und einem Atemregler. Das Atemgas wird beim Ausatmen an die Umgebung abgegeben. Dieses System wird aufgrund des günstigen Atemgases, in der Regel Pressluft, und des erschwinglichen Anschaffungspreises für Automaten und Flaschen am häufigsten eingesetzt. Nachteilig ist, dass nur ein geringer Anteil des im Atemgas vorhandenen Sauerstoffs genutzt wird, wobei der größere Teil ungenutzt ausgeatmet wird. Durch die schlechte Ausnutzung des Vorratgases wird dies bei der Verwendung von Mischgasen wie NITROX und TRIMIX ein teures Vergnügen.

### Kreislauftauchgeräte

Bei Kreislaufgeräten ist der Atem- und Gerätekreislauf, bei einem intakten Gerät, gegenüber dem Umgebungswasser vollkommen abgeschlossen, sodass während der Tauchphase weder Wasser eindringen noch Atemgas austreten kann. Der Taucher nimmt Sauerstoff auf, der zur Versorgung des Körpers benötigt wird. Dabei entsteht durch Gewebeatmung im Körper Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), das durch Atemkalk im System gebunden wird. Bei jedem Atemzug reduziert sich das Atemgasvolumen im Atembeutel. Dem liegt zugrunde, dass erstens der Sauerstoff im



Halbgeschlossenes System mit Konstantdosierung.

Körper verbraucht und zweitens das absorbierte Kohlenstoffdioxid im Atemkalk der Patrone gebunden wird. Die Ergänzung des verbrauchten Sauerstoffs erfolgt entweder manuell, lungenautomatisch, elektronisch oder durch eine Konstantdosierung. Diese Systeme zeichnen sich gegenüber »offen« arbeitenden Geräten durch eine erheblich effizientere Ausnutzung des Atemgases aus. Hinsichtlich der technischen Konzeption von O<sub>2</sub>-Ergänzung und Atemgaszirkulation in Sauerstoff-Kreislaufgeräten unterscheidet man folgende Kreislaufsysteme:

- ▶ Halbgeschlossene Systeme
- ▶ Geschlossene Systeme

### Halbgeschlossene Systeme

Bei Halbgeschlossenen Systemen (SCR = *Semi Closed Rebreather*) wird eine ge-

ringe Menge des Atemgases nach dem Atemvorgang an die Umgebung abgegeben. Der größere Anteil verbleibt im System. Das durch die Atmung anfallende Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) wird durch Atemkalk gebunden und das im Atembeutel befindliche Atemgas nach Frischgaszufuhr wieder für die Atmung bereitgestellt. Man unterscheidet innerhalb der Halbgeschlossenen Systeme nach ihrer Gaszuführung:

- ▶ Halbgeschlossenes System mit Konstantdosierung
- ▶ Halbgeschlossenes System mit Atembedarfssteuerung

### Halbgeschlossenes System mit Konstantdosierung

Bei den SCR wird durch eine Konstantdosierung eine definierte Menge Frischgas (Sauerstoff oder sog. Premix, darunter versteht man ein vorgemischtes Gas wie NITROX oder TRIMIX) dem gereinigten Atemgas zugeführt. Für die Konstantdosierung werden unterschiedliche Düsen benutzt, die sich in ihrem Durchfluss am verwendeten Gas des Tauchers orientieren. Der bekannteste Vertreter dieses Systems ist das »DOLPHIN« der Firma Dräger. Da es beim Konstantfluss zu einem ständigen Einströmen von Atemgas in den Atembeutel kommt, verfügen diese Geräte über ein Überdruckventil, welches die überschüssige Gasmenge an die Umgebung abgibt. Tauchgeräte, die auf dieser Basis arbeiten, sind:

- ▶ Dolphin der Firma Dräger
- ▶ Rg-UF/M der Firma VEB Kombinat Medizin und Labortechnik Leipzig/DDR (»Panzerretter«)

### Halbgeschlossenes System mit Atembedarfssteuerung

Im Gegensatz zur Konstantdosierung wird bei der Atembedarfssteuerung das Atemgas durch Volumenreduktion (Metabolisierung des Sauerstoffs) bereitgestellt. Beim Einatmen wird ein Unterdruck in der Gegenlunge erzeugt, der dazu führt, dass ein Ventil solange Frischgas zuführt, solange ein Unterdruck besteht. Das Ventil kann durch eine zweite Stufe eines Lungenautomaten oder über ein Faltenbalgsystem in Verbindung mit einem Gestänge gesteuert werden.

- ▶ Habanero der Firma Tauchtechnik Schmitt
- ▶ RB 80 der Firma Halcyon

### Geschlossene Systeme

Geschlossene Systeme (CCR = *Closed Circuit Rebreather*) ähneln in Aufbau und Funktionsweise den halbgeschlossenen Apparaten. Im Gegensatz zu ihnen entweicht beim Tauchgang kein verbrauchtes Atemgas über ein Überdruckventil (Blasendiffusor).

Die meisten modernen Tauchgeräte sind mit einer elektronischen Steuereinheit ausgerüstet, die über Magnet- oder Piezoventile einen konstanten, voreingestellten Sauerstoffpartialdruck im Gerät aufrechterhält. Der bekannteste Vertreter ist das

- ▶ Buddy Inspiration der Firma A.P. Valves – Weitere Beispiele sind:
- ▶ Stealth EOD der Firma Divex
- ▶ Biomarine 155 der Firma Biomarine



Buddy Inspiration mit elektronischer Steuerung.

Allerdings gibt es auch geschlossene Kreislauf-Tauchsysteme, die mit einer mechanischen Steuerung tiefenabhängig das Atemgas zusteuern. Diese Systeme haben den Vorteil, dass sie keine wasserempfindlichen elektronischen Bauteile enthalten.

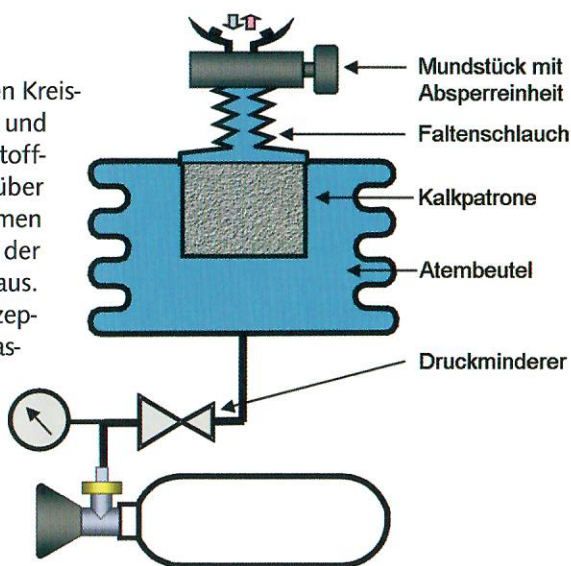
Diese Tauchsysteme werden überwiegend mit Mischgasen (NITROX und TRIMIX) betaut und sind daher nicht als reine Sauerstoff-Kreislaufgeräte anzusehen.

An dieser Stelle bestünde die Möglichkeit, die Kreislaufsysteme noch weiter zu untergliedern, jedoch soll dies nicht Gegenstand des vorliegenden Werkes sein. Wenden wir uns nun den reinen Sauerstoff-Kreislauf-Tauchgeräten zu, die Schwerpunktthema dieses Buches sind.

### Reine geschlossene Sauerstofftauchgeräte

Wie bei den bereits beschriebenen Kreislauftauchgeräten, ist der Atem- und Gerätekreislauf bei reinen Sauerstoff-Kreislauftauchgeräten gegenüber dem Umgebungswasser vollkommen abgeschlossen, und während der Tauchphase tritt kein Atemgas aus. Hinsichtlich der technischen Konzeption von  $O_2$ -Ergänzung und Atemgaszirkulation in  $O_2$ -Rebreathern unterscheidet man folgende Typen:

- ▶ Geräte mit Pendelatmung
- ▶ Geräte mit Zirkulationssystem



Pendelatmungssystem.

### Geräte mit Pendelatmungssystem

Die meisten historischen Geräte beruhen auf dem Funktionsprinzip der Pendelatmung.

Bei der Pendelatmung wird über nur einen Atemschlauch ein- und ausgeatmet. Die Atemluft pendelt in diesem System somit ständig hin und her. Diese Konstruktion benötigt keine Richtungsventile im Mundstück und hat einen sehr einfachen Aufbau. Der Atemkalkbehälter wird sowohl beim Ein- als auch beim Ausatmen vom Atemgas durchströmt. Dadurch wird eine besonders gute Reinigung des Atemgases vom entstandenen  $CO_2$  gewährleistet. Dieser Vorteil wird jedoch durch den Nachteil des großen Totraumes (Atemwege des Tauchers, Mundstück, Pendelatemschlauch) wieder aufgewogen. Der Sauerstoffzusatz erfolgt bei diesen Geräten durch manuelles Öffnen eines Ventils.

Die bekanntesten Geräte sind:

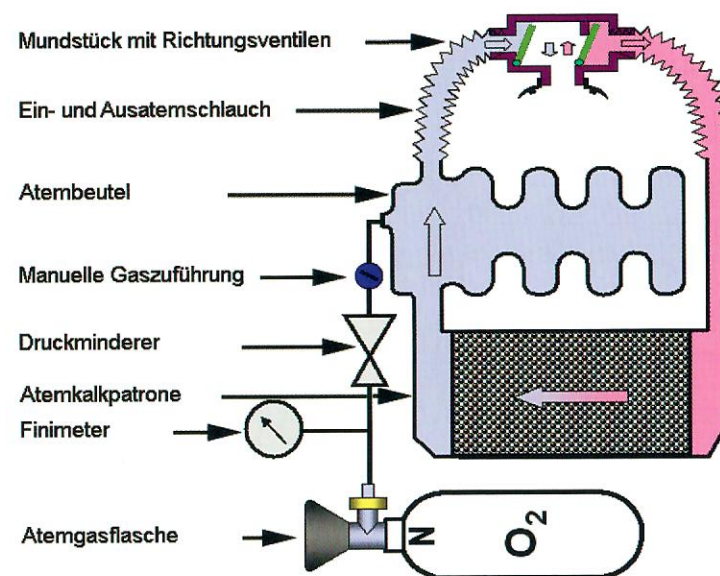
- ▶ ARO 57 der Firma Cressisub
- ▶ Naubos AR 88 der Firma Nautilus
- ▶ Castoro P 96 der Firma OMG

Durch die einfache Konstruktion sind diese Geräte zu einem günstigen Preis zu erwerben.

### Geräte mit Zirkulationssystem

Im Gegensatz zu Geräten mit Pendelatmung liegt bei dem Zirkulationssystem ein Kreislauf vor, da Ein- und Ausatemschlauch getrennt sind. Die Richtung des Atemgasflusses wird bei diesem System durch Richtungsventile gesteuert. Der Ausatemschlauch ist mit der  $CO_2$ -Kalkpatrone und der Einatemschlauch mit dem Atembeutel verbunden. Der Sauerstoffzusatz kann auf unterschiedliche Weise erfolgen, sodass sich die Geräte in folgende Untergruppen gliedern:

- ▶ Gerät mit manueller Sauerstoffzufuhr
- ▶ Geräte mit Konstantdosierung
- ▶ Geräte mit lungenautomatischer Sauerstoffzufuhr
- ▶ Geräte mit elektronischer Steuerung



Gerät mit manueller Zufuhr.

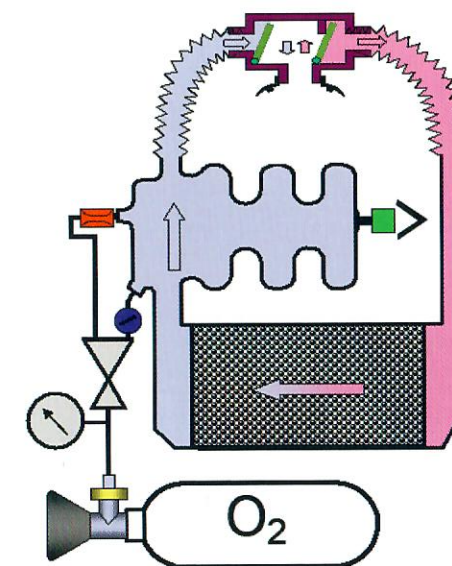
### Geräte mit manueller Sauerstoffzufuhr

Bei Kreislaufgeräten der älteren Bauart (z. B. Tauchretter 1910 der Firma Dräger) findet die manuelle Gaszuführung durch einfaches Öffnen und Schließen des Ventils der Vorratsflasche statt. Moderne Geräte wie z. B. das Castoro 96 PRO der Firma OMG verfügen über einen manuellen Bypass, durch den der Sauerstoff bei Bedarf zugeführt werden kann.

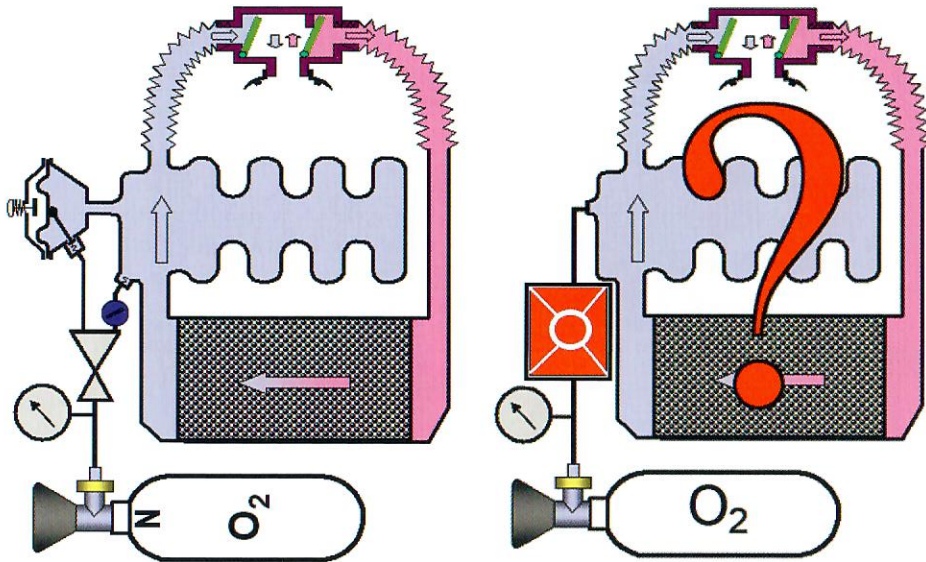
### Geräte mit Konstantdosierung

Bereits sehr früh in der Entwicklung neuer Sauerstoff-Kreislaufgeräten wurde in einigen Prototypen eine Konstantdosierung eingebaut. Wie in modernen, geschlossenen Kreislaufgeräten strömt bei dieser Konzeption ein konstanter Gasstrom in den Atembeutel. Beim schnellen Abtauchen ist die manuelle Gaszufuhr über Handdosierung möglich und meist auch erforderlich. Nachteilig wirkt sich die Konstantdosierung dann aus, wenn die zugefügte Gasmenge nicht vollständig

durch den Taucher veratmet wird. In diesem Fall wird das überschüssige Gasvolumen durch ein Überdruckventil an die



Gerät mit Konstantdosierung.



Gerät mit lungenautomatischer Zufuhr.

Gerät mit elektronischer Sauerstoff-Zufuhr.

Umgebung abgegeben. Bei größerer körperlicher Anstrengung muss dagegen der Bypass zusätzlich betätigt werden, um die vom Taucher benötigte Gasmenge bereitzustellen. Typische Vertreter sind:

- ▶ Leutnant Lund II der Firma Dräger
- ▶ Katox der Firma Dräger

#### Geräte mit »lungenautomatischer« Sauerstoffzufuhr

Bei diesem Gerätetyp ist im Atembeutel ein speziell konstruierter Lungenautomat eingebaut, der auf einen voreingestellten Unterdruck anspricht und so das rechtzeitige Auffüllen des Gerätekreislaufes gewährleistet. Neuere Kreislaufgeräte erlauben eine Einatemwiderstandsverstellung während des Tauchganges, indem über ein Verstellrad die Federvorspannung verändert werden kann. Da bei diesem Konstruktionsprinzip die Sauerstoffzufuhr automatisch dem Verbrauch angepasst wird, ist seine Handhabung wesentlich einfacher. Die aufwendigere

Bauart dieser Geräte schlägt sich jedoch in einem höheren Preis nieder. Typische Vertreter sind:

- ▶ SIVA S-10 der Firma Carleton
- ▶ Oxymax 3 der Firma Divex
- ▶ Amphora der Firma OPS-Aqualung
- ▶ LAR V der Firma Dräger

#### Geräte mit elektronischer Steuerung

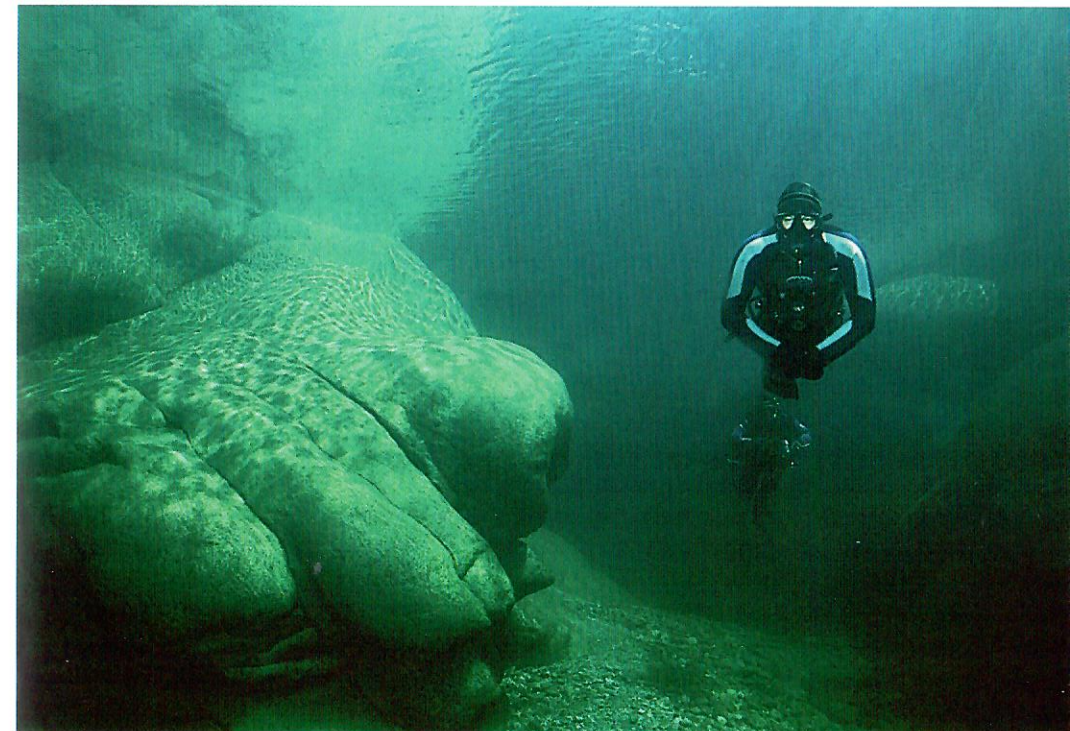
Im Zeitalter der Elektronik ist es möglich geworden die Größe der Steuerungssysteme so zu reduzieren, dass man kleine kompakte Sauerstoff-Kreislaufsysteme entwickeln konnte. Die Gaszuführung erfolgt über Magnetventile, die über einen Computer gesteuert werden, der in Verbindung mit Sauerstoffsensoren steht. Die Informationen der Sensoren (in der Regel drei Stück) werden von einer Computersoftware ausgewertet. Den Autoren war bis zum Erscheinen des Buches kein Gerät bekannt, welches nach der oben beschriebenen Steuerungstechnik als reines Sauerstoff-Kreislaufgerät eingesetzt wird.

## 5. Vor- und Nachteile von Sauerstoff-Kreislaufgeräten

Sauerstoff-Kreislaufgeräte entsprechen in ihrem Aufbau der einfachsten Art von geschlossenen Systemen und stellen die älteste Variante von Kreislaufgeräten dar. Vorrangig dienen sie Kampfschwimmern dazu, unauffällig unter Wasser operieren zu können. Sie haben viele Vor-, aber auch Nachteile, die den einen oder anderen Taucher empfindlich stören können. Die Vorteile der Sauerstoff-Kreislaufgeräte sind:

- ▶ geringes Gewicht
- ▶ kleines Packmaß
- ▶ lange Tauchzeit
- ▶ geräuscharmes Tauchen
- ▶ »blasenarmes« Tauchen

Ein klarer Vorteil liegt in ihrem geringen Gewicht. Im Gegensatz zu halbgeschlossenen Kreislaufgeräten, die meist schwerer als offene Systeme sind, bringen diese handlichen Apparate nur um die 10 kg



Taucher am Fußgestein.

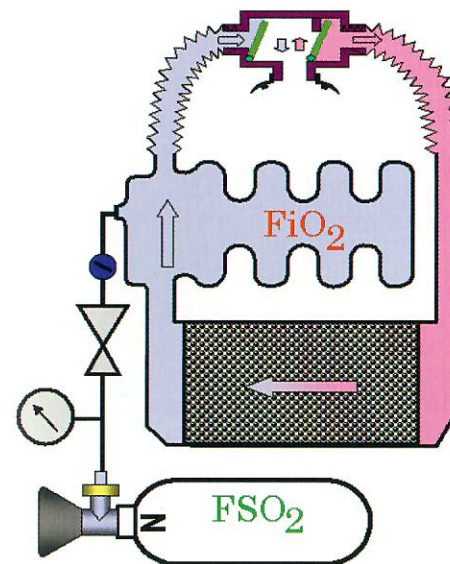


Mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten sind Sprünge aus großen Höhen möglich, da ihre Abmessungen relativ klein ausfallen.

auf die Waage. Ihr größter Vorteil liegt aber unbestritten in der Tauchzeitdauer. Eine theoretische Tauchdauer von drei Stunden ist mit einer 1,5 Liter-Flasche Sauerstoff möglich, jedoch werden solche Tauchzeiten fast nur von militärischen Einheiten erreicht. Bei solchen Tauchgängen ist die partialdruckabhängige Tauchzeit zu berücksichtigen, die bei einem  $pO_2$  von 1,6 bar (NOAA-Tabelle

siehe Kapitel Tauchmedizin) letztlich nur 45 Minuten betragen sollte. Interessant werden diese Geräte für Biologen, Archäologen u. a., die sich in moderaten Tiefen bewegen. Anhand einiger physiologischer Grundlagen des menschlichen Organismus soll an dieser Stelle die Effizienz eines solchen Gerätes illustriert werden.

Der Mensch entnimmt der Atemluft unter Normalbedingungen ca. 4 von 21 Prozent Sauerstoff. Der physiologische Sauerstoffbedarf nimmt mit steigendem Druck nicht zu, wohl aber die eingeatmete Gasmenge, um die Lunge auf dem Füllungsgrad zu halten, den sie an der Oberfläche hat. Grundsätzlich kann man davon ausgehen, dass ein Taucher mit einem offenen Presslufttauchgerät in zehn Metern Tiefe (2 bar) etwa 50 Liter Luft pro Minute verbraucht. Da sich die Lunge in zehn Meter Wassertiefe bei den hier herrschenden 2 bar Umgebungsdruck um die Hälfte ihres Volumens verkleinern würde, verdoppeln offene Presslufttauchsysteme die durch die zweite Stufe geatmete Gasmenge, um diesen Volumenverlust auszugleichen. Im Gegensatz dazu muss bei Sauerstoff-Kreislaufgeräten nur der physiologische Sauerstoffbedarf zugeführt werden. Je nach Arbeitsleistung beträgt dieser 0,5 bis über 4 Liter Sauerstoff pro Minute. Auch bei Kreislaufgeräten muss der Volumenverlust, der beim Abtauchen entsteht, ausgeglichen werden. Im Gegensatz zu Pressluftgeräten ist dies aber ein einmaliger Vorgang, da im Anschluss das Atemgas nicht an die Umgebung abgegeben wird, sondern weiterhin im Kreislauf verbleibt. Da wie bereits beschrieben so gut wie kein Gas beim Tauchgang an die Umgebung abgegeben wird, entstehen keine bis gar keine Geräusche. Dies wissen mili-



Schematische Darstellung eines Kreislauftauchgerätes mit manueller Steuerung.

tärische Einheiten aber auch Wissenschaftler zu schätzen, die sich dem Beobachtungsobjekt lautlos nähern wollen.

Die Nachteile der Sauerstoff-Kreislaufgeräte sind:

- ▶ eingeschränkte Tauchtiefe
- ▶ relativ hohe Betriebskosten
- ▶ lange Vor- und Nachbereitungszeiten
- ▶ Notwendigkeit intensiver Wartung und Pflege
- ▶ medizinischer Sauerstoff und Atemkalk sind nicht überall problemlos erhältlich

Sauerstoff-Kreislaufgeräte werden häufig wegen ihrer geringen Einsatztiefe kritisiert. Diese ist aus physiologischen Gründen bestimmten Limitierungen unterworfen. Im Kapitel Tauchmedizin wird beschrieben, dass die Neigung zu Krämpfen durch reinen Sauerstoff ab einem

Sauerstoffpartialdruck über 1,6 bar ansteigt.

Nach dieser Definition darf nur eine maximale Tauchtiefe von sechs Metern erreicht werden. Man orientierte sich bei der Berechnung der Einsatztiefe von Sauerstoff-Kreislaufgeräten an dem Vorratsgemisch ( $F_5O_2$ ) des mitgeführten Gases. Es wurde davon ausgegangen, dass das Atemgas im Atembeutel dem des Vorratsgases der Flasche (100 %  $O_2$ ) entspricht.

**Entspricht dies den Tatsachen?**

Um praxisgerechte Werte zu erhalten und die Einsatztiefe bestimmen zu können, muss vom Sauerstoffgehalt des Atemgases im Atembeutel ( $F_iO_2$ ) ausgegangen werden. Eine wesentliche Rolle spielt dabei der Spülvorgang, auf den im Folgenden noch näher eingegangen wird. Testreihen mit Kampfschwimmern haben ergeben, dass selbst bei längeren Tauchgängen und vorgeschriebenen Spülvorgängen im Durchschnitt nur 76 % Sauerstoff im Atemkreislauf vorhanden sind. Geht man von diesen experimentellen Befunden aus, so kann man mit folgender Formel die Tauchtiefe in Abhängigkeit des tatsächlichen Sauerstoffpartialdruckes in der Gegenlunge unter Berücksichtigung des maximalen Sauerstoffpartialdruckes von 1,6 bar berechnen.

$$T_{max} = 10 \text{ m} \cdot \left[ \frac{pO_2 \text{ max (bar)}}{F_iO_2 \text{ (bar)}} - 1 \right]$$

$T_{max}$  = maximale Tauchtiefe in Metern (in Abhängigkeit vom tatsächlichen Sauerstoffpartialdruck)

$pO_2$  = maximal gestatteter  $O_2$ -Partialdruck in bar (NOAA-Tabelle)

$F_iO_2$  = experimentell in der Gegenlunge ermittelter  $pO_2$  in bar (0,76 bar  $O_2$ )

hier LAD ✓

↳

↳

~ 10 - 11

Setzt man in die oben angegebenen Formel die gegebenen Werte ein, so erhält man eine maximale Tauchtiefe von 11,05 Metern.

$$T_{\max} = 10 \text{ m} \cdot \left[ \frac{1,6 \text{ bar}}{0,76 \text{ bar}} - 1 \right]$$

Da der Spülvorgang nicht von jedem Taucher in gleicher Weise durchgeführt wird, variiert  $T_{\max}$  individuell. Nimmt man im ungünstigsten Fall an, dass sich 84 % Sauerstoff im Atembeutel befinden, liegt die maximale Tauchtiefe, bei einem Sauerstoffpartialdruck von 1,6 bar, immer noch bei neun Metern. Um die Gefahr eines Sauerstoffkrampfes mit Sicherheit ausschließen zu können, wird empfohlen, bei einem längeren Tauchgang oder Tauchgängen unter extremen Bedingungen (z. B. körperliche Belastung, Kälte) mit  $O_2$ -Kreislaufgeräten einen maximalen  $pO_2$  von 1,4 bar als Berechnungsgrundlage zu nehmen.

Ein weiterer Nachteil des Sauerstoff-Kreislaufatmens tritt zutage, wenn man leere Vorratsflaschen neu befüllen möchte. Zur Zeit von Hans Hass (1940er-Jahre) wurde der gleiche technische Sauerstoff eingesetzt, wie er für Schweißgeräte Verwendung fand. Heutzutage bevorzugt man aus Sicherheitsgründen medizinischen Sauerstoff, der nicht überall erhältlich ist. Zusätzlich zum Sauerstoff stellt der Atemkalk einen nicht unerheblichen Kostenfaktor dar. Vor Antritt einer Reise sollte sich der Kreislauftaucher informieren, ob Atemkalk und Sauerstoff am Tauchort erhältlich sind. Im Gegensatz zu Pressluftgeräten ist die Vorbereitung eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes deutlich aufwendiger und dadurch zeitintensiver. Im Kapitel Rebreather-Bauteile wird deutlich,



Das Kreislaufgerät wird nach jedem Tauchgang zerlegt und gereinigt. Neben der optischen Kontrolle steht die Hygiene im Mittelpunkt.

dass der Kreislauf dieser Geräte aus mehreren Komponenten besteht, die für einen Tauchgang wasserdicht zusammengesetzt werden müssen. Der Zeitaufwand hängt ab von der Anzahl der Dichtungen und Verschraubungen, die vor und nach dem Tauchgang überprüft werden müssen. Zusätzlich müssen die Innenoberflächen des Kreislaufes sorgfältig gereinigt und regelmäßig desinfiziert werden, da sie ansonsten einen idealen Nährboden für das Wachstum von Bakterien und Pilzen darstellen. Die Infektionsgefahr bei vernachlässigter Wartung und Pflege stellt ein nicht zu unterschätzendes Gesundheitsrisiko für den Taucher dar.

## 6. Rebreather-Bauteile

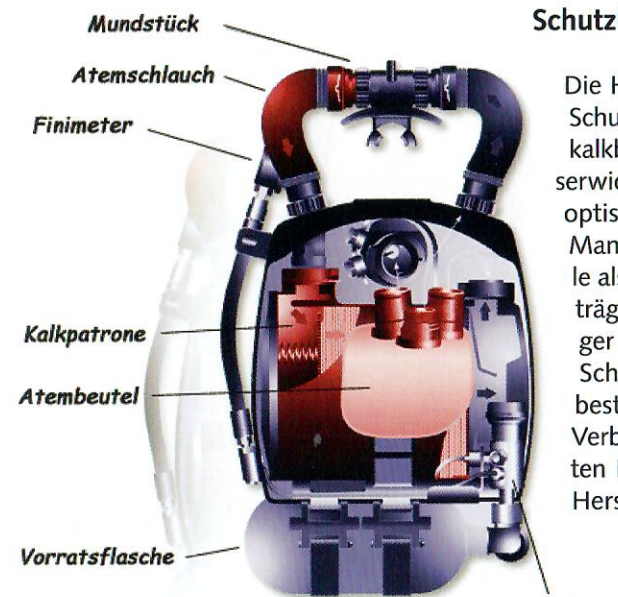
Die Bauteile der Sauerstoff-Kreislaufgeräte haben sich seit Beginn ihrer Entwicklung nicht grundlegend geändert. Heute werden in den Geräten modernere Werkstoffe verwendet. Zusätzlich versucht man über die Steuerung des Gasflusses (radial, linear oder axial) den Atemkomfort zu verbessern oder die Kohlenstoffdioxidabsorption zu optimieren. Grundsätzlich verfügen Sauerstoff-Kreislaufgeräte über folgende essenzielle Bauteile:

- Schutzhülle
- Tragesystem
- Druckminderer mit Finimeter
- Gaszuführung

- Atembeutel
- Atemschläuche
- Mundstück mit Walzenschieber und Steuerungsventilen
- Atemkalkpatrone
- Flasche mit Betriebsgas

Dazu können die Geräte mit zusätzlichen Komponenten ausgestattet sein:

- Dosiereinheit/Lungenautomat
- Überdruckventil/Blasenzerstäuber
- Hoch- und Niederdruckleitungen
- Bypass
- Kontrollinstrumente
- Vollgesichtsmaske



Schemazeichnung eines Rebreathers.

### Schutzhülle

Die Hülle dient in erster Linie dem Schutz von Atembeutel und Atemkalkbehälter. Mit ihr wird der Wasserwiderstand herabgesetzt und die optische Gefälligkeit verbessert. Manche Hersteller nutzen die Schale als Flaschen- und Komponententräger. Beim LAR V der Firma Dräger ist das Finimeter fest in der Schale integriert. Diese Schalen bestehen meistens aus Kunststoff- oder Verbundwerkstoffen, in vereinzelt Fällen auch aus Metall. Einige Hersteller schützen ihre Geräte auch durch verstärkte Stoffhüllen. Diese Modelle werden als Soft-Pack bezeichnet.

Material	Modell	Hersteller
Kunststoff (ABS)	Amphora	Firma OPS-Aqualung
Glasfaserverstärkter Verbundwerkstoff	LAR V	Firma Dräger
Metall (Aluminium)	Ida 64	aus der UdSSR
Stoff (Cordura)	Shadow	Firma Divex

Übersicht über Schutzhüllen.



LAR V.



Castoro 96 pro.



Poseidon Oxyton.



Das russische IDA 64 mit integriertem Tragesystem.

Eine Sonderstellung nehmen das Poseidon Oxyton und Ida 64 ein. Diese Geräte besitzen eine komplett geschlossene Schale. Damit sind der Atembeutel und die Kalkpatrone vor mechanischen Einwirkungen geschützt.

Softpacks werden gern verwendet, wenn es auf effektive Raumausnutzung ankommt. Sie lassen sich leicht in Packecken von Kajaks und Staufächern von Fahrzeugen unterbringen.

### Tragesystem

Das einfachste Tragesystem besteht aus einem Nacken- und Bauchgurt, welche an der Schutzhülle oder am Gerätegehäuse befestigt sind.

Vorteile bieten komplette Harnesssysteme, die über Metall- oder Kunststoffsteckverbindungen mit dem Tauchgerät verbunden sind. Diese westenähnlichen Aufnahmen können unter anderem ein



Ein Kreislaufgerät mit Softpack (Castoro 96 pro) lässt sich leicht verstauen.



Harnesssystem mit integriertem Bleiabwurf-system.

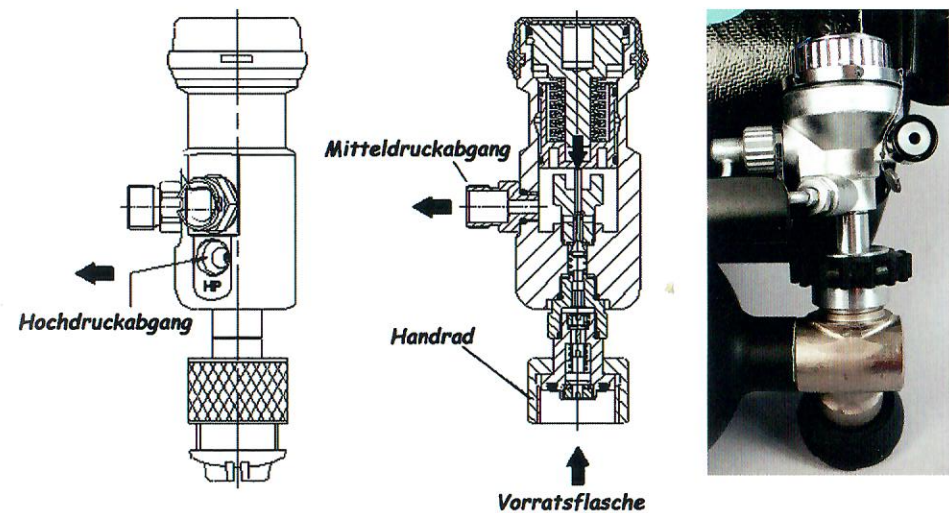
integriertes Blei- und Bleiabwurfsystem, Tariereinheit mit Inflator sowie ein Not-auslösesystem in Form einer ohnmacht-sicheren Schwimmweste beinhalten.

## Druckminderer

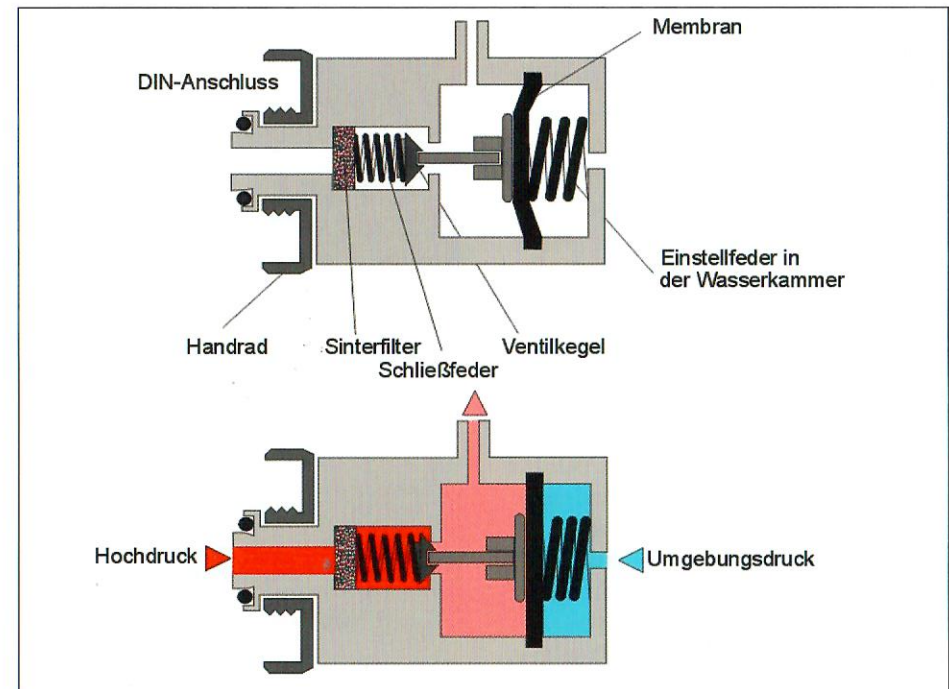
Druckminderer regeln den hohen Gasdruck der Vorratsflasche (bis 300 bar) auf den zur Benutzung benötigten Nieder- oder Mitteldruck (3–9 bar) herunter. Meist handelt es sich hierbei um speziell für Kreislaufgeräte entwickelte Bauteile. Bei ihnen besteht nicht die Notwendigkeit, eine zweite Stufe zu betreiben wie bei einem handelsüblichen Atemregler. Hinsichtlich der Funktion unterscheiden sie sich nicht von den ersten Stufen der Atemregler eines offenen Systems. Für den Betrieb mit reinem Sauerstoff müssen Druckminderer von Kreislaufgeräten »sauerstoffrein« sein. Sie besitzen Viton- oder Kupferdichtungen und sind mit »sauerstoffverträglichen« Schmierstoffen ver-

arbeitet. Beim Einsatz von Druckminderern ist immer deren Kaltwassertauglichkeit von besonderem Interesse, da die Gefahr von Vereisung bestehen kann. Bei Sauerstoff-Kreislaufgeräten wird in die Druckminderer ein Überdruckventil eingebaut. Dieses soll bei einer auftretenden Vereisung das Abströmen des Vorratsgases in den Atembeutel verhindern. Die ersten Stufen moderner Druckminderer sind technisch so ausgereift, dass die Gefahr einer inneren Vereisung sehr gering ist. Das setzt jedoch gewissenhafte Pflege und Wartung der Ausrüstung voraus. Probleme können dann auftreten, wenn z. B. die Vorratsflasche mehrfach vollständig leergeatmet wurde. In diesem Fall kann sich Kondenswasser in den Flaschen sammeln. Da sich das komprimierte Gas bei Entspannung aus physikalischen Gründen weit unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser abkühlen kann (Joule-Thomson-Effekt), besteht die Gefahr, dass im System vorhandenes Wasser gefriert. Somit reichen beim Öffnen des Flaschenventils bereits einige Wassertropfen aus, um einen Druckminderer durch Eisbildung funktionsunfähig zu machen.

Beim O<sub>2</sub>-Kreislaufgerät wird der Druckminderer im Gegensatz zum offenen System geringeren Belastungen ausgesetzt. Sie müssen lediglich den verbrauchten Sauerstoff (je nach körperlicher Belastung bis über 4 l/min) im Atembeutel ersetzen. Im Gegensatz dazu werden im offenen System bis zu 70 l/min zur Veratmung (an der Oberfläche) benötigt. Nur bei der manuellen Gaszuführung erhöht sich die Belastung des Druckminderers. Daraus folgt, dass die Gefahr einer Vereisung bei Druckminderern von Kreislaufgeräten recht niedrig ist. Sollte es



Das Funktionsprinzip der Druckminderer basiert auf dem Prinzip erster Stufen bei Presslufttauchgeräten, jedoch müssen sie druckstoßtauglich konstruiert sein, um ein Ausbrennen der Stufe oder deren Komponenten zu verhindern.



An der Zeichnung kann man die Funktionsweise einer membran-gesteuerten ersten Stufe unter Druck und im entspannten Zustand erkennen.

dennoch dazu kommen, muss das Flaschenventil sofort geschlossen werden, um ein unbeabsichtigtes Abströmen des Vorratsgases über das Überdruckventil zu verhindern. Da bei einigen Druckminderern ein Überdruckventil nicht integriert ist, strömt das Vorratsgas über die Mitteldruckleitung in den Atembeutel und kann diesen beschädigen. Eine Möglichkeit größere Schäden zu vermeiden, bestünde im Herausnehmen des Mundstücks, damit das Gas entweichen kann. Der Tauchgang muss in jedem Fall sofort beendet werden.

### Gaszuführung

Die Gaszuführung sorgt in dem Kreislaufgerät für die Bereitstellung des Atemgases im Atembeutel. Wie bereits im Kapitel Tauchgeräte beschrieben, kann dies auf verschiedene Arten geschehen:

- ▶ Geräte mit manueller Sauerstoffzufuhr
- ▶ Geräte mit Konstantdosierung
- ▶ Geräte mit lungenautomatischer Sauerstoffzufuhr
- ▶ Geräte mit elektronischer Steuerung

### Atembeutel

Der Atembeutel ist neben den Atemschläuchen das empfindlichste Bauteil eines Kreislaufgerätes. Bereits geringe mechanische Einwirkungen können hier Schaden verursachen. Aus diesem Grund ist beim Umgang mit dem Kreislaufgerät auf diese Baugruppe besonders zu achten. In der Anfangszeit des Tauchens bestanden die Atembeutel aus chemisch beschichtetem Segeltuch. Diese so hergestellten, wasserdichten Gegenlungen

waren über lange Zeit Standard in der »Kreislauf-Taucherei«. Heute werden synthetische Materialien verwendet, die sehr widerstandsfähig sind. Sie müssen gegenüber Umwelteinflüssen wie Salzwasser und hohen Temperaturschwankungen, aber auch gegen Laugen (die z. B. durch Reaktion von Wasser mit Atemkalk entstehen) resistent sein. Entscheidend für den Atemkomfort ist die richtige Größe der Gegenlung. Die Atembeutel sind auf das Durchschnittsvolumen der Taucher abgestimmt, um ein angenehmes Atmen unter Wasser zu gewährleisten. Um eine falsche Montage der Atemschläuche und des Atembeutels zu vermeiden, sind die Ein- und Ausatemseite mit speziellen, unterschiedlichen Anschlussformen oder einer farblichen Kennzeichnung versehen. Dabei wird bei den meisten Geräten eine rote Markierung für die Ausatemseite und eine grüne Kennzeichnung für die Einatemseite verwendet.



Atembeutel des Kreislaufgerätes LAR V der Firma Dräger.

Die meisten Atembeutel besitzen in ihrem Inneren eine Spirale, die als Abstandhalter dient. Damit soll das Zusammenfallen des Atembeutels mit nachfolgendem Verkleben durch Feuchtigkeit vermieden werden. Dieselben Kräfte wirken, wenn zwei Glasplatten aufeinanderliegen und wenn sich zwischen ihnen ein Feuchtigkeitsfilm befindet. In diesem Fall ist ein Trennen der Glasplatten nur mit großem Kraftaufwand möglich. Ein Verkleben des Atembeutels kann den Atemkomfort stark einschränken, im Extremfall das Atmen sogar unmöglich machen.



Zu erkennen ist die Spirale im Atembeutel, die ein Zusammenfallen des Atembeutels verhindern soll.

Bei älteren Geräten ist der Atembeutel häufig für die Aufnahme der Kalkpatrone vorbereitet. Dieses Prinzip wurde von der italienischen Firma OMG auch in ihren neuen Geräten umgesetzt. Das einfache Konzept der Kalkpatrone im »Trägeratembeutel« spiegelt sich nicht zuletzt im günstigen Preis wider.

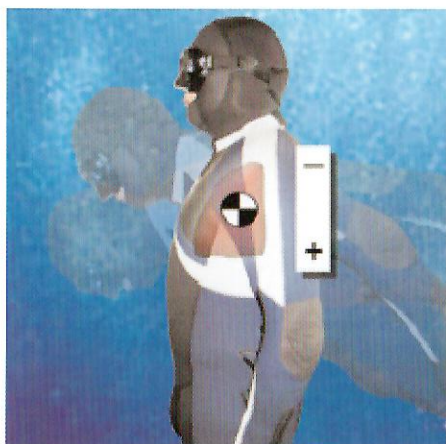


Zu sehen ist die Atemkalkpatrone des Castoro 98 Pro, die in den Atembeutel eingesetzt wird.

### Positionierung des Atembeutels und Atemverhalten

Unsere Atmung hat sich an das Leben an Land adaptiert, und die Atemmuskulatur ist an diese Umgebung angepasst. Im Gegensatz zu der Situation während Normalatmung ändern sich die Druckverhältnisse in der Lunge unter Geräteatmung erheblich. Benutzt der Taucher ein Kreislauf-Tauchgerät, so ändern sich die Druckverhältnisse in der Lunge je nachdem in welcher Position die Gegenlung getragen wird.

Um die verschiedenen Druckverhältnisse zu erklären, legt man zunächst sowohl in der Lunge als auch in der Gegenlung eine Druckreferenzzone fest. Mithilfe dieser beiden Zonen ist man in der Lage Druckdifferenzen bei verschiedenen Lagetypen der Gegenlung zu visualisieren und auch die Druckänderungen beim Lagewechsel des Tauchers unter Wasser zu erklären.



Das Bild zeigt das Ruheatemzentrum in der Lunge eines Tauchers mit der positiv und negativ gekennzeichneten Druckreferenzzone. Bei Lageänderung des Tauchers ändern sich die Druckverhältnisse unter Berücksichtigung der Gegenlung.

### Lagetypen der Gegenlung

Wie bereits erwähnt, ist die Atemarbeit des Tauchers mit Kreislauftauchgerät von der Positionierung der Gegenlung abhängig. Je nach Bauart des Rebreathers kann sich die Gegenlung an drei Positionen befinden:

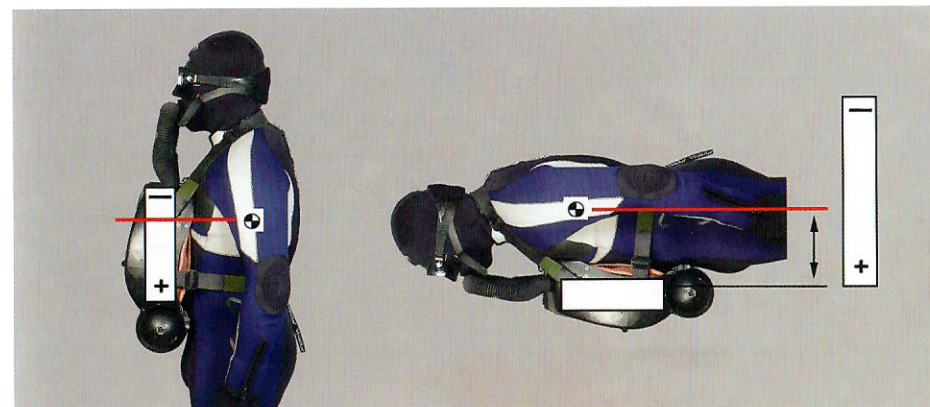
- ▶ vor dem Brustkorb
- ▶ auf dem Rücken
- ▶ über den Schultern

Solange sich der Taucher mit seinem Tauchgerät an Land befindet, wird die Atemarbeit nicht wesentlich von der Lage des Atembeutels beeinflusst, da sich der Umgebungsdruck an Land bei einer Höhendifferenz von wenigen Zentimetern zwischen den Druckreferenzzonen der Lunge und der Gegenlung kaum verändert. Im Gegensatz dazu ändern sich die Druckdifferenzen sofort, wenn der Taucher sich mit seinem ganzen Körper im Wasser befindet. Wie groß die Druckdifferenz der beiden Referenzzonen ist, wird durch den Wasserdruck auf die Lunge und die Gegenlung bestimmt. Dieser ist abhängig von der Tiefe, in welcher sich die jeweilige Referenzzone befindet.

**Trageweise des Atembeutels vor der Brust**  
Befindet sich die Gegenlung vor der Brust auf Höhe der Lunge des Tauchers und nimmt dieser eine senkrechte Position ein, so ist kein nennenswerter Druckunterschied zwischen Lunge und Gegen-



Die Grafik zeigt die drei möglichen Lagetypen der Gegenlungen.



In senkrechter Position ist im Gegensatz zur waagerechten Tauchhaltung kein nennenswerter Druckunterschied zwischen den Referenzzonen der Lunge und Gegenlung messbar.



Bei der Trageweise der Gegenlung auf dem Rücken ist der Einatemvorgang anstrengender.

lung messbar. Nimmt dieser aber eine horizontale Position ein, so lastet auf der Gegenlung ein höherer Wasserdruck. Der zwar geringe, aber doch merkliche Überdruck der Gegenlung führt dazu, dass das Atemgas beim Einatmen leicht in die Lunge gelangt. Im Gegensatz dazu ist das Ausatmen in dieser Position deutlich anstrengender, da nun die Atemmuskulatur die Druckdifferenz zwischen Lunge und Gegenlung überwinden muss.

### Trageweise des Atembeutels auf dem Rücken

Befindet sich der Atembeutel auf dem Rücken des Tauchers, so lastet auf ihm ein geringerer Wasserdruck als auf der Lunge. Beim Ausatmen in waagerechter Haltung gelangt die Ausatemluft mit leichtem Überdruck in die Gegenlung. Im Gegensatz zum Ausatmen ist das Einatmen anstrengender, da der Brustkorb die Einatemluft aus der Gegenlung »saugen« muss.



Bei der Trageweise der Gegenlunge über der Schulter ergibt sich der beste Atemkomfort.

### Trageweise der Atembeutel über den Schultern

Zweifelsohne ist der angenehmste Atemkomfort bei Kreislaufgeräten zu finden, deren Gegenlungen über den Schultern getragen werden. In horizontaler Haltung ist zwischen Lunge und Gegenlunge nur ein sehr geringer Druckunterschied messbar, da sich beide Druckreferenzzonen auf derselben Höhe befinden und somit demselben Umgebungsdruck ausgesetzt sind. Bei waagerechter Schwimmlage empfindet der Taucher nur einen sehr leichten Überdruck im Kreislaufgerät. Der geringe Atemwiderstand spricht jedoch eindeutig für diese Anordnung. Von Nachteil ist allerdings, dass der Atembeutel ungeschützt auf der Schulter liegt und die Kopfbewegung des Tauchers einschränkt.

Viele halbgeschlossene Geräte, aber auch einige O<sub>2</sub>-Kreislaufgeräte besitzen zwei Atembeutel. Bei diesen Konstruktionen soll die Kombination aus je einem großen Einatembeutel und einem kleineren Ausatembeutel den Atemkomfort verbessern. Grundsätzlich bleibt festzustellen,

dass Kreislaufgeräte hinsichtlich ihres Atemwiderstandes nicht an Lungenautomaten neuester Fertigung heranreichen. Der Atemkomfort hängt nicht zuletzt vom Befüllungsgrad des Atembeutels ab. Taucht man ein Profil, bei dem ständig größere Tiefenunterschiede auftreten, kann das Atemgas unter Umständen beim Aufstieg nicht abgeatmet werden, sodass es zu einem Überangebot von Atemgas in der Gegenlunge kommt. Dieser Druckanstieg wirkt sich ungünstig auf den Atemwiderstand aus. Gegebenenfalls muss durch Nase oder Mundwinkel das Überangebot an Gas an die Umgebung abgegeben werden.

### Atemschläuche

Faltenschläuche beeinflussen durch ihren Durchmesser und die Oberflächenbeschaffenheit der Innenseite ebenfalls den Atemwiderstand. Der allgemeinen Empfehlung – je größer der Durchmesser, desto geringer der Atemwiderstand – sind natürliche Grenzen gesetzt. Denn je größer der Schlauchdurchmesser, desto

größer ist die Gefahr, dass ein Schlauch kollabiert. Dabei würde der Schlauch in sich zusammenfallen und ggf. eine Atemarbeit erheblich erschweren oder sogar unmöglich machen. Um das zu verhindern, werden Versteifungsringe an der Innenseite angebracht. Leider neigen diese dazu, leicht aus dem Schlauch zu fallen. Durch das im Atemschlauch befindliche Gas entsteht zusätzlich Auftrieb an dem damit verbundenen Mundstück. Die Folge ist eine starke Beanspruchung der Kiefermuskulatur durch verstärkten Biss. Dies führt bei längeren Tauchgängen zu erheblichen Schmerzen. Um diesem Nachteil zu begegnen, werden in der Nähe des Mundstücks und auf Höhe der Schultern Gewichte am Außenschlauch angebracht. Die Größe der Gewichte ist abhängig vom jeweiligen Auftrieb. Um die recht empfindlichen Schläuche vor Beschädigung zu schützen, werden spezielle Überzüge aus Kevlar oder Cordura angeboten. Gummierete Kevlarschläuche vereinigen durch glatte Innenseiten einen optimalen Atemkomfort mit gutem Schutz vor mechanischen Beschädigungen. Eingearbeitete Edelstahlschrauben verhindern das Zusammenfallen der Schläuche. In Sauerstoff-Kreislaufgeräten sind meist kurze, kompakte Atemschläuche verbaut, die auf Gegen-



Kevlarschlauch mit eingearbeiteten Edelstahlschrauben.

gewichte und Versteifungsringe verzichtet werden können.

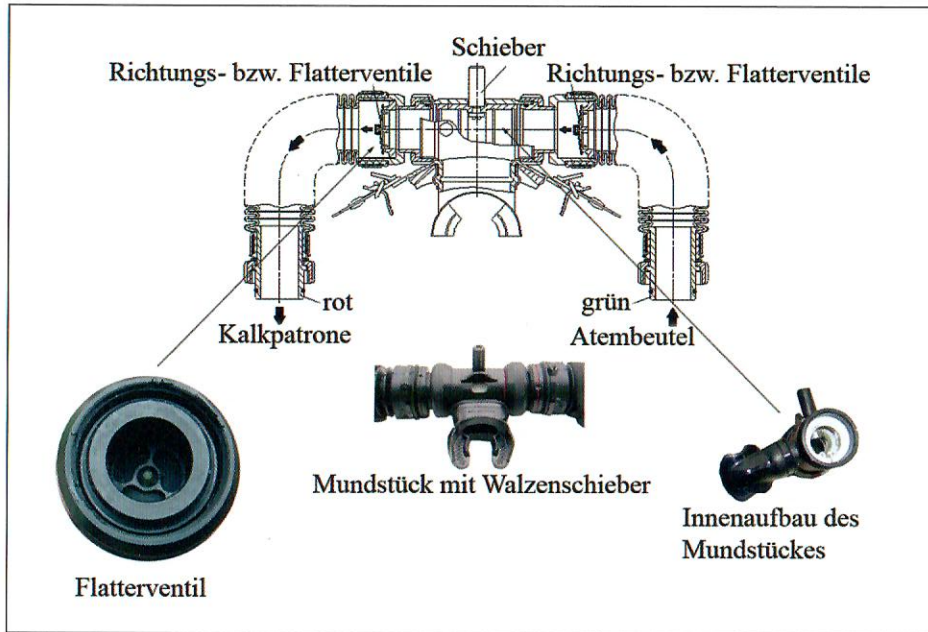
### Mundstück mit Walzenschieber und Steuerungsventilen

Die Rebreather-Mundstücke unterscheiden sich wesentlich von denen der Pressluftgeräte. Zu einem Rebreather-Mundstück gehören:

- ▶ Auswechselbare Mundstücke aus Gummi/Silikon
- ▶ Ein- und Auslassventil (Richtungsventile)
- ▶ Schieber
- ▶ Ventilkäfig
- ▶ T-förmiges Mundstück, in und an dem sich alle oben genannten Einzelteile befinden

Flatterventile im Mundstück oder den Atemschläuchen sorgen dafür, dass der Gasfluss nur in einer Richtung stattfindet.

Mit dem Schieber wird das Mundstück verschlossen, um beim Herausnehmen unter Wasser einen Wassereintritt in den Atemkreislauf zu verhindern, der die Kalkpatrone im ungünstigsten Fall sofort fluten würde. Der Schieber muss leichtgängig, groß genug und auch mit Handschuhen zu bedienen sein. Ist dieser zu leichtgängig, könnte er sich ggf. selber öffnen. Die optimale Funktion kann mit speziellen Schmierstoffen erreicht werden. Um eine Verwechslung der Ein- und Ausatemseite zu vermeiden, ist das Mundstück der meisten Hersteller farblich gekennzeichnet oder mit unterschiedlichen Gewinden versehen. Bei neuen Modellen wird beim Schließen des Mundstücks eine Öffnung freigegeben, die das Atmen der Umgebungsluft ermöglicht.



Explosionszeichnung eines Mundstückes mit Walzenschieber und Richtungsventilen.

Dadurch entfällt das Herausnehmen aus dem Mund. Dies ist z. B. bei kurzfristigen Oberflächenaufhalten sinnvoll. Militärtäucher nutzen diese Variante, um bei Oberflächenaufhalten Sauerstoff zu



Mundstück mit Walzenschieber des russischen Kreislaufgerätes IDA 64.

Anmerkung: Das Kreislaufgerät wird normalerweise mit einer Vollgesichtsmaske betauht.

sparen und im Falle eines schnellen Abtauchens durch Umlegen des Schiebers das Gerät wieder betauchen zu können. Der Spülvorgang erfolgt während des Abtauchvorganges. Neben den bereits oben beschriebenen Mundstücken mit Walzenschieber gibt es auch Tauchgeräte mit Drehschiebern. Die Funktionsweisen sind vergleichbar, wobei beim Walzenschieber durch Verdrehen einer Deckelplatte ein Konus das Mundstück verschließt.

### Atemkalkpatrone

Die Atemkalkpatrone dient in erster Linie der wasserdichten Aufnahme des Absorberkalkes. Des Weiteren sorgt sie für die thermische Isolation des temperaturempfindlichen Atemkalkes. Um gegen die bei

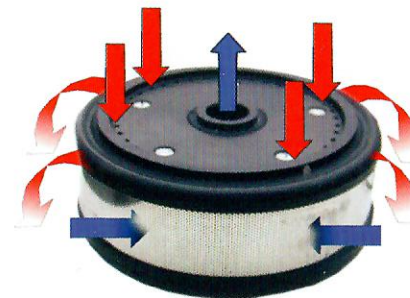
einem Wassereintrich entstehende Lauge resistent zu sein, werden die Kalkpatronen aus Kunststoffen wie Styropolymere (ABS) oder Polyoxymethylen (POM), Verbundwerkstoffen oder Metallen hergestellt. Bei Geräten, deren Atemkalkbehälter sich innerhalb des Atembeutels befindet, bestehen die Kalkpatronen/Absorber oft aus Metall. In diesem Fall kann der Metallabsorber nicht auskühlen, da er vom warmen Atemgas umgeben ist. In einigen russischen Kreislauftauchgeräten werden Kalkbehälter aus Metall verwendet, bei diesen wird die thermische Isolation durch eine doppelwandige Konstruktion gewährleistet.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Typen von Atemkalkbehältern, die sich in der Führung des Atemgases im Absorber unterscheiden:

- radiale Atemkalkbehälter
- lineare (auch als axial bezeichnete) Atemkalkbehälter

### Radialer Atemkalkbehälter

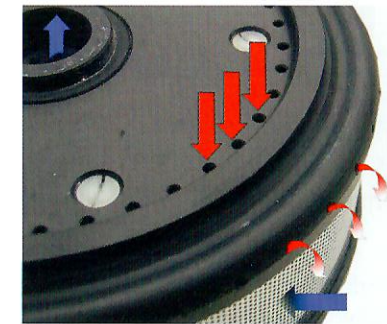
Beim diesem Typ Atemkalkbehälter wird das Ausatemgas radial durch den Absorber geführt.



Radiale Atemkalkbehälter mit Strömungsrichtungspfeilen.

Beim radialen Behälter des Castoro 96 pro gelangt das Ausatemgas durch die mit roten Pfeilen sichtbar gemachten Bohrungen in den Atembeutel. Danach strömt es durch die Atemkalkpatrone um im Anschluss wieder eingeatmet zu werden.

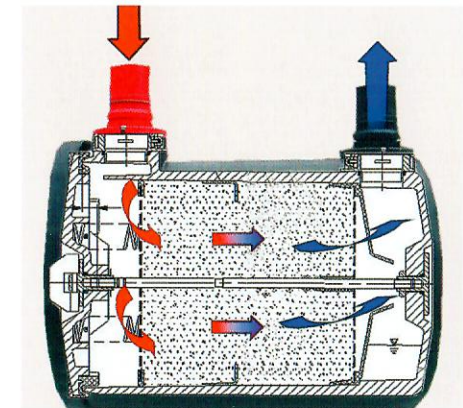
Dieser Aufbau gewährleistet durch die dem Atemgas angebotene große Kalkbehälterfläche einen nur sehr geringen Atemwiderstand.



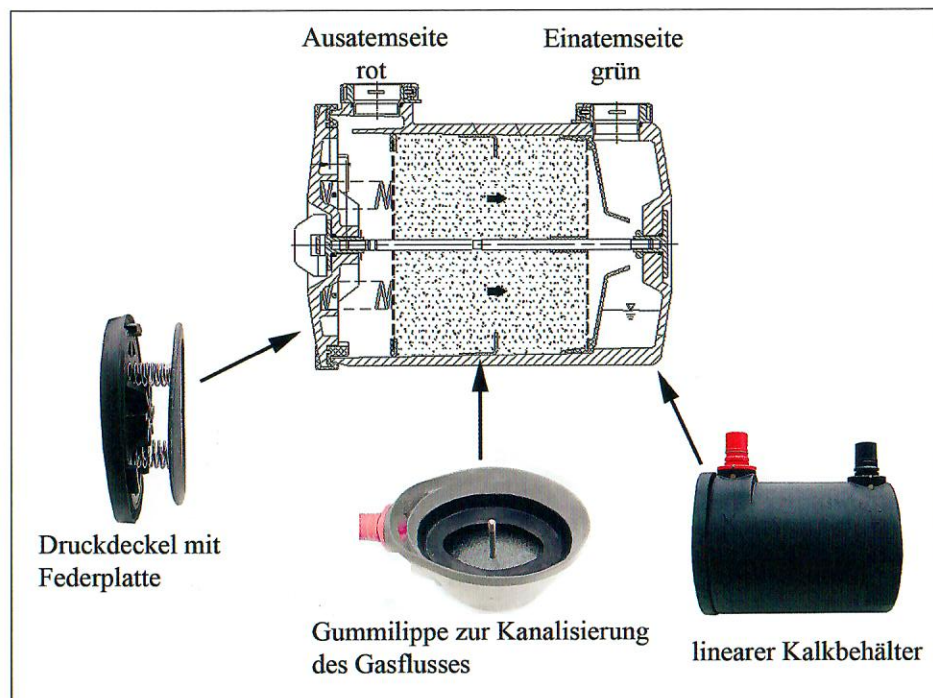
Radialer Kalkbehälter mit Angabe der Strömungsrichtung des Gases.

### Lineare Atemkalkbehälter

Bei diesem Kalkbehälter strömt das Ausatemgas linear durch den Absorber.



Linearer Atemkalkbehälter mit Strömungsrichtungspfeilen.



Explosionszeichnung eines linearen Atemkalkbehälters mit einzelnen Bauteilen.

#### Der Atemkalkbehälter sollte folgende Voraussetzungen erfüllen:

- ▶ Er muss eine Einlassöffnung haben, durch die das Ausatemgas in den Behälter gelangen kann.
- ▶ Er muss eine Auslassöffnung haben, durch die das gereinigte Gas aus dem Behälter entweichen kann.
- ▶ Er muss einen Deckel zur Befüllung und Entleerung des Behälters besitzen.
- ▶ Er muss ein Verwirbelungssystem besitzen, das Kanalbildung verhindert und damit sicherstellt, dass das Gas mit so viel Atemkalk wie nur möglich in Kontakt kommen kann.

- ▶ Er muss so gebaut sein, dass kein Atemkalk aus dem Behälter in den Atemkreislauf gelangen kann.
- ▶ Er sollte Verbindungsstücke zu den Atembeuteln und dem Atemschlauch besitzen, die mit unterschiedlicher Größe, Form oder Farbcodierung ausgestattet sind, sodass es unwahrscheinlich wird, dass beim Zusammenbau Verwechslungen auftreten.
- ▶ Er muss so dicht sein, dass kein Wasser während des Tauchgangs in den Kanister eindringen kann.
- ▶ Es sollte eine Wasserfalle besitzen.
- ▶ Er sollte nach jedem Tauchgang leicht zu reinigen sein.

Typisch für diese Art des Kalkbehälters ist die schichtweise Sättigung des Absorberkalkes mit  $\text{CO}_2$ . Im Gegensatz zum radialen Aufbau hat das Ausatemgas beim linearen Atemkalkbehälter die Tendenz entlang der glatten inneren Oberfläche am Kalk vorbeizuströmen. Das Gas sucht sich dabei den Weg durch den Atemkalkbehälter, bei dem es den geringsten Widerstand zu überwinden hat. Aus diesem Grund verwenden einige Hersteller im Atemkalkbehälter einen herausnehmbaren Gummieinsatz/Manschette. Dieser wird eingesetzt, wenn der Atemkalk eingefüllt wird. Dadurch wird das Gas durch die Mitte des Behälters geleitet. Dort kommt es in engeren Kontakt mit dem Atemkalk, wodurch sich der Absorptionseffekt effizienter gestalten lässt und einer Kanalwirkung an der Behälterwand entgegengewirkt wird. Der Vollständigkeit halber muss noch erwähnt werden, dass im radialen Behälter der Gasfluss axial, co-axial und im Kreuzfluss den Absorber durchströmen kann.

#### Flasche mit Betriebsgas

Das Betriebsgas bei Sauerstoff-Kreislaufgeräten besteht ausschließlich aus Sauerstoff. Die Flaschen bestehen aus Stahl, Aluminium oder antimagnetischen Materialien und haben in der Regel ein Volumen zwischen 0,8 und 1,5 Liter bei einem Fülldruck von 200 bar. Einzelne Gerätehersteller bieten auch Flaschengrößen von 1,9 bis über 2,1 Liter bei einem Fülldruck von 200 bar an. Diese werden aber in der Regel nicht verwendet, da aufgrund der angebotenen Sauerstoffmenge die Expositionszeiten deutlich über der medizinischen Verträglichkeit liegen. Zu-

sätzlich sollte bedacht werden, dass die Atemkalkmenge in diesen Tauchgeräten für Tauchgänge von max. 3–4 Stunden ausgelegt ist, die Sauerstoffmenge aber eine deutlich längere Tauchzeit (abhängig vom Atemminutenvolumen) zulässt. Die Flaschenventile haben nach europäischer Norm 3/4 Zoll Außengewinde. Italienische und russische Kreislaufgeräte haben zum Teil in die Flaschenventile fest integrierte Druckminderer eingebaut.

#### Zusätzliche Komponenten

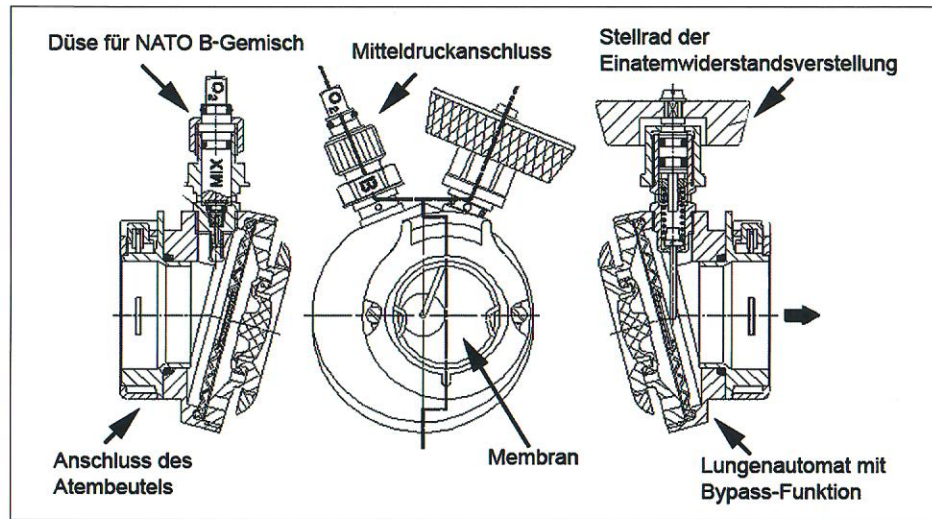
Wie in der oben genannten Aufzählung, können die Kreislaufgeräte mit den folgenden Zusatzbauteilen ausgerüstet sein.

#### Dosiereinheit/Lungenautomat

Die einzelnen Sauerstoffzuführungssysteme sind im Kapitel Tauchgeräte ausführlich beschrieben.

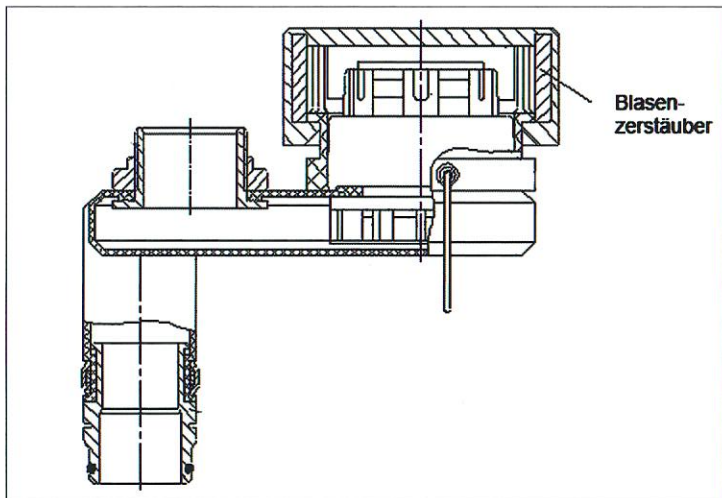
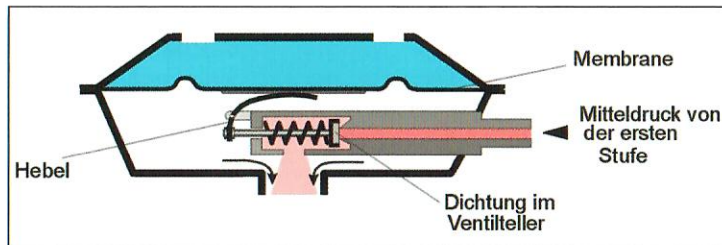


Lungenautomat eines LAR V; zu erkennen ist der Kipphebel an der Membran.



Lungenautomat mit Zuführungsmöglichkeit eines Mischgases (NATO B-Gemisch, 60 % O<sub>2</sub>, 40 % N<sub>2</sub>) und einer Einatemwiderstandsverstellung von außen.

Die lungenautomatische Steuerung ist vergleichbar mit der zweiten Stufe eines offenen Systems.



Überdruckventil mit Blasenzerstäuber.

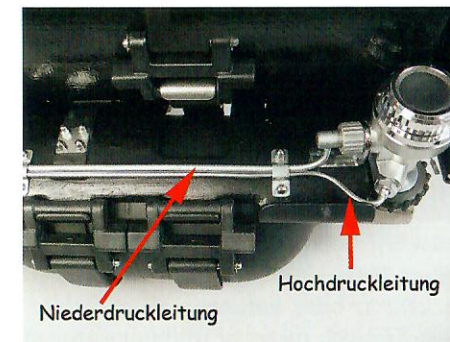
### Überdruckventil/Blasenzerstäuber (Blasendefuser)

Bei Geräten mit Konstantdosierung muss ein Überdruckventil vorhanden sein. Das Überdruckventil verhindert, dass der Atembeutel durch die ständig einströmende Gasmenge bei einem Überangebot platzt. Zudem soll das Ventil eine Beschädigung des Tauchgerätes durch expandierende Gasvolumen bei einem gewollten oder auch ungewollten Aufstieg aus großer Tiefe verhindern.

Um verräterische Blasenspuren an der Wasseroberfläche zu minimieren oder um zu vermeiden, durch akustische Reize Unterwasserminen auszulösen, montieren Militärtaucher einen Blasenzerstäuber aus Schaumstoff um das Überdruckventil. Diese Technik wird auch von Unterwasserfotografen sehr geschätzt.

### Hoch- und Niederdruckleitungen

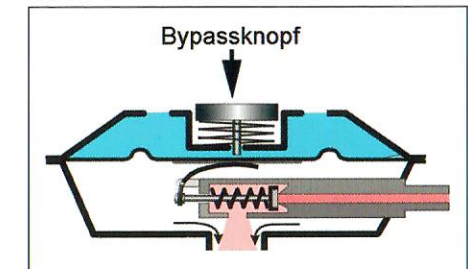
Um ein Kreislaufgerät sicher zu betreiben, sollte ein Hochdruckschlauch für das Füllen des Atembeutels vorhanden sein. Beide Leitungen können sowohl aus Metall als auch aus Gewebeschlauch hergestellt sein.



Das Bild zeigt die Kupferleitungen für Hoch- und Niederdruck an einem LAR V.

### Der Bypass

Der Bypass wurde zusätzlich in die Geräte eingebaut um ein komfortables Spülen zu ermöglichen, beim Abtauchen das durch Kompression verringerte Volumen zu ergänzen oder aber den Mehrverbrauch an Sauerstoff durch körperliche Betätigung auszugleichen.



Ein Bypass ist ein Ventil (ähnlich einer zweiten Stufe eines Lungenautomaten), welches über eine manuelle Betätigung dem Kreislauf zusätzlich Sauerstoff zuführt.

### Kontrollinstrumente

Bei allen gebräuchlichen Kreislaufgeräten kommt der Kontrolle des Sauerstoffpartialdrucks im Atembeutel eine entscheidende Bedeutung zu. Auf dem Markt erhältliche Sauerstoffpartialdruckmessgeräte ermöglichen die Kontrolle vor und während des Tauchganges. Eine preisgünstige Option stellt das seit vielen Jahren auf dem Markt befindliche Oxygauge dar. Mit einem Anschluss ausgestattet, auch P-Konnektor genannt, kann es in jedem Atembeutel eingesetzt werden. Wer ein wenig handwerkliches Geschick besitzt, kann diesen Geräteadapter selbstständig einbauen. Das Oxygauge wird danach durch einfaches Einklicken in den Atembeutel verriegelt.



Der Einbau einer Aufnahme für das Oxygauge ist einfach und Voraussetzung für die Aufnahme des Messgerätes.

Die Anzahl der auf dem Markt erhältlichen O<sub>2</sub>-Messgeräte ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Diese sind ebenfalls zu empfehlen. Neben dem Oxygauge sind auch Analysegeräte mit Tauchcomputerfunktion erhältlich.

- ▶ VR 3 der Firma Delta P Technology Limited
- ▶ Galileo der Firma Scubapro
- ▶ Cockrain der Firma Cochran Undersea Technology
- ▶ Hummerhead der Firma Juergensen Marine

Diese Geräte sind vielseitiger, aber erheblich teurer. Dafür berechnen sie den gesamten Tauchgang und kontrollieren die Sauerstoffanreicherung im Körper des Tauchers. Durch die Partialdruckanzeige kann der Taucher sofort auf Problemsituationen reagieren. Taucht man mit einem dieser Kontrollgeräte auf einer Wassertiefe von vier Metern und hat ein Sauerstoff-Kreislaufgerät mit 76 % Sauerstoff im Atembeutel, zeigt das Gerät einen Partialdruck von rund 1,1 bar pO<sub>2</sub>

$$(0,76 \% F_{iO_2} \cdot 1,4 \text{ bar Druck} = 1,064 \text{ pO}_2)$$

an. Fällt der Partialdruck auf gleich bleibender Tiefe, können mehrere Ursachen dafür verantwortlich sein:

- ▶ Überfällige Spülung des Kreislaufes (zu große Ansammlung von Stickstoff z. B. nach einem Bergseetauchgang oder vorherigem Presslufttauchgang)

Möglich, aber sehr unwahrscheinlich:

- ▶ Wassereintrich (keine Absorption des CO<sub>2</sub> dadurch Anstieg des pCO<sub>2</sub>)
- ▶ verbrauchter Atemkalk (Anstieg des CO<sub>2</sub>-Partialdrucks im Kreislaufsystem)

Bleibt der durch das Gerät angezeigte Wert auf unterschiedlichen Tiefen gleich, wurde höchstwahrscheinlich der Sensor geflutet. Sauerstoffmessgeräte ermöglichen auch die Überprüfung des Vorratsgases. Es wird immer wieder darauf hingewiesen, dass jeder Nutzer für das von ihm benutzte Gas die Verantwortung trägt. Leider sind viele Taucher zu gutgläubig und überprüfen die Vorratsflaschen nicht. Diese Fahrlässigkeit hat bereits zu tödlichen Unfällen geführt.

### Vollgesichtsmaske

Beim Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten wird fast ausschließlich eine Halbgesichtsmaske verwendet. Bei manchen Tauchern erfreut sich die Vollgesichtsmaske großer Beliebtheit. Die Vorteile dieser Maske kommen bei Tauchgängen in kaltem oder verunreinigtem Wasser zum Tragen, da kein Hautkontakt mit dem kalten oder kontaminierten Medium besteht. Schwierig wird es dann, wenn

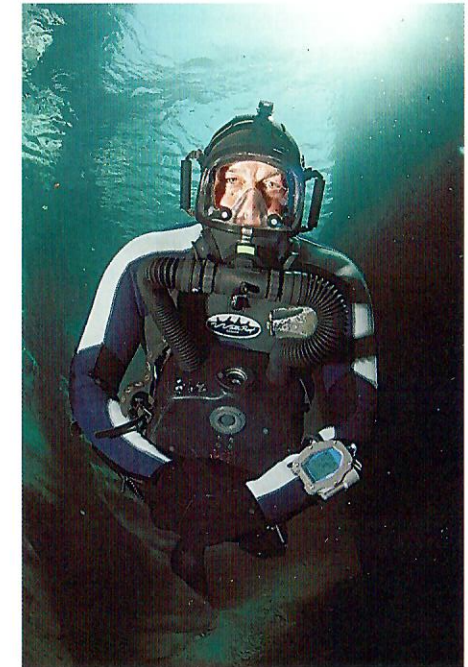


Das Oxygauge ist in vielen Kreislaufgeräten eingebaut, um den Sauerstoffpartialdruck zu überprüfen.

eine technische Störung auftritt. Bei Vollgesichtsmasken stellt Wassereintrich das größte Problem dar. In den Innenraum der Maske eingedrungenes Wasser wird durch Nase oder Mund ausgeblasen. Innerhalb des Kreislaufgerätes besteht zwar ein leichter Überdruck, dieser reicht jedoch nicht aus, um bei geöffnetem Schieber das Einfließen des Wassers in den Ausatemschlauch zu verhindern. Sollte man vergessen haben, das Mundstück zu schließen, bläst man unweigerlich Wasser in das Kreislaufgerät. Wassereintrich bedeutet meistens das Fluten der Kalkpatrone und erzwingt somit den Abbruch des Tauchganges. Bei den meisten militärischen Einheiten werden keine Vollgesichtsmasken benutzt, weil sie für deren Belange nicht zweckmäßig sind. Beim Verlassen eines U-Bootes durch das Torpedorohr wäre bei einem Geräteversager die Wechselatmung damit nicht möglich.

In Taucherkreisen hält sich das Gerücht, dass Vollgesichtsmasken beim O<sub>2</sub>-Kreislaufatmen zusätzliche Sicherheit gegen

Krämpfe durch zu hohe O<sub>2</sub>-Partialdrücke gewährleisten. Wir zweifeln diese Aussage an, denn bei einem Sauerstoffkrampf verzerrt sich das Gesicht so stark, dass Wasser an den Rändern der Maske mit großer Wahrscheinlichkeit eindringt.



Vollgesichtsmasken bieten einen hohen Tragekomfort. Zu sehen ist ein Modell der Firma Dräger mit Aufnahme für ein T-Mundstück.

## 7. Rund um den Sauerstoff

Als Hans Hass in den 1940er-Jahren mit seinem Dräger-Kreislaufgerät die Unterwasserwelt erforschte, verwendete er Sauerstoff wie er für Schweißarbeiten eingesetzt wurde. Wenn heute von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) gesprochen wird, unterscheidet man zwischen industriellem (technischem) und medizinischem Sauerstoff. Industrieller Sauerstoff findet heutzutage für den Einsatz in Kreislaufgeräten keine Verwendung mehr, da bei diesem keine Qualitätskontrolle durchgeführt wird, wie sie beim medizinischen Sauerstoff vorgeschrieben ist. Beim medizinischen Sauerstoff unterscheidet man zwischen dem Sauerstoff als Arzneimittel und Sauerstoff als Atemgas. In beiden Fällen liegt die Reinheit bei über 99 %, wobei der wesentliche Unterschied darin besteht, dass medizinischer Sauerstoff garantiert frei von giftigen Stoffen sein muss, wohingegen dies bei technischem Sauerstoff nicht sichergestellt ist. Als Arzneimittel unterliegt O<sub>2</sub> den arzneimittelrechtlichen Vorschriften für den Umgang mit Medikamenten und wird dementsprechend im Arzneibuch geführt. Medizinischer Sauerstoff ist frei verkäuflich und hat einen Verfallszeitraum von drei Jahren. Sauerstoff wird formal als Arzneimittel z. B. in Druckkammern für hyperbare Sauerstofftherapien (HBO) und normobar in Behandlungseinheiten mit offenen Systemen verwandt, als Atemgas dagegen z. B. in Kreislaufgeräten. Diese Unterscheidung ist für die taucherische Praxis allerdings nicht von Belang. Be-

trachten wir die Gefahren beim Umgang mit Atemgasen, die mehr als 21 % O<sub>2</sub> enthalten bis hin zu reinem Sauerstoff, die erhöhten Drücke und sehen wir die komplexen Vorgänge in einem Kreislaufgerät, so wird deutlich, dass wir in Europa nicht ohne Normen auf diesem Gebiet auskommen. So gilt für Tauchgeräte mit NITROX-Gasgemischen oder Sauerstoff die DIN EN 13 949 vom Juni 2003 und für Kreislauftauchgeräte die DIN EN 14 143 vom Dezember 2003. Unter dem Dach der EU-Richtlinie 89/ 686 EWG, der sogenannten »PSA-Richtlinie« (PSA = Persönliche Schutzausrüstung), wurden die Anforderungen, die Prüfung und die Kennzeichnung dieser Gerätetypen und deren Baugruppen verfasst. Auch wenn viele Normen und Gesetzesvorgaben den Alltag in vielen Bereichen des Lebens scheinbar erschweren, ist die Einbindung von Kreislauftauchgeräten in einer nachvollziehbaren Baumusterprüfung auch aus Sicherheitsaspekten sinnvoll. Sehen wir uns das am Beispiel des Flaschenventils und der Gasführung in einem Kreislaufgerät einmal näher an. Was geschieht, wenn wir das Ventil unserer Vorratsflasche öffnen? Der Sauerstoff strömt durch den Druckminderer in das Manometer und zur lungenautomatischen Steuerung oder manuellen Dosierung des Kreislaufgerätes. Bewegt sich ein Gas von hohem zum niederen Druck, kann es dabei extrem hohe Strömungsgeschwindigkeiten erreichen. Ist in dem Leitungssystem ein Widerstand vorhan-

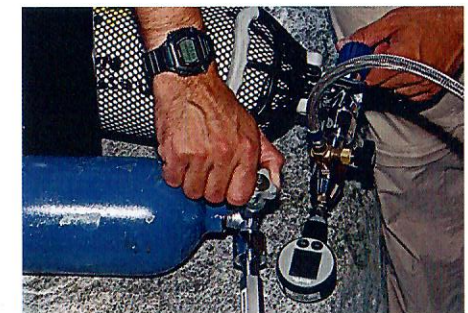
den, z. B. eine nicht sauber bearbeitete Schweißnaht in einem Anbauteil, entsteht durch die Abbremsung des Gases an dieser Querschnittsverengung ein plötzlicher Druckaufbau (adiabatische Verdichtung) und es kommt zu extremer Wärmeentwicklung. Je höher der Ausgangsdruck ist, desto höhere Temperaturen können entstehen. Wenn diese Energie nicht schnell genug abtransportiert wird, kann für bestimmte Materialien der Zündpunkt überschritten werden, was besonders bei der Anwesenheit von Sauerstoff zu einem Brandgeschehen und im ungünstigsten Fall zu einer Explosion führen kann. Einen ebensolchen Effekt können auch kleinste Partikel (Rost, Abrieb, etc.) hervorrufen, die im Gasstrom mitgerissen werden, auf ein Hindernis aufprallen und dort lokal einen Temperaturanstieg zur Folge haben. Hier kommen nun unsere Flaschenventile ins Spiel. Beim Einsatz von Kugelventilen in einem Kreislaufgerät könnte durch den sofortigen Druckaufbau beim Öffnen des Ventils der oben beschriebene Vorgang zur Wirkung gelangen. Aus diesem Grunde werden nur Spindelventile verwendet, die zur vollen Öffnung mindestens zwei volle Umdrehungen benötigen. Die für NITROX (Sauerstoffgehalt >22 %) bis hinauf zu 100 %-igem Sauerstoff zu verwendenden Druckbehälterventile werden in den Normen DIN EN 144-1 und DIN EN 144-3 festgelegt. Werden andere Atemgase verwendet, für die keine spezifischen Normen verfügbar sind, werden Ventile nach DIN EN 144-3 empfohlen. Um die Entzündungsgefahr völlig auszuschließen, müssen durch geeignete Materialwahl weitere Gefahrenquellen ausgeschlossen werden. Vorgaben hierfür liefert unter anderem das Bundesamt für Materialforschung und -prüfung.

Weitere Gefahrenquellen für eine Entzündung können sein:

- ▶ Verwendung falscher, nicht sauerstoffgeeigneter Dichtungen
- ▶ Verwendung falscher, nicht sauerstoffgeeigneter Schläuche
- ▶ der Einsatz von nicht sauerstoffkompatiblen Schmierstoffen in Hochdrucksystemen
- ▶ unachtsamer Umgang mit Vorratsflaschen
- ▶ mangelnde Sorgfalt, Pflege und Wartung (Staub, Rost)

Beim Umgang mit reinem Sauerstoff sollten folgende Grundregeln beachtet werden:

- ▶ nicht in direkter Umgebung rauchen
- ▶ Kontaktflächen wie z. B. Anschlussgewinde nicht mit den Händen berühren
- ▶ im Niederdruckbereich nur die dafür freigegebenen Schmiermittel benutzen
- ▶ nicht in öl- oder fettverschmutzter Kleidung mit Sauerstoff arbeiten
- ▶ Ventile langsam öffnen
- ▶ beim Überströmen die Füllgeschwindigkeit nicht über 70 Liter pro Minute ansteigen lassen



Leere Flaschen können durch Überströmen aus einer Vorratsflasche aufgefüllt werden.



Das Innenleben eines Poseidon Sauerstoff-kreislaufgerätes. Was fehlt, ist der Druckminderer. Die recht einfache Bauweise der Geräte sollte nicht über die Gefahren beim Betrieb mit Sauerstoff hinwegtäuschen.

Mittlerweile hat sich im Sporttauchbereich die Klassifizierung der verwendeten Baugruppen in drei Reinheitsstufen durchgesetzt. Hierbei orientiert sich die Einstufung an den Definitionen nach DIN EN 13 949:

- ▶ Oxygen-clean (Sauerstoffrein)
- ▶ Oxygen-compatible (Sauerstoffkompatibel)
- ▶ Oxygen-Service

### Oxygen-clean (Sauerstoffrein)

Diese Bezeichnung bedeutet, dass die Ausrüstungsteile, die mit Sauerstoff oder mit Sauerstoff angereicherter Luft in Berührung kommen, gereinigt sind und als solche identifiziert werden. Es werden alle Teile von Fetten, Ölen und Kohlenwasserstoffen befreit (z. B. Siliconfett von Flaschenventilen und aus Automaten). Dies schließt auch die Reinigung von allen Formen von Stäuben und Schmutzpartikeln ein.

Hierfür werden Reinigungsmittel wie z. B. Aceton oder Dive-Cleaner verwendet.

### Oxygen-compatible (Sauerstoffkompatibel)

Als Sauerstoffkompatibel werden Materialien bezeichnet, die mit reinem Sauerstoff auch unter hohen Drücken und Temperaturen eingesetzt werden können und gegen das Problem der adiabatischen Kompression von 100 % Sauerstoff widerstandsfähig sind. Dazu werden nicht nur spezielle Schmiermittel anstelle von handelsüblichen Fetten benutzt, sondern auch Gummidichtungen gegen Viton-O-Ringe ausgetauscht. Die Prüfung erfolgt mittels einer standardisierten Druckstoßprüfung mit Sauerstoff, wie beispielsweise in der DIN EN 13 949 beschrieben.

### Oxygen-Service

Man spricht von Oxygen-Service, wenn beide oben genannten Beschreibungen für ein Bauteil erfüllt sind.

Interessierte, die sich mit dem Thema Sauerstoff intensiver auseinandersetzen möchten, seien auf die BGR 500 (Berufsgenossenschaftliche Richtlinien) »Betreiben von Arbeitsmitteln«, hier: Kapitel 2.32 »Betreiben von Sauerstoffanlagen« bzw. das Merkblatt M 034, »Sauerstoff« hingewiesen. Die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat eine Liste von nichtmetallischen Materialien herausgegeben, die sich zum Einsatz in sauerstoffführenden Anlagen eignen.

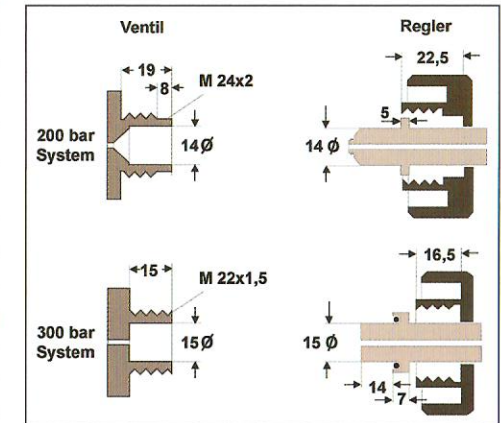
Trotz der zum Teil recht umfangreichen Sicherheitsvorgaben beim Umgang mit Sauerstoff unterliegt die Beförderung für den häuslichen Gebrauch, Freizeit und Sport nicht den Vorschriften für Gefahrguttransporte, d. h. es gelten die gleichen

Bestimmungen wie für den Transport von Druckluftflaschen für Tauchzwecke. Dabei muss sichergestellt sein, dass unter normalen Beförderungsbedingungen ein Abströmen des Inhalts verhindert wird. Um den Transport sicher zu gestalten, wird empfohlen, einen Ventilschutz zu verwenden und neben einer Ladungssicherung auch die Flasche zu kennzeichnen. Die Kennzeichnung von Druckbehältern unterliegt festgelegten Standards.

In diesem Zusammenhang appellieren wir an die Sorgfalt der »Bastler«, die sich ihre eigenen O<sub>2</sub>-Kreislaufgeräte bauen möchten. Beim Systemaufbau können sich durch Unkenntnis viele Fehler einschleichen, die eine »Sauerstoffexplosion« herbeiführen können. Es sollte klar sein, dass ohne Sauerstoff keine Verbrennung möglich ist, hingegen mit reinem Sauerstoff Substanzen viel leichter zünden und schneller abbrennen.

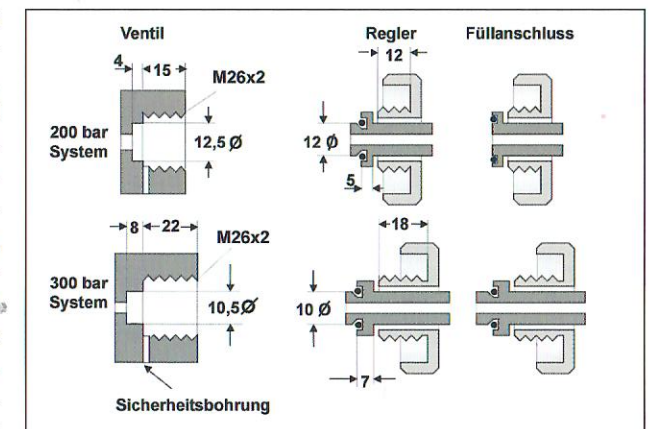
Bei Kreislaufgeräten dürfen aus diesem Grund nur Spindel- oder Nadelventile verwendet werden, die ein langsames Öffnen und Abströmen ermöglichen. Rohr- und Schlauchleitungen sollten so ausgelegt sein, dass hohe Staudrücke vermieden werden, wie sie z. B. durch plötzliche Wechsel der Rohrquerschnitte entstehen. Strömungswiderstände in Rohrleitungssystemen wie Winkel, Böden, Ventile und Regeleinrichtungen sollten möglichst weit von der Vorratsflasche entfernt liegen. Das Rohrsystem bei Sauerstoffanlagen muss daher mit großer Sorgfalt ausgelegt sein, damit plötzliche und große

Druckdifferenzen beim Öffnen des Flaschenventils aufgefangen werden. Von allergrößter Wichtigkeit ist die Auswahl und Verwendung sauerstoffkompatibler Materialien!



200 und 300 bar-Anschluss für Sauerstoff DIN EN 144-2.

Die EN 144-2 und EN 144-3; die DIN EN 144-2 wurde im Juni 2006 durch die DIN EN 144-3 ersetzt. Die Gewinde der DIN EN 144-2 dürfen mit einer Übergangsfrist von fünf Jahren bis zum 30.06.2008 verwendet werden.



200 und 300 bar-Anschluss für NITROX und Sauerstoff DIN EN 144-3.

## 8. Tauchmedizin

Als sich das Leben auf der Erde entwickelte, gab es in der damaligen Ur-Atmosphäre wahrscheinlich noch keinen oder nur sehr wenig Sauerstoff. Man geht heute davon aus, dass sich vor ca. 3,5 Milliarden Jahren Cyanobakterien entwickelten, die bereits eine urtümliche Form der Fotosynthese beherrschten, sodass vor ca. 2,5 Milliarden Jahren die damalige Atmosphäre begann freien Sauerstoff ( $O_2$ ) als Stoffwechselprodukt zu erhalten. Später vervollkommneten Pflanzen den Stoffwechselweg der Fotosynthese, bei dem das Sonnenlicht als Energiequelle genutzt wird. Dabei wird  $CO_2$  gebunden (»fixiert«) und zur Synthese komplexer organischer Moleküle verwendet. Die dazu notwendige Energie stammt aus dem Sonnenlicht. Da während der Fotosynthese molekularer Sauerstoff aus dem an der Reaktion beteiligten Wasser freigesetzt wird, reicherte sich die Atmosphäre langsam mit  $O_2$  an.

Mit der Entwicklung und Ausbreitung der höheren Pflanzen stieg der  $O_2$ -Anteil auf über 35 % in der Atmosphäre des Karbons (vor ca. 300 Millionen Jahren), um sich nachfolgend auf die heute vorliegenden Werte einzupendeln. Für viele Organismen, darunter den Menschen, stellt die Anwesenheit von Sauerstoff eine lebensnotwendige Voraussetzung für eine ausreichende Energiewandlung aus der Nahrung dar. Das Problem dabei: Sauerstoff wirkt u. a. auch als Zellgift. Die dem Sauerstoff ausgesetzten Organismen mussten sich daher entsprechend

anpassen. Chemisch handelt es sich bei Sauerstoff ( $O_2$ ) um ein farb-, geruch- und geschmackloses Gas. Aufgrund der Elektronenkonfiguration und der daraus folgenden Bindungsverhältnisse im Molekül ist der in der Atemluft vorhandene Sauerstoff relativ reaktionsträge. Viele Lebewesen verwenden Sauerstoff innerhalb des Stoffwechsels als Oxidationsmittel um die mit der Nahrung aufgenommene chemische Energie in Bewegungs- oder Wärmeenergie zu wandeln. Um als Oxidationsmittel wirken zu können, muss der Sauerstoff aktiviert werden, z. B. durch Katalyse. Dieser Vorgang vollzieht sich in jeder Zelle eines Menschen. Wie ein Verbrennungsmotor, der zur Energieumwandlung Treibstoff und Sauerstoff nutzt, setzt der Mensch aus den Reaktionen der Nahrungsbestandteile mit Sauerstoff Energie frei. Das Wissen über die Sauerstoffversorgung des Menschen und der Einfluss sich verändernder Sauerstoffpartialdrücke auf den Organismus spielen im Tauchsport eine entscheidende Rolle.

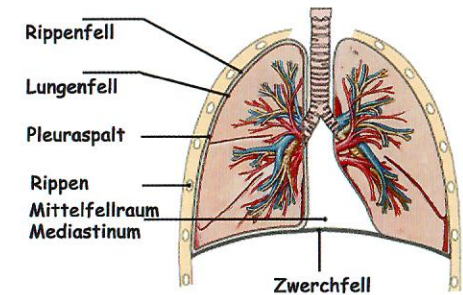
### Steuerung der Atmung

Der Sauerstoffbedarf eines Menschen ist keine konstante Größe, sondern richtet sich nach dem Sauerstoffverbrauch, der z. B. durch physische Belastung steigt. Um unter dem Einfluss vielfältiger Störgrößen immer eine optimierte und dem Bedarf angepasste Atmung zu gewähr-

leisten, wird die Atmung vom Zentralnervensystem gesteuert. Das Atemzentrum liegt im Übergang vom Rückenmark zum Gehirn, dem sogenannten verlängerten Mark (*Medulla oblongata*). Hier befinden sich sowohl die für die Einatmung, als auch für die Ausatmung zuständigen Nervenzellen. Das Ausmaß der unwillkürlichen Atemtätigkeit, also jener automatisch ablaufenden, willentlich nicht beeinflussten Atmung, richtet sich in erster Linie nach den Partialdruckwerten vom  $CO_2$  und Sauerstoff im Blut, sowie nach dem pH-Wert des Blutes. Spezielle Messfühler, sog. Chemorezeptoren, die sich in der Hauptschlagader und den Halsarterien befinden, messen diese Werte im arteriellen Blut. In erster Linie stellen der Anstieg von  $CO_2$  und pH-Wert des Blutes, dann erst ein Abfall des Sauerstoffpartialdruckes starke Atemreize dar. Außerdem wird der  $CO_2$ -Wert in der Hirnflüssigkeit gemessen. Auch hier führt ein Anstieg zu verstärkter Atmung. Ein hoher  $CO_2$ -Wert, vor allem in der häufigen Kombination mit einem verringerten pH-Wert stellt somit den stärksten Atemreiz dar. Sauerstoffmangel ist beim Gesunden dagegen ein vergleichsweise schwacher Atemreiz.

### Atemmechanik

Die Atmung dient sowohl der Sauerstoffaufnahme als auch der Kohlenstoffdioxidabgabe des Körpers an die Umwelt. Das Einatmen (Inspiration) von Atemluft erfolgt durch die Veränderung des Brustraumvolumens (Thoraxvolumen) und ist ein aktiver Prozess. Hierbei unterscheidet man zwischen der Zwerchfellatmung und der Brustatmung. Das Zwerchfell ist ein flächiger Muskel im unteren Abschnitt

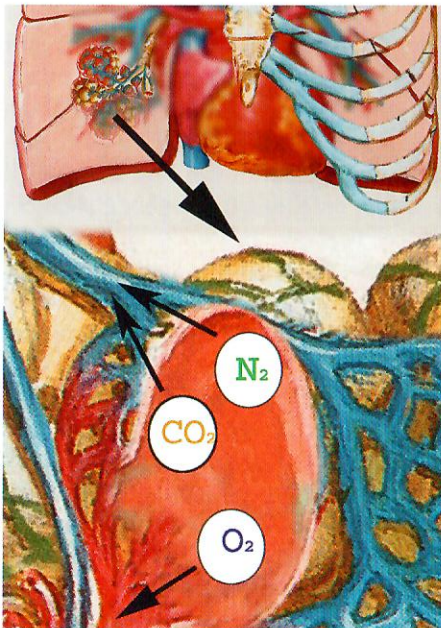


Darstellung des Brustkorbes.

des Brustkorbes, der den Brustraum vom Bauchraum trennt.

Bei der Zwerchfellatmung (abdominale Atmung) wird das Zwerchfell durch Kontraktion nach unten verlagert, sodass ein Unterdruck im Brustkorb entsteht. Dadurch strömt Luft über die Atemwege ein. Bei der Brustatmung (kostale oder thorakale Atmung) dehnt sich durch die Brustmuskulatur der Brustkorb, und der entstehende Unterdruck lässt Luft in die Lunge einströmen. Die Lungen sind vom Lungenfell (*Pleura visceralis*) ummantelt. Die Pleurahöhle, in der jeweils eine Lunge liegt, ist vom Rippenfell (*Pleura parietalis*) ausgekleidet. Zwischen Lungenfell und Rippenfell (*Pleura*) befindet sich ein dünner Flüssigkeitsfilm, die Pleuraflüssigkeit. Durch diese Flüssigkeit können sich Lungen- und Rippenfell aufeinander verschieben, ohne sich zu trennen. Die Verschiebung ist aufgrund der Größenänderungen der Lunge bei Ein- und Ausatmung nötig. Dieser Effekt ist vergleichbar mit zwei aufeinanderliegenden Glasplatten, die durch einen Wasserfilm, der sich dazwischen befindet, aufeinander gleiten können. Die Umgebungsluft gelangt während der Inspiration durch die Nase und den Mund in die Atemwege. Normalerweise atmet der Mensch durch die

Nase, wobei die Luft zum einen durch die Nasenhaare gefiltert und zum anderen durch die Schleimhäute angefeuchtet wird. Bei körperlicher Anstrengung atmet der Mensch verstärkt durch den Mund, um den erhöhten Sauerstoffbedarf zu kompensieren und mehr  $\text{CO}_2$  abzuatmen. Gelangt die Atemluft nur durch den Mund in die Lunge, so wird diese mit trockener und kälterer Luft versorgt. Aus dem Nasen- und Mundbereich strömt die Luft über den Rachenraum in den Kehlkopf und von dort durch die Stimmritzen an den Stimmbändern vorbei in die etwa zehn Zentimeter lange Luftröhre. An die Luftröhre schließen sich rechte und linke Lunge mit den Hauptbronchien an. Diese verzweigen sich in immer kleinere Bronchien und Bronchiolen. Am Ende des Bronchialbaumes befinden sich die Alveolen. In den Alveolen findet der Austausch der Atemgase zwischen der



Gas austausch in einer Alveole.

Gasphase und dem Blut der Lungenkapillaren statt. Die Anzahl der Alveolen wird auf ca. 300 Millionen geschätzt, deren Gesamtoberfläche beträgt zwischen 80 und 140  $\text{m}^2$ . Bis zu diesem Punkt spricht man von »äußerer Atmung«. Der Transport des Sauerstoffs bis zu den Zellen, die den eigentlichen Verbraucher darstellen, beruht ab den Alveolen auf physikalischen Vorgängen (Diffusion entlang der Partialdruckgradienten) und chemischen Bindungen.

Da Sauerstoff bei Normaldruck nur eine physikalische Löslichkeit von 1–2 % im Blutplasma aufweist, wird für seinen Transport im Blut ein spezielles Molekül benötigt, das Hämoglobin. Dieses eisenreiche Molekül befindet sich in den roten Blutkörperchen und ist in der Lage, bis zu vier Sauerstoffmoleküle reversibel chemisch zu binden. Wie viel Sauerstoff an das Hämoglobin gebunden wird, hängt vom Sauerstoffpartialdruck ab. Bei 21 % Sauerstoff in der Atemluft, also einem Sauerstoffpartialdruck von 0,21 bar, wird das Hämoglobin bis zu 97 % mit  $\text{O}_2$  gesättigt. Nachdem die volle Hämoglobinsättigung erreicht ist, erhöht sich gemäß dem Henryschen Gesetz nur noch der Anteil des im Plasma physikalisch gelösten Sauerstoffs.

$$C_x = a_x \cdot p_x$$

$C_x$  = Konzentration der gelösten Gasmoleküle

$a_x$  = Löslichkeitskoeffizient des Gases

$p_x$  = Flüssigkeitspartialdruck

Das Blut transportiert den Sauerstoff zu den eigentlichen Verbrauchern, den Zellen. Einfach gesagt wird nun aufgrund des geringen Sauerstoffpartialdrucks in den

Zellen der Sauerstoff vom Hämoglobin gelöst und den Geweben zur Verfügung gestellt. Mithilfe des Sauerstoffs werden nun in den Zellen bei Redoxprozessen Kohlenstoffdioxid und Wasser als Abfallstoffe gebildet. Obwohl das  $\text{CO}_2$  etwa 20-mal besser im Plasma löslich ist als  $\text{O}_2$ , wird das  $\text{CO}_2$  überwiegend in chemisch gebundener Form als Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) transportiert und steht mit diesem in einem wechselseitigen Gleichgewicht. Da die Hydratisierung von  $\text{CO}_2$  zu Kohlensäure ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) eine sehr langsame Reaktion ist, wird diese von einem Enzym (Carboanhydrase) in den roten Blutkörperchen (Erythrozyten) etwa 10000-fach beschleunigt.  $\text{H}_2\text{CO}_3$  dissoziiert sofort in  $\text{H}^+$  und ( $\text{HCO}_3^-$ ). Vom Blut werden ungebundenes und gebundenes  $\text{CO}_2$  aus dem Gewebe zu den Alveolen transportiert. Das  $\text{CO}_2$  diffundiert aufgrund der Partialdruckdifferenz aus den Erythrozyten in die Alveolen. Die Expiration des Kohlenstoffdioxids erfolgt bei ruhiger Atmung in der Regel passiv. Das durch die Inspiration gedehnte Lungengewebe wird bei der Expiration durch seine elastischen Eigenschaften zurückgestellt.

### Partialdrücke von Sauerstoff und Kohlenstoffdioxid

Um Zusammenhänge zwischen der Technik von Kreislaufgeräten und der Tauchphysiologie zu verstehen, ist es unumgänglich sich mit den Sauerstoff- und Kohlenstoffdioxidpartialdrücken im Atemkreislauf auseinanderzusetzen.

Seit 1960 ist die Verwendung des internationalen Systems der Einheiten (SI = Systeme International d'Unités) empfohlen. Die Bundesrepublik Deutschland ist wie viele Staaten dieser Empfehlung

gefolgt und hat dieses System für den geschäftlichen und amtlichen Bereich vorgeschrieben.

Die konsequente Einführung des neuen Systems erfordert jedoch in vielen Bereichen längere Übergangszeiten. So geben wir die Temperaturen im Alltag noch immer mit Grad Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ) an und nicht im SI-System in Kelvin (K).

In der Taucherei wird der Druck zwar mit der modernen Einheit bar angegeben und mit dieser Einheit auch gerechnet. Richtig wären aber Druckangaben in der Einheit Pascal (Pa). Im medizinischen Bereich werden zudem noch Angaben in mm Quecksilbersäule (mm Hg), in mm Wassersäule (mm  $\text{H}_2\text{O}$ ) oder in Atmosphären (atm) gemacht. Berücksichtigt man die Präfixe und Symbole der Zehnerpotenzfaktoren, so bedeutet dies für den Druck ( $p$ ):

Größe = Druck
Name der Einheit = Pascal
Symbol = Pa
Definition = $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$

Für die Größe Druck ergeben sich folgende Umrechnungsbeziehungen zwischen SI-Einheiten und konventionellen Einheiten:

1 cm $\text{H}_2\text{O}$	=	98,1 Pa
1 mm Hg	=	133 Pa
1 atm	=	101 kPa
1 bar	=	100 kPa
1 Pa	=	0,0102 cm $\text{H}_2\text{O}$
1 Pa	=	0,0075 mm Hg
1 kPa	=	0,0099 atm
1 kPa	=	0,01 bar

Umrechnungsbeziehungen.

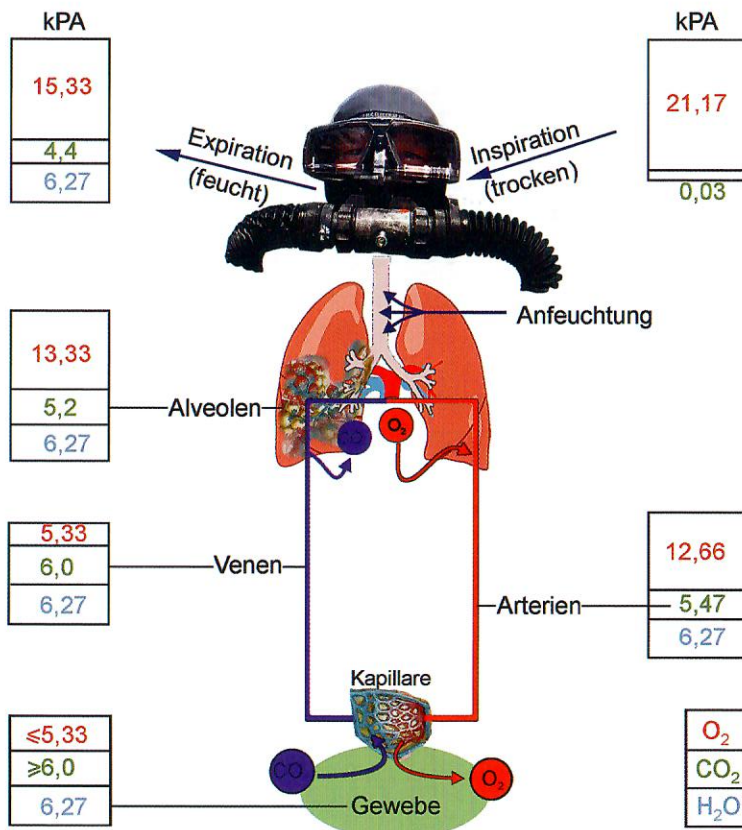
Zur Erleichterung für Sporttaucher, die Druckangaben ausschließlich in bar lernen müssen, haben wir diese jeweils in

Faktor	Präfix	Symbol	Faktor	Präfix	Symbol
$10^{-1}$	Dezi	d	10	Deka	da
$10^{-2}$	Centi	c	$10^2$	Hekto	h
$10^{-3}$	Milli	m	$10^3$	Kilo	k
$10^{-6}$	Mikro	$\mu$	$10^6$	Mega	M
$10^{-9}$	Nano	n	$10^9$	Giga	G
$10^{-12}$	Pico	p	$10^{12}$	Tera	T
$10^{-15}$	Femto	f	$10^{15}$	Peta	P

Präfixe und Symbole häufig gebrauchter Zehnerpotenz-Faktoren.

Klammer hinter die Pascal (Pa)- bzw. Kilopascal (kPa)-Werte gesetzt (siehe auch im Anhang).  
Wer bislang angenommen hat, dass die Einatemluft mit 21 kPa (0,21 bar) durch

den Körper geführt wird, der irrt. Im arteriellen System liegen andere Partialdrücke der einzelnen Gase ( $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) vor als in den Venen. In der Grafik wird gezeigt, dass die Partialdrücke der ein-



Partialdrücke innerhalb des Körpers.

zelnen Gase in den verschiedenen Kompartimenten des Körpers sehr verschieden sind. Die Umgebungsluft enthält zunächst 21 kPa  $O_2$  (0,21 bar). Nachdem die Atemluft durch die Schleimhäute angefeuchtet wurde, sinkt der  $O_2$ -Gehalt aufgrund der Verdünnung durch den Wasserdampf auf einen Sauerstoffpartialdruck von 19,87 kPa (0,1987 bar). Da bei Ruheatmung pro Atemzug nur etwa 10 % der Alveolarluft durch Frischluft ersetzt werden, beträgt der  $pO_2$  in den Alveolen nur noch 13,33 kPa (0,1333 bar). Da aus dem Blut das Kohlenstoffdioxid in die Alveolen diffundiert, beträgt der  $pCO_2$  dort 5,2 kPa. Im arteriellen Blut betragen der  $pO_2$  etwa 12,66 kPa (0,1266 bar) und der  $pCO_2$  5,47 kPa (0,0547 bar). Die mittleren Gewebepartialdrücke betragen  $pO_2 \leq 5,33$  kPa und  $pCO_2 \geq 6,0$  kPa. Im venösen Blut betragen  $pO_2$  5,33 kPa (0,053 bar) und  $pCO_2$  6,0 kPa (0,06 bar). Der Diffusionsgradient zwischen venösem Blut und dem Alveolarraum beträgt für das Kohlenstoffdioxid an dieser Stelle nur 0,8 kPa (0,008 bar). Daraus wird klar, dass der gesamte Atemprozess ein sehr empfindlicher Vorgang ist, der gerade im Tauchsport sehr leicht ins Ungleichgewicht gebracht werden kann. Wird z. B. mit einem Atemkalk getaucht, der das Kohlenstoffdioxid nicht ausreichend absorbiert, so kann man sich vorstellen, dass

schon eine geringe Erhöhung des  $pCO_2$  in der Einatemluft zu einer wesentlichen Erhöhung des  $pCO_2$  im Alveolarraum führt. In der Ausatemluft befinden sich 15,33 kPa  $O_2$  (0,1533 bar) und 4,4 kPa  $CO_2$  (0,044 bar). Berücksichtigt man den Wassergehalt in der Ausatemluft, so beträgt der  $pO_2$  etwa 17 kPa (17 %  $O_2$ ) oder 0,17 bar. Der Mensch nutzt also nur 4 % des ihm zur Verfügung stehenden Sauerstoffs in der Atemluft.

### Atemminutenvolumen

Der Sauerstoffverbrauch des menschlichen Organismus ist nicht konstant. Er richtet sich nach den Anforderungen, die an den Körper gestellt werden. Eine Bezugsgröße, mit der man den Sauerstoffverbrauch unter verschiedenen physischen Belastungen grob abschätzen kann, ist das Atemminutenvolumen. Als Atemminutenvolumen wird das Luftvolumen bezeichnet, das der Mensch innerhalb einer Minute ventilert (l/min). In Ruhe beträgt das Atemminutenvolumen eines Erwachsenen etwa 7 l/min. Da sich in einem Liter Atemluft 0,21 Liter  $O_2$  befinden, beträgt die Gesamtsauerstoffmenge in 7 Liter Atemluft 1,47 l. Bedenkt man, dass der Mensch nur ca. 4 % des ihm zur Verfügung stehenden Sauerstoffs

Belastung	$O_2$ -Bedarf [l/min]	Atemminutenvolumen [l/min]
Ruhe	0,3	7
Leichtes Flossenschwimmen	0,7	18
Mäßiges Flossenschwimmen	1,2	30
Schweres Flossenschwimmen	1,6	40
Schnelles Flossenschwimmen	2,4	60
Schwerstarbeit	> 4,0	> 120

Physische Belastung, Sauerstoffbedarf und AMV.

verbraucht, so beträgt der Sauerstoffbedarf in Ruhe etwa 0,3 Liter pro Minute. Dieser Wert wird in der medizinischen Fachliteratur für eine 70 kg schwere Person angegeben. In der anliegenden Tabelle sind verschiedene physische Belastungen dem Sauerstoffverbrauch und dem Atemminutenvolumen gegenübergestellt.

Die Europäische Norm (EN 250) definiert den Sauerstoffbedarf eines Menschen mit 2,5 Liter O<sub>2</sub> pro Minute unter Belastung. Dieser Wert muss in allen Tauchgeräten sichergestellt sein, um die Gefahr einer Hypoxie zu vermeiden. Diese Gasmenge entspricht der eines anstrengenden Tauchganges (Atemminutenvolumen von 62,5 l/min).

### Sauerstoffunterversorgung (Hypoxie)

Betrachtet man nochmals die Grafik der Gaspartialdrücke des Körpers, so wird deutlich, dass der Mensch einen Mindest-Sauerstoffpartialdruck benötigt, um dauerhaft zu überleben. Wenn dieser Partialdruck unter 16 kPa O<sub>2</sub> (0,16 bar O<sub>2</sub>) (16 %) fällt, so wird die treibende Kraft der O<sub>2</sub>-Diffusion (Sauerstoffgradient) zwischen den Alveolen und den Erythrozyten zu gering. Selbst bei 16 % Sauerstoffanteil in der Atemluft ist keine körperliche Anstrengung mehr möglich. Die Symptome für eine Hypoxie können sein:

- ▶ Reduzierte Leistungsfähigkeit
- ▶ Konzentrationsschwäche
- ▶ Gedächtnislücken
- ▶ Sehstörungen (z. B. Tunnelblick)
- ▶ Gefühllosigkeit in den Lippen
- ▶ Kreislauf- und Atemstörungen
- ▶ Bewusstlosigkeit

Bei Nutzung eines O<sub>2</sub>-Kreislaufgerätes sind mehrere Situationen denkbar, die eine Sauerstoffunterversorgung herbeiführen können. An erster Stelle steht insbesondere bei Anfängern, die noch angespannt und sehr nervös an das Kreislaufftauchen herangehen, dass sie vergessen, die Sauerstoffflasche zu öffnen und einen Spülvorgang durchführen. Wurde der Überdrucktest mit Umgebungsluft (Ausatmen in das Gerät, um den Atembeutel aufzufüllen) durchgeführt, atmet der Taucher zunächst ohne die oben genannten Symptome im Kreislauf. Da anfänglich im Atembeutel noch 21 % Sauerstoff vorhanden sind, kann man ohne Probleme mehrmals atmen. Anders als beim offenen System, wo sich sofort herausstellt, dass die Ventile nicht geöffnet sind, bemerkt man dies bei Kreislaufgeräten nicht. Der Taucher kann noch einige Male atmen, ohne dass der Atemreiz durch den CO<sub>2</sub>-Partialdruck angeregt wird, da das CO<sub>2</sub> durch die Atemkalkpatrone absorbiert wird. Der sinkende Sauerstoffpartialdruck wird vom Körper nicht sofort registriert. Im Normalfall würde ein nicht geöffnetes Ventil der Vorratsflasche sofort auffallen, da beim Spülvorgang das fehlende Nachströmen des Atemgases festgestellt würde. In der angesprochenen Situation der allerersten Tauchgänge mit Rebreathern kann das übersehen werden, sodass der Taucher nach kurzer Zeit hypoxisch wird. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Entstehung einer Hypoxie beim Auftauchen. Durch den abnehmenden Umgebungsdruck und den daraus resultierenden Partialdruckabfall kann es zur Unterversorgung mit Sauerstoff kommen. Ausgeschlossen wird diese Gefahr durch einmaliges Spülen des Atemkreislaufes vor dem Aufstieg.

Eine weitere potenzielle Gefahr besteht in der Verwendung eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes nach einem Presslufttauchgang.

Der durch einen Presslufttauchgang überproportional in den Körpergeweben gelöste Stickstoff wird durch Atmung von Sauerstoff wieder »ausgeschwemmt«. Dies führt zu einem starken Konzentrationsanstieg von N<sub>2</sub> im Atemkreislauf des Rebreathers. Von einer Sauerstoffunterversorgung erholt sich der Organismus sehr rasch, wenn er wieder Frischluft oder Sauerstoff zugeführt bekommt. Führt eine Hypoxie beim Tauchen jedoch zur Bewusstlosigkeit, stellt dies für den Taucher eine akut lebensbedrohliche Situation dar.

### Mechanismen der Sauerstoffvergiftung

Der Mensch hat sich im Laufe seiner Evolution an einen O<sub>2</sub>-Anteil von 21 % in der Atemluft angepasst. Dies entspricht einem Druck von 21 kPa (0,21 bar) Sauerstoffs bei einem Umgebungsdruck von 100 kPa (1,0 bar). Da der Mensch in seiner natürlichen Umgebung nie höheren Sauerstoffpartialdrücken ausgesetzt war, musste er sich logischerweise auch nie daran adaptieren. Es ist daher nicht verwunderlich, dass der menschliche Organismus auf höhere Sauerstoffpartialdrücke (Hyperoxie) mit einer Sauerstoffvergiftung reagiert. Dass Sauerstoff in höheren Konzentrationen schädliche Auswirkungen auf fast alle Organsysteme hat, ist bekannt. Lange war jedoch unklar, worauf genau die toxische Wirkung dieses Gases beruht, das für den Menschen zwingend lebensnotwendig ist. In den letzten 40 Jahren wurden enorme For-

schungsanstrengungen in diesem Bereich unternommen. Insbesondere die Fortschritte in der Biochemie haben dazu beigetragen, neue Erkenntnisse zu gewinnen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Toxizität von Sauerstoff auf die Produktion sogenannter »aktivierter Sauerstoffformen« zurückzuführen ist. Diese Sauerstoffformen werden auch unter der Bezeichnung reaktive Sauerstoffspezies (*reactive oxygen species*, ROS) zusammengefasst. Diese entstehen bei der Aktivierung des reaktionsträgen molekularen Sauerstoffs in den Mitochondrien, den »Kraftwerken« der Zellen. Innerhalb dieser als Atmungskette bezeichneten Reduktionskette erfolgt die Übertragung der Elektronen auf den molekularen Sauerstoff in mehreren durch Enzyme präzise regulierten Schritten, bis zur vollständigen Reduktion des O<sub>2</sub> mithilfe von Wasserstoff zu Wasser. Dabei entstehen formal einfach, zweifach, dreifach und vierfach reduzierte Sauerstoffmoleküle. Diese sind allerdings in der beschriebenen Form nicht immer existent, sondern bei physiologischem pH-Wert zum Teil als Hydroperoxid, Wasserstoffperoxid oder als OH-Radikal vorzufinden. Im Zuge der oben beschriebenen Reaktion kann es zu einer unvollständigen Reduktion des molekularen Sauerstoffs kommen, sodass intrazellulär reduzierte Sauerstoffformen (ROS) entstehen. Diese in der Chemie als Radikale bezeichneten Moleküle besitzen freie ungepaarte Elektronen. Diese Verbindungen haben das Bestreben, ihr Elektronendefizit durch Reaktionen mit anderen Molekülen auszugleichen, um einen neutralen Zustand zu erreichen. Die meisten Radikale sind unter normalen Bedingungen extrem reaktionsfreudig und daher nur kurze Zeit lebensfähig. Außer den ROS gibt es auch reaktive

Stickstoffspezies (RNS), die ebenfalls Zellschädigungen bewirken und zudem in der Lage sind, mit ROS unter der Bildung von verschiedenen radikalischen und nichtradikalischen Verbindungen in Wechselwirkung zu treten. Ein besonders reaktionsfreudiges Radikal ist z. B. das Peroxinitrit, das aus einer Reaktion eines Sauerstoffradikals mit Stickstoffmonoxid (NO) entsteht. Dieses Peroxinitrit wird unter physiologischen Bedingungen durch weitere Reaktionen in Verbindungen umgewandelt, die dann Zellschäden wie Lipidperoxidationen (was zur Zerstörung der Zellmembranen führt) und DNA-Schäden induzieren können.

Bei der erwähnten Lipidperoxidation handelt es sich um eine radikalische Kettenreaktion, die von ROS und Peroxinitrit angestoßen wird. Dabei werden die ungesättigten Fettsäuren in den Membranen der Zelle geschädigt. Durch die Lipidperoxidation kommt es zu strukturellen und funktionellen Membranveränderungen in der Zelle, die nach heutiger Vorstellung u. a. zur Entstehung degenerativer Erkrankungen führen können. Höher entwickelte Lebewesen und damit auch der Mensch sind diesen Radikal-Angriffen aber nicht schutzlos ausgeliefert, sondern haben während der Evolution eine Vielzahl von Schutzmechanismen entwickelt. Zellen besitzen hierzu eine Reihe körpereigener sowohl nichtenzymatischer als auch enzymatischer Antioxidantien. Auch einige Vitamine sind als Antioxidantien aktiv. Vitamin A besitzt, da es stark reduzierend wirkt, die Fähigkeit die Radikale abzufangen, und Vitamin E schützt vor Lipidperoxidation, da es mit Peroxidradikalen reagiert und die Kettenreaktion damit abbricht. Vitamin C wiederum schützt das Vitamin E. Im Gegensatz dazu konnte in Experimenten gezeigt werden,

dass es nach der Gabe unphysiologisch hoher Konzentrationen von Vitamin C zu einer starken ROS-Bildung kam. Normalerweise herrscht ein Gleichgewicht zwischen der Bildung von reaktiven Sauerstoffspezies und der antioxidativen Kapazität in den Zellen. Es gibt jedoch Situationen, während derer es zu einer erhöhten Produktion von ROS und/oder einer verminderten Beseitigung durch die Abnahme zellulärer Abwehrmechanismen kommen kann. In der Fachliteratur wird dies als oxidativer Stress bezeichnet. In diesem Zusammenhang werden nicht nur die erhöhte Radikalbildung durch hyperbaren Sauerstoff diskutiert, sondern auch die Auswirkungen spontaner ROS-Bildungen im Organismus auf die Genese von Erkrankungen und auf den Alterungsprozess.

### Sauerstoffvergiftung

Man unterscheidet grundsätzlich zwischen zwei Formen der Sauerstoffvergiftung. Zum einen handelt es sich um eine langsam eintretende Form (chronische Hyperoxie), von der die akute Hyperoxie abgegrenzt werden muss.

#### Pulmonale Sauerstoffvergiftung

Die Lunge weist im Gewebe den höchsten Sauerstoffpartialdruck aller Gewebe auf und ist damit das Organ mit der höchsten Empfindlichkeit für die Sauerstofftoxizität. Der Brite J. L. Smith beschrieb bereits vor fast 100 Jahren die schädigende Wirkung von Sauerstoff auf die Lunge. Er unterschied eine schnelle ( $>1,3$  bar  $pO_2$ ) und eine langsame ( $0,5$ – $1,3$  bar  $pO_2$ ) Form der Vergiftung. Der menschliche Körper toleriert also in Grenzen höhere Sauerstoffpartialdrücke.

Übersteigt der Sauerstoffanteil in der Atemluft jedoch einen Wert von  $0,5$  bar  $pO_2$ , kann nach längerer Einwirkzeit eine Lungenschädigung auftreten. Nach dem schottischen Pathologen und Physiologen Lorrain Smith (1832–1931) wurden die Symptome unter dem Lorrain-Smith-Effekt zusammengefasst:

- Atemwegreizung
- Gefühl des Brennens hinter dem Brustbein
- Rachenschmerz
- Schwellung der Nasenschleimhäute
- trockener Husten
- Atemnot

Diese Symptome können in jeder beliebigen Reihenfolge auftreten: Husten ohne Auswurf, erhöhter Atemwiderstand, Schwierigkeiten beim tiefen Einatmen, erniedrigte Vitalkapazität, Engegefühl hinter dem Brustbein und Schmerzen in den Bronchien. Als Ursache wird sowohl die Veränderung des Lungengewebes durch hohen Sauerstoffpartialdruck angesehen als auch die unten diskutierte Bildung von Atelektasen. Die ersten Veränderungen durch einen pulmonalen toxischen Effekt sind zwar bei Beendigung der Sauerstoffexposition reversibel, aber durch die Messung der Vitalkapazität nachweisbar. Die Vitalkapazität stellt ein Maß für die Ausdehnungsfähigkeit der Lunge und des Thorax (Brustkorb) dar. Ein Normwert für die Vitalkapazität kann nicht angegeben werden, da diese von Alter, Geschlecht, Körpergröße und dem Trainingszustand abhängt.

#### Akute pulmonale Toxizität

Eine akute pulmonale Toxizität kann bei Sauerstoffpartialdrücken ab  $80$  kPa ( $0,8$  bar) eintreten. Sie lässt sich weiter unter-

scheiden in eine *exsudative* und eine *proliferative* Phase, wobei die Veränderungen zunächst exsudativ beginnen und bei Fortbestehen der Schädigungsmechanismen in die proliferative Phase übergehen. Die exsudative Phase (Exsudation = ein durch eine Entzündungsreaktion bedingter Austritt von Flüssigkeit und Zellen aus dem Blut und den Lymphgefäßen) ist dabei von einer Entzündungsreaktion im Bereich der Alveolen gekennzeichnet, die mit einer Ödementwicklung und entzündlichen Veränderungen der Alveolar-membran einhergeht. Hält die Entzündungsreaktion bei Fortbestehen des Reizes (z. B. hohe Sauerstoffteildrücke) an, kommt es zum Umbau der Alveolar-membran (proliferative Phase), die zur Verdickung der Membran und zur Einsteifung der Lunge führt. Insgesamt ist das Geschehen also durch eine Vergrößerung der alveolo-kapillären Diffusionsstrecke, Untergang von Kapillaren der pulmonalen Strombahn und Thrombosierung von Lungenarteriolen gekennzeichnet, was einen gestörten Gasaustausch zur Folge hat. Der eigentliche Lorrain-Smith-Effekt bezeichnet nur die exsudative Phase. Kommt es noch während der exsudativen Phase zu einer Erholungsphase, ist mit vollständiger Umkehr der pathologischen Veränderungen zu rechnen. Bei der proliferativen Phase kann es jedoch zur Defektausheilung kommen, d. h. permanente Vernarbungen können die Folge sein.

### Chronische pulmonale Toxizität

Chronisch lungentoxisch wirkt Sauerstoff typischerweise bei längerer Exposition mit  $pO_2$ -Werten zwischen  $50$  kPa bis  $80$  kPa ( $0,5$  bis  $0,8$  bar). Diese Form ist

durch fortschreitende Umbauvorgänge der Lunge gekennzeichnet. Alle Formen der pulmonalen Sauerstoffvergiftung führen zu einem Verlust von Vitalkapazität, der jedoch bei einigen Formen (s. o.) reversibel sein kann. Tatsächlich zeigen Versuche sowohl bei Patienten in Therapiedruckkammern als auch bei Tauchern, die hyperbaren Sauerstoff atmen, dass schon eine einzige Exposition (abhängig von der Expositionszeit und Sauerstoffpartialdruck) eine messbare Wirkung auf die Vitalkapazität der Lunge hatte. Andererseits konnte eine erst im Jahre 2005 veröffentlichte Langzeituntersuchung bei Kampfschwimmern zeigen, dass es trotz intensiven Sauerstofftauchens zu keiner langfristigen Lungenschädigung kam.

**Atelektasen-Bildung**

Da das Tauchen mit Sauerstoff zum »Auswaschen« von Stickstoff aus dem Gewebe führt, kann es zur Ausbildung von Atelektasen in der Lunge kommen. Atelektasen sind Abschnitte in der Lunge, die nicht belüftet werden, weil die Alveolen kollabiert sind. Dies hat primär nichts mit einer toxischen Wirkung von Sauerstoff zu tun, sondern ist eher die Folge des Fehlens eines »Füllgases« wie z. B. Stickstoff. Sauerstoff kann nämlich vollständig vom Körper aufgenommen und verstoffwechselt werden, sodass sich, vereinfacht ausgedrückt, die Alveolen komplett »entleeren« können. Zusätzlich zerstören Sauerstoffradikale die oberflächenaktiven Substanzen (Surfactant), welche normalerweise die Oberflächenspannung der Alveolen herabsetzen und ihnen helfen, offen zu bleiben. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Lorrain-Smith-Effekt zunächst

eine Verdickung/Schwellung der Alveolen sowie auch der Wandungen der Lungengefäße beschreibt. Danach kommt es zur Ödembildung und bei weiterem Fortschreiten zum Zusammenfallen von Alveolen (Atelektasen-Bildung). Wie bereits beschrieben, ist die Schädigung des Lungengewebes durch Sauerstoff mit einer Verringerung der ventilierbaren Gasmenge verbunden und durch Messung der Vitalkapazität nachweisbar. Schon in den 1960er-Jahren konnte in entsprechenden Versuchen ein Zusammenhang zwischen der Vitalkapazität und einer Lungenintoxikation mit Sauerstoff nachgewiesen werden. In der aktuellen Literatur haben sich hierfür die Einheiten UPTD und OTU durchgesetzt, die aber letztendlich dasselbe darstellen.

1 UPTD = 1 min O<sub>2</sub>-Atmung bei 100 kPa (1 bar)

Unter UPTD versteht man *Unit of Pulmonary Toxicity Dose*, was frei übersetzt als Mengeneinheit der Lungenschädigung durch Sauerstoff verstanden werden kann.

pO <sub>2</sub>	Kp Faktor	pO <sub>2</sub>	Kp-Faktor
0,5	0,00	1,3	1,48
0,6	0,26	1,4	1,63
0,7	0,47	1,5	1,78
0,8	0,65	1,6	1,93
0,9	0,83	1,7	2,07
1,0	1,00	1,8	2,22
1,1	1,16	1,9	2,36
1,2	1,32	2,0	2,64

Sauerstoffpartialdrücke mit Angabe der Kp-Faktoren.

Zur Berechnung der prozentualen Abnahme der Vitalkapazität muss der Kp-Faktor des genutzten Sauerstoffpartialdruckes

atm!

in der Tabelle ermittelt werden. Dieser stellt einen Korrekturfaktor dar und korreliert mit der Abnahme der Vitalkapazität. Wird der Kp-Faktor mit der Expositionszeit (Minuten) multipliziert, so erhält man die UPTD. Mit der zweiten Tabelle ist man nun in der Lage die berechneten UPTD einer Abnahme der Vitalkapazität zuzuordnen.

UPTD	Abnahme der Vitalkapazität in %
615	2 %
825	4 %
1035	6 %
1230	8 %
1425	10 %
1815	15 %
2190	20 %

Abnahme der Vitalkapazität in Abhängigkeit von der UPTD.

Die zweite in der Literatur gebräuchliche Einheit ist OTU (*Oxygen tolerance unit*).

$$OTU = \frac{0,5 \cdot t}{(pO_2 - 0,5)^{0,83}}$$

t = Expositionszeit (min.)

pO<sub>2</sub> = O<sub>2</sub> Partialdruck (bar)

Der Wert 0,5 beschreibt dabei die Schwelle des Sauerstoffpartialdrucks, unterhalb derer keine Schädigung des Lungengewebes entsteht. Der Exponent -0,83 steht für die Abnahme der Lungenvitalkapazität bei Partialdrücken, die über 0,5 bar liegen. Die unten aufgeführte Tabelle dient zur Berechnung der beim Tauchgang aufgenommenen OTU-Einheiten.

tolerierte OTUs pro Tauchgang	1.Tag	2.Tag	3.Tag	4.Tag	5.Tag	6.Tag	7.Tag	8.Tag	9.Tag	10.Tag	>10
	850	700	620	525	460	420	380	330	310	300	300

Tolerierte OTUs pro Tauchgang.



Erholungsphase zwischen zwei Sauerstofftauchgängen.

Bei Tauchgängen an mehreren Tagen nacheinander sollten die angegebenen Höchstgrenzen der tolerierten OTUs nicht überschritten werden. Das bedeutet, dass an einem Wochenende (zwei Tauchtage) die Höchstgrenze von maximal 700 OTU pro Tag nicht überschritten werden sollte.

**Akute zentrale Sauerstoffvergiftung**

Wichtiger noch als das Zielorgan Lunge ist für den Sauerstofftaucher die Wirkung hoher Sauerstoffpartialdrücke auf das zentrale Nervensystem (ZNS). Schon in den frühen Anfängen des Tauchens mit hyperbarem Sauerstoff wurden bei Tauchern ab einem nicht genau bekannten

350 330 310



Paul Bert.

ten Sauerstoffpartialdruck oder nach längeren Tätigkeiten unter Sauerstoff Krämpfe beobachtet.

Um diesem Phänomen auf die Spur zu kommen, beschäftigte sich Paul Bert, ein französischer Physiologe (1833–1886), mit Sauerstoffpartialdruck-Untersuchungen am menschlichen Organismus. Seine Untersuchungen bildeten die Basis für die weitere Erforschung von akuten Symptomen der Sauerstoffintoxikation. Dokumentierte Unfälle zeigen, dass Sauerstoffkrämpfe gelegentlich schon nach kurzer Zeit bei Sauerstoffpartialdrücken von 180 kPa (1,8 bar) auftreten, mit deutlich erhöhter Wahrscheinlichkeit aber ab 300 kPa (3 bar) O<sub>2</sub> beobachtet werden können. Symptome oder Vorzeichen, die einen Krampf ankündigen, können auftreten, wurden jedoch in vielen Fällen weder vom Verunfallten bemerkt noch von Außenstehenden dokumentiert.

*In der Praxis hat sich gezeigt, dass in vielen Fällen keinerlei Vorzeichen für einen drohenden Sauerstoffkrampf zu bemerken sind.*

Typische Symptome die vor einem Krampf auftreten sind:

- ▶ Sehstörungen – Vision – meistens Tunnelsehen bzw. Tunnelblick
- ▶ Ohrgeräusche – Ears – meistens klingeln
- ▶ Übelkeit – Nausea – leicht, im Intervall
- ▶ Zuckungen – Twitching – Lippen, Gesichtsmuskeln, Augenlider, dann Hände, Arme, Beine; häufiges und deutlichstes Warnzeichen!
- ▶ Verwirrtheit – Irritability –
- ▶ Schwindelgefühl – Dizziness –

In der amerikanischen Literatur werden die Sauerstoff-Vergiftungssymptome mit

#### V - E - N - T - I - D

zusammengefasst.

Atemnot mit Erstickungsgefühl, Beklemmungen, subjektives Gefühl erhöhten Atemwiderstandes können weitere Warnzeichen sein.

### Sauerstoffkrampf

Die schwerste Form der Sauerstoffvergiftung kann, wie oben erwähnt, zerebrale Krampfanfälle auslösen. Dabei ist der Mensch nicht mehr bei Bewusstsein. Der gesamte Körper wird dabei von schweren tonisch-klonischen Krämpfen geschüttelt, die sich rasch zu einer Serie zuckender Bewegungen von Armen und Beinen, Rumpf, Kopf und Gesicht entwickeln. Zusätzlich kommt es zum krampfhaften unwillkürlichen Luftanhalten. Unter Umständen werden große Mengen schaumigen Speichels abgegeben (blutig-schaumig bei Zungen- oder Schleimhaut-

biss). Das Krampfen hält dabei so lange an, wie der Körper den erhöhten Sauerstoffwerten ausgesetzt ist. Wird die Sauerstoffgabe unterbrochen, hört der Krampf nach ein bis zwei Minuten auf, der Mensch entspannt sich und fällt in einen tiefen Schlaf. Nach einer Periode von 15 bis 60 Minuten erwacht der Verunfallte und ist in der Regel wieder voll ansprechbar. Unmittelbare Nachwirkungen können starke Kopfschmerzen und Erschöpfungszustände sein. Für die Zeit des Ereignisses besteht meist ein Erinnerungsverlust. Gesicherte Erkenntnisse, warum Sauerstoff giftig auf das zentrale Nervensystem wirkt, gibt es noch nicht. Dies ist eine Aussage, auf die man in der Tauchmedizin und Tauchphysiologie oft stößt. Da aber molekularer Sauerstoff ein Zellgift ist, dürfte die Ursache in einer schädlichen Wirkung des Sauerstoffs auf Zellen des ZNS zu suchen sein.

Die Ursache für einen solchen sauerstoffbedingten Krampfanfall könnten die zerstörerischen Wirkungen der oben beschriebenen freien Radikale im zentralen Nervensystem sein. Hier ist besonders das Zusammenspiel von ROS und RNS mit der beschriebenen Peroxynitrit-Bildung unter Verdacht. Diese Substanz führt auch im Bereich der Nervenzellen zur Schädigung von Zellmembranen und so, sehr vereinfacht ausgedrückt, quasi zum »Kurzschluss« der elektrisch aktiven Zellen.

Tritt ein Sauerstoffkrampf ein, so hilft prinzipiell nur die sofortige Reduktion des Sauerstoffpartialdrucks, was bei einem Sauerstoffkrampf in einer Therapiedruckkammer recht leicht, unter Wasser aber kaum problemlos möglich ist. Unter Wasser besteht die Gefahr, dass ohne Hilfe bereits der erste Krampf zum Tode führt. Hauptrisiko dabei ist das

Ertrinken, bisweilen auch die Überdehnung der Lunge bei krampfhaft angehaltener Atmung mit nachfolgendem Lungenriss bei noch vor dem Bewusstseinsverlust aktiviertem Notaufstieg. Aus diesem Grunde ist es sehr wichtig, die beim Tauchen empfohlenen Grenzen für den pO<sub>2</sub> strikt einzuhalten. Nach derzeitigem Kenntnisstand ist ein sauerstoffbedingter zerebraler Krampfanfall für sich gesehen nicht gesundheitsgefährlich, wenn das erhöhte Verletzungsrisiko nicht berücksichtigt wird. Trotzdem sollte gerade wegen der sehr hohen Gefahr der Begleitschädigung beim Tauchen darauf geachtet werden, dass es niemals zu einem solchen Ereignis kommt.

Dies erklärt, warum unter kontrollierten Bedingungen wie einer Druckkammerbehandlung sehr viel höhere Sauerstoffpartialdrücke (bis zu 2,4 bar (240 kPa) O<sub>2</sub>) akzeptiert und angewendet werden, als beim Tauchen unter Wasser.

*Bei einem Sauerstoffkrampf unter Wasser besteht für den Betroffenen akute Lebensgefahr durch Ertrinken oder beim Notaufstieg durch Überdehnen der Lunge und Lungenriss.*

### Berechnungen zur ZNS-Toxizität

Wie alle Vergiftungen hängt auch die Sauerstoffvergiftung nicht nur von der Dosis (O<sub>2</sub> in kPa oder bar) und der Expositionsdauer ab. Forschungen der Königlich Britischen Marine und der US Navy mit geschlossenen Kreislaufgeräten ergaben bereits vor 60 Jahren, dass die Entstehung von Sauerstoff-Vergiftungssymptomen auch stark von individuellen Schwankungen und Gemütszuständen des Tauchers abhängt. Während einige beobachtete Taucher an einem Tag relativ hohe Sauerstoffpartialdrücke vertru-



Entspanntes Tauchen mit Kreislauftauchgeräten.

gen, kam es vor, dass dieselben Personen am darauf folgenden Tag nach relativ kurzer Zeit und in geringer Tiefe Krämpfe erlitten.

Allerdings zeigten Experimente der britischen und amerikanischen Marine, die später von Dr. Kenneth Donald mit eigenen Ergebnissen ergänzt und in seinem Buch »Oxygen and diver« zusammengefasst wurden, dass das Risiko einen Sauerstoffkrampf zu erleiden unterhalb eines  $pO_2$  von 1,6 bar (160 kPa) sehr gering ist. Daraus resultiert nicht zuletzt die Vorgabe, den  $pO_2$  je nach Tauchsituation nicht über 1,4 bzw. 1,6 bar (140 bzw. 160 kPa) ansteigen zu lassen. Um zusätzlich eine individuelle Sauerstoffunverträglichkeit bei Militärtauchern auszuschließen, werden in der deutschen Marine Sauerstofftoleranztests durchgeführt. Diese beinhalten eine 30-minütige Sauerstoffbelastung bei 18 Metern Tiefe mit reinem Sauerstoff.

Die »National Oceanic and Atmospheric Administration« (NOAA) fasste die Forschungsergebnisse der 1970er-Jahre zusammen und veröffentlichte 1978/79 das Diving Manual. Das Buch enthielt unter anderem Messwerte, die in der rechts oben gezeigten Tabelle zusammengefasst sind. In dieser ist der Zusammenhang zwischen dem Partialdruck und der daraus resultierenden maximalen Expositionszeit dargestellt. Diese Grenzwerte sind mit großen Sicherheitsreserven versehen.



An einem Bootswrack im Lago Maggiore.

atm!

Tauchzeit-Limit (min.) für Einzeltauchgänge	Tageslimit (min.) für Mehrtauchgänge	Maximaler $O_2$ -Druck (bar)	% ZNS/min.
45	150	1,6	2,22
120	180	1,5	0,83
150	180	1,4	0,67
180	210	1,3	0,56
210	240	1,2	0,48
240	270	1,1	0,42
300	300	1,0	0,33
360	360	0,9	0,28
450	450	0,8	0,22
570	570	0,7	0,18
720	720	0,6	0,14

Zusammenhang zwischen  $O_2$ -Partialdruck und daraus resultierender, maximaler Expansionszeit.

Die Tabelle gibt Auskunft, wie weit das ZNS bei bestimmten Sauerstoffpartialdrücken und Expositionsauern belastet wird. Somit ist man in der Lage den Tauchgang so zu planen, dass nur ein sehr geringes Risiko für das Auftreten eines Sauerstoffkrampfes bestehen bleibt.

Die ZNS  $O_2$ -%-Tabelle gibt an, um wie viel Prozent pro Minute Tauchzeit die theoretische ZNS-Toxizität des  $O_2$  für einen bestimmten Sauerstoffpartialdruck zunimmt. Hieraus wird dann die Gesamtbelastung bei einer bestimmten Tauchzeit kalkuliert. Für die Planung eines Wiederholungstauchganges reduziert sich die bereits aufgenommene ZNS  $O_2$ -% Dosis pro 90 Minuten Oberflächenpause um die Hälfte. Bei einer Oberflächenpause von mehr als neun Stunden kann die Dosis auf 0 % herabgesetzt werden.

#### Berechnung des ZNS- $O_2$ - Wertes

- Bestimmung des Sauerstoffpartialdrucks ( $pO_2$ ) für die Maximaltiefe
- Ermittlung des ZNS- $O_2$ -% Wertes für die Tiefe, multipliziert mit der

Tauchzeit ergibt die Gesamtbelastung durch diesen Tauchgang  
 ► Eventuell Addition des Restwertes vom letzten Tauchgang

Die Benutzung der ZNS-Tabellen soll an einem Tauchgang von 30 Minuten in fünf Meter Tiefe gezeigt werden, dabei wird von einem Sauerstoffgehalt von 76 % im Atembeutel ausgegangen:

Der Umgebungsdruck in fünf Meter Tiefe beträgt 1,5 bar. Wird dieser Druck (1,5 bar) mit dem Sauerstoffpartialdruck in der Gegenlunge multipliziert, so erhält man einen Sauerstoffpartialdruck von 1,14 bar  $pO_2$  in fünf Meter Tiefe. Die ZNS-Toxizität (ZNS- $O_2$ -%) beträgt für einen  $pO_2$  von 1,14 bar (aufgerundet auf 1,2 bar) in der Tabelle 0,48 % ZNS/min. Mit diesem Wert kann in der Tabelle die maximale Tauchzeit von 210 Minuten ermittelt werden. Wird nun der Wert von 0,48 % ZNS/min mit der Dauer des Tauchganges multipliziert, so erhält man eine Belastung von 14,4 % ZNS. Um einen Sauerstoffkrampf auszuschließen,

sollte an einem Tag eine ZNS-Belastung von 100 % nicht überschritten werden.

### Risikoe erhöhende Faktoren

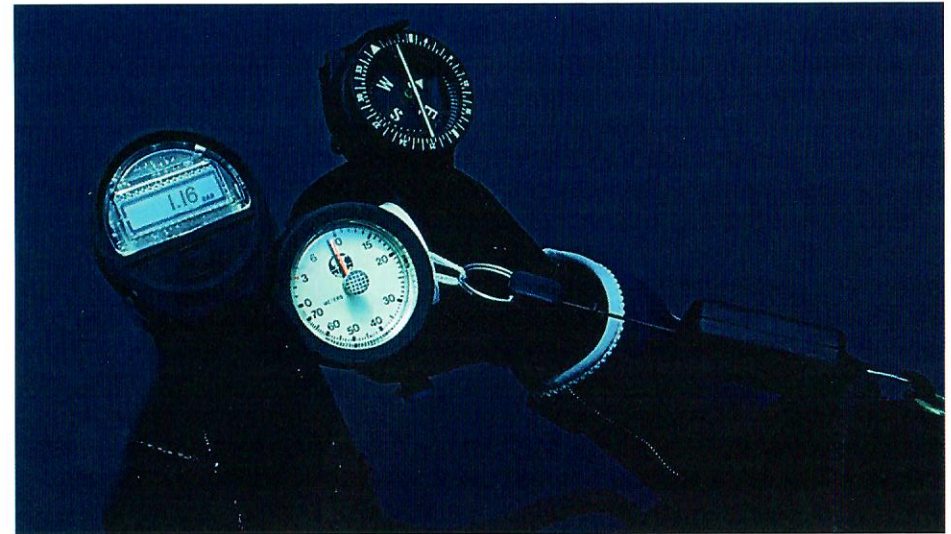
Das zentrale Nervensystem schützt sich gegen eine Sauerstoffintoxikation durch eine Verminderung der Durchblutung, indem die Blutgefäße enggestellt werden. Die Gefäßregulation reagiert auf weitere Faktoren ebenso. So sind z. B. erhöhte CO<sub>2</sub>-Werte (siehe Kapitel Kohlenstoffdioxid) im Blut ein sehr starker Gefäßweitsteller im Bereich der Hirngefäße. Weiten sich aber die Hirngefäße und kommt es damit zu einer gesteigerten Hirndurchblutung, nimmt der oxidative Stress zu und die Wahrscheinlichkeit eines sauerstoffbedingten Krampfanfalls steigt. Ähnlich wirken auch andere Mechanismen, die zu einem gesteigerten Stoffwechsel und zu einer erhöhten Organdurchblutung führen, wie z. B. erhöhte Körpertemperatur und Fieber, körperliche Anstrengung oder »Alkoholater«, der nicht nur zu einer Gefäßweitung im Gehirn führt, sondern auch zur Unterzuckerung (Hypoglykämie). Eine solche Hypoglykämie, gleich aus welcher Ursache, erhöht schon allein das Krampfrisiko. Darüber hinaus beeinflussen auch Medikamente oder bestimmte Grunderkrankungen die Sauerstoffempfindlichkeit. Unbestritten bleibt, dass Medikamente sich sowohl positiv als auch negativ auswirken können. Bestimmte Erkältungsmittel können die Krampfschwelle senken, Amphetamine und Steroide können die Sauerstoffempfindlichkeit und damit das Risiko einer Sauerstoffvergiftung erhöhen. Das gilt auch für bestimmte Herzmedikamente, die als Wirkstoff Stickstoffmonoxid (NO) freisetzen, denn dieses reagiert, wie oben beschrieben, mit den Sauerstoffradika-

len zu dem für die Zellmembranen sehr gefährlichen Peroxinitrit. Dagegen sollen Mittel wie Phenytoin (Dilantin) und Diazepam (Valium), die die Gefahr von Muskelkrämpfen reduzieren, auch die Tendenz zur Sauerstoffvergiftung heruntersetzen. Grundsätzlich ist aber von einem Einsatz dieser stark beruhigenden Medikamente beim Tauchen abzuraten, da sie das Bewusstsein beeinträchtigen.

### Vermeidung einer Sauerstoff-Vergiftung

Eine Sauerstoff-Vergiftung wird extrem unwahrscheinlich, wenn man die einschlägigen Richtlinien beachtet. Dazu gehört die Berücksichtigung des kritischen pO<sub>2</sub>-wertes. Bei Verwendung von halbgeschlossenen Kreislaufgeräten kann der O<sub>2</sub>-Gehalt der Gemische an die jeweilige Tiefe angepasst werden. Beim Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten dürfen die maximale Tauchdauer und Tauchtiefe nicht überschritten werden. Beim Rebreather-Tauchen ist zu beachten:

- ▶ Die vorgeschriebenen Zeit- und Tiefenlimits dürfen nicht überschritten werden.
- ▶ Die Tauchgeräte müssen stets in einem guten Wartungszustand sein.
- ▶ Die Sicherheitsvorschriften der Geräte sind unbedingt zu beachten.
- ▶ Außergewöhnliche körperliche Belastung ist zu vermeiden.
- ▶ Übelkeit, rascheres oberflächiges Atmen, Beklemmungen beim Einatmen sowie Pulsveränderungen, allgemein sämtliche Warnzeichen [VENTID], seien sie noch so gering, müssen als eine beginnende Sauerstoffvergiftung angesehen werden. Der sofortige Abbruch des Tauchgangs ist zwingend erforderlich.



Unter Wasser ist die Atemgaskontrolle nur mit einem Sauerstoffmessgerät möglich.

*Die einzig zuverlässige Maßnahme zur Verhinderung von Sauerstoffkrämpfen ist die sofortige Reduktion des pO<sub>2</sub>!*

Auch wenn gerade beim Tauchen mit Rebreathern unter der Vorstellung, dass nur sehr erfahrene Taucher damit tauchen, der Grundsatz »Tauche nie allein!« diskutiert wird, bleibt das »Buddy System« die beste Versicherung gegen (Beinahe-) Ertrinken als Folge einer O<sub>2</sub>-Intoxikation.

### Erste Hilfe bei Sauerstoff-Vergiftung

Die wichtigste Maßnahme bei einer Sauerstoffvergiftung ist die Reduktion des Sauerstoffpartialdrucks, da die Vergiftungssymptome dann von alleine zurückgehen. Ist es allerdings unter Wasser zu einem Krampfanfall gekommen, besteht zusätzlich die Gefahr zu ertrinken oder einen Lungenriss zu erleiden. Häufig liest und hört man in diesem Zusammenhang,

dass Taucher, die unter Wasser einen Sauerstoffkrampf erlitten haben, bei der Behandlung keinen Sauerstoff erhalten dürfen. Das ist ein falscher und gefährlicher Unsinn! Die Sauerstoffvergiftung des Gehirns ist ein akutes Ereignis, welches zwingend mit einem deutlich erhöhten Sauerstoffpartialdruck zusammenhängt. Obwohl ein Zuviel an Sauerstoff zur Störung geführt hat, kann schon unmittelbar danach ein Sauerstoffmangel eintreten. Und genau das ist der Fall, wenn es infolge eines Sauerstoffkrampfes z. B. zum Beinahe-Ertrinken oder zum Lungenriss mit arterieller Gasembolie gekommen ist. Hier muss mit 100 % Sauerstoff behandelt werden. Kommt es unter dieser Behandlung an der Wasseroberfläche dann erneut zum Krampfanfall, so wurde dieser mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht vom Sauerstoff ausgelöst, sondern wahrscheinlich durch eine zerebrale Gasembolie oder eine Hypoxie durch Beinahe-Ertrinken ver-

ursacht. Auch und gerade dann muss weiter Sauerstoff gegeben werden, und es kann sogar eine Druckkammerbehandlung mit hyperbarem Sauerstoff notwendig werden!



Sauerstoff-Kreislaufgeräte können unter Beachtung der Sauerstoffpartialdrücke auch für tiefere Tauchgänge eingesetzt werden.

#### Erste-Hilfe-Maßnahmen sind:

- ▶ Frischluft (Verringerung des  $pO_2$ )
- ▶ Schutz vor Verletzungen, Beinahe-  
Ertrinken, Überdehnung der Lunge
- ▶ Sauerstoffbeatmung
- ▶ Vermeiden von Unterkühlung
- ▶ Transport zum Krankenhaus

### Kohlenstoffdioxid-Vergiftung

Kohlenstoff oder Kohlenstoffverbindungen können durch Reaktion mit Sauerstoff in die entsprechenden Oxide überführt werden. Sie kennen diese Vorgänge z. B. vom Grillen oder von brennenden Kerzen. Läuft die Verbrennung unvollständig, weil zu wenig Sauerstoff vorhanden ist, so entsteht schwarzer Ruß. Bei ausreichend Sauerstoff entsteht das gasförmige Kohlenstoffdioxid ( $CO_2$ ). Chemisch gesehen wurde Kohlenstoff oxidiert. In der Umgangssprache wurde daraus vereinfacht Kohlendioxid. Entsprechend verhält es sich mit dem giftigen Kohlenstoffmonoxid, das bei ungenügender Sauerstoffzufuhr in Verbrennungsanlagen entstehen kann. In unseren Zellen findet der oxidative Abbau der Nahrungsbestandteile mithilfe von Enzymen bei Körpertemperatur statt. Dieser enzymkontrollierte Abbau führt im Gegensatz zur Oxidation durch Verbrennen immer zu  $CO_2$ , nie zu Ruß (C) oder Kohlenstoffmonoxid (CO).

Kohlenstoffdioxid ist zu 0,04 Vol % in der Einatemluft enthalten. Es ist ein farb- und geruchloses Gas und entsteht als Endprodukt bei der Oxidation von Eiweiß, Fett und Kohlenstoffhydraten während der Stoffwechselvorgänge im Organismus. Bei einem Atemvorgang werden von den 21 %  $O_2$  der Atemluft rund 4 %

chemisch gebunden und zur Verwendung als Oxidationsmittel im Körper weitergeleitet. Als Ergebnis des Oxidationsvorgangs entsteht das Kohlenstoffdioxid, welches vom Blut zur Lunge transportiert wird. Zum Transport ist das  $CO_2$  im Blut (in Erythrozyten und im Plasma) chemisch als Hydrogenkarbonat ( $HCO_3^-$ ) gelöst oder zu einem kleinen Teil als Carbamat an freie Aminogruppen besonders des Hämoglobins gebunden. Abhängig vom Kohlenstoffdioxidpartialdruck ist ein weiterer Teil physikalisch gelöst. Erhöhter Sauerstoffbedarf, wie er bei körperlicher Belastung entsteht, wird durch beschleunigte und tiefe Atmung gedeckt. Steigt jedoch der  $CO_2$ -Gehalt in der Einatemluft, erhöht sich entsprechend der  $pCO_2$  im Blut, was zu einer vertieften und beschleunigten Atmung führt (Hyperventilation). Bei Kreislaufgeräten kann es durch Defekte im Bereich der Kalkpatrone zu unzureichender Bindung des abgeatmeten Kohlenstoffdioxids und in der Folge zu einem Anstieg des  $CO_2$  im Kreislauf kommen. Bei Anstieg der  $CO_2$ -Konzentration von ursprünglich rund 0,04 % auf über 2,5 % kommt es zu den ersten Vergiftungserscheinungen in Form einer beschleunigten Atmung, um das überschüssige  $CO_2$  abzuatmen. Bei 5 %  $CO_2$  kommt es zu Schweißausbrüchen, Angstgefühlen, Ohrensausen und starken Kopfschmerzen. Die Atmung ist mühevoll und anstrengend. Der Betroffene ist in seinem Leistungsvermögen eingeschränkt, aber noch bei Bewusstsein und voll orientiert. Steigt der Volumenanteil auf 9 %  $CO_2$ , also auf einen Partialdruck von  $pCO_2 = 0,09$  bar, treten Schwindel, Erbrechen, Apathie, Schläfrigkeit und schließlich Bewusstlosigkeit ein. Für Tauchgeräte wurde ein Grenzwert von 0,5 %  $CO_2$  im Atemgemisch festge-

legt. Wird dieser Wert überschritten, so gilt ein Tauchgerät als nicht mehr betriebsbereit. Im Kapitel Atemkalk wird auf diesen Grenzwert näher eingegangen.

### Hyperkapnie

Hyperkapnie entsteht durch einen Überschuss an Kohlenstoffdioxid. Dazu kommt es, wenn durch eine zu geringe Ventilation das Atemminutenvolumen sinkt. Durch den dann in der Lunge reduzierten Gasaustausch wird zu wenig  $CO_2$  abgeatmet. Der Kohlenstoffdioxidgehalt in der Alveolar-Luft und im Blutkreislauf erhöht sich dann und bewirkt:

- ▶ Kopfschmerzen
- ▶ Verwirrung und beschleunigtes Atmen
- ▶ Bewusstseinsverlust

Beim  $O_2$ -Kreislauftauchen stellt die Hyperkapnie ein erhebliches Problem dar. Wassereintrich, verbrauchter Atemkalk und Kanalbildung im Atemkalkbehälter setzt die Absorption von Kohlenstoffdioxid herab. Hier nutzt langsames und tiefes Atmen nichts, da das  $CO_2$  nicht in die Umwelt abgegeben wird. Ein Defekt der Kalkpatrone führt zum Anstieg des nicht mehr gebundenen  $CO_2$  im Atemkreislauf.

Die häufigsten gerätebedingten Ursachen für Kohlenstoffdioxidvergiftung können sein:

- ▶ unzulängliche  $CO_2$ -Bindung im Atemkalkbehälter durch Kanalbildung
- ▶ überlagerter Atemkalk
- ▶ Wassereintrich durch defekten Atemkalkbehälter oder eine beschädigte Dichtung

- ▶ defekte oder falsch montierte Richtungsventile
- ▶ durch niedrige Temperaturen bedingte Herabsenkung der Atemkalkleistung
- ▶ geräte- oder ausrüstungsbedingte Pendelatmung

*Eine CO<sub>2</sub>-Vergiftung beruht meist auf Problemen mit dem Atemkalk oder dem Atemkalkbehälter.*

### Essoufflement (franz. Atemlosigkeit, außer Atem sein)

Beim Essoufflement als eigenständige Sonderform der Kohlenstoffdioxidvergiftung treten mehrere Faktoren zusammen auf. Die verminderte Ventilation, die bei höherer Gasdichte und hoher Arbeitsbelastung auftritt, spielt eine sehr wichtige Rolle. Es tritt vor allem beim Tauchen in

größeren Tiefen auf, und dort bevorzugt bei stärkeren Anstrengungen. In der Luftröhre und den Hauptbronchien ist im Normalfall eine turbulente Strömung vorhanden. Durch den relativ großen Durchmesser dieser »Rohre« sind jedoch keine störenden Auswirkungen auf die Atmung gegeben. Nach der Aufzweigung in die kleineren Bronchialäste und die Bronchiolen ist die Strömungsgeschwindigkeit jedoch beim gesunden Menschen und unter normobaren Bedingungen so gering, dass hier eine laminare Strömung vorliegt. Dies ist einerseits von Bedeutung, um einen guten Gasaustausch in den Alveolen (Lungenbläschen) zu gewährleisten, andererseits, um den Energieaufwand für die Tätigkeit »Atmen« so gering wie möglich zu halten. Beim Tauchen haben wir es bekanntlich mit komprimierter Luft zu tun, die entsprechend des Umgebungsdruckes in der jeweiligen Tauchtiefe veratmet wird. Dies bedeutet,

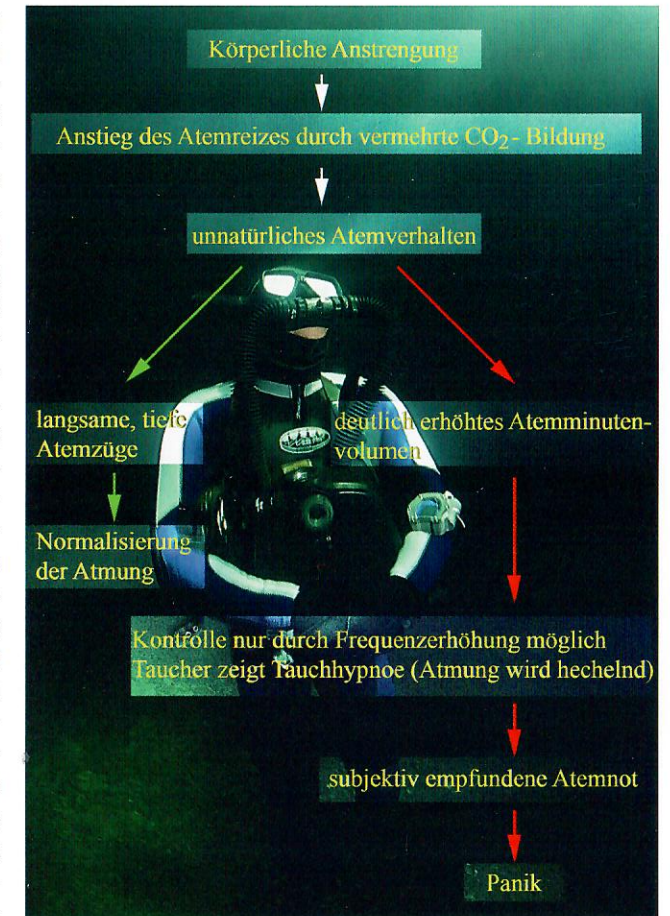


Tauchgang im Wildwasserfluss der Verzasca.

dass die Dichte der Luft mit zunehmender Tiefe immer größer wird. Als Folge erhöht sich die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in den Atemwegen. Beide Faktoren zusammen, also dichtere Atemluft und erhöhte Strömungsgeschwindigkeit, lassen aus der laminaren Strömung in den kleinen Luftwegen eine turbulente Strömung werden. Dies allein führt schon zu einer erhöhten Atemarbeit und einem verschlechterten Gasaustausch in der Lunge mit einem erschwerten Abatmen von CO<sub>2</sub>. Zusätzlich verengt jedoch der

volumen zu erhöhen. Da die Atemreserven jedoch schon maximal ausgeschöpft sind, kommt es zu keiner Besserung. Das Gefühl, nicht ausreichend Luft zu bekommen, hat eine Panik und das dringende Verlangen zur Folge, dorthin zu gelangen, wo ausreichend Luft zur Verfügung steht, zur Wasseroberfläche. Das kann einen unkontrollierten Notaufstieg zur Folge haben.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass beim Essoufflement die CO<sub>2</sub>-Erhöhung durch körperliche Anstrengung, gro-



Essoufflement.

ßen Durchsatz von Gas mit erhöhter Dichte und zusätzlich durch einen schlechten Trainingszustand begünstigt wird.

### Dehydration (Austrocknung)

Bei der Atmung im offenen System wird dem Taucher verdichtete, trockene Luft zugeführt. Diese Luft muss bei der Passage durch die Atemwege erwärmt und durch die von den Schleimhäuten abgegebene Feuchtigkeit mit Wasserdampf aufgesättigt werden, um beim Eintreten in die Lunge ca. 37 °C warm und wasserdampfgesättigt zu sein. Dies entzieht dem Körper kontinuierlich Flüssigkeit. Anders sieht es beim Kreislauftauchen aus. Hier wird das warme Gas im Kreis geführt, das sich bei der ersten Lungen-

passage auch mit Wasserdampf gesättigt hatte. Da diese Feuchtigkeit im System verbleibt, wird dem Körper beim Kreislauftauchen nur wenig Flüssigkeit über die Atemwege entzogen.

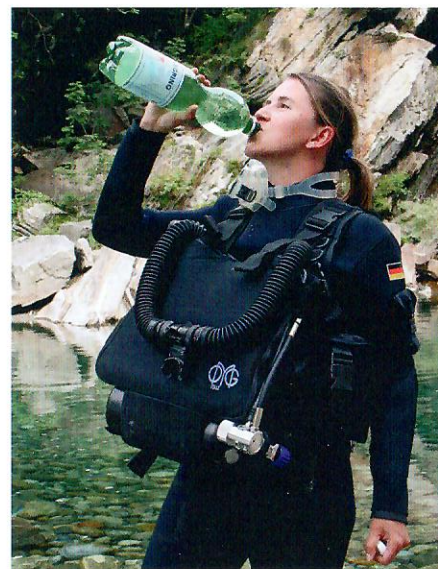
Doch auch beim Tauchen mit Rebreather verliert der Körper Flüssigkeit durch:

- ▶ Hitze (Sonneneinstrahlung, Taucher im Tauchanzug bei Warmwetter)
- ▶ Auskühlung (kaltes Wasser)
- ▶ Aufregung, Furcht, Seekrankheit
- ▶ Harnausscheidung
- ▶ Verdunstung über die Haut
- ▶ Kondenswasserbildung aus dem Atemgas im Atembeutel

Im Sommer ist es aus nahe liegenden Gründen nicht ungewöhnlich, dass dem Körper Flüssigkeit entzogen wird. Anders verhält es sich im Winter. Durch das Frieren wird die Atmung stärker aktiviert,



Durch zusätzliche körperliche Anstrengung, wie z. B. das Abseilen in einen Fluss, erhöht sich der Flüssigkeitsverlust des Tauchers.



Ausreichende Flüssigkeitsaufnahme gehört zu den wichtigsten Präventivmaßnahmen beim Tauchen. Auch beim Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten verliert der Körper Flüssigkeit. Apfelsaftschorle und Wasser gleichen den Wasserhaushalt wieder aus.

und die kalte, trockene Umgebungsluft muss angefeuchtet werden, was zu einem Flüssigkeitsverbrauch führt. Der Körperstoffwechsel wird dabei zur Aufrechterhaltung der Körpertemperatur beschleunigt.

Des Weiteren neigen wir bei niedrigen Umgebungstemperaturen dazu, Heißgetränke wie Kaffee oder Tee zu bevorzugen.

Tee und Kaffee allerdings entziehen dem Körper bedingt durch ihre Inhaltsstoffe Teein bzw. Koffein ihrerseits Flüssigkeit. Zurückzuführen ist dies auf eine verstärkte Aktivierung der Nierenfunktion, die zu einer erhöhten Harnproduktion führt. Neueste Erkenntnisse zweifeln den Einfluss dieser Stoffe zwar an, aber viele Taucher kennen dieses Phänomen und

führen es eindeutig auf den Genuss von Kaffee und Tee zurück. Auch der Genuss von Alkohol hat Konsequenzen für den Taucher, nicht nur hinsichtlich des Wahrnehmungsvermögens und der Reaktionsfähigkeit. Alkohol reduziert die Freisetzung des Anti-Diuretischen-Hormons (ADH), eines der Hormone, die die Nierenfunktion steuern. ADH reguliert in den Nieren die Wiederaufnahme von Wasser aus dem Primärurin zurück in den Körper. Wenn die ADH-Freisetzung gedrosselt wird, dann halten die Nieren weniger Wasser aus dem Primärurin zurück. Dadurch steigt die Urinproduktion und der Taucher muss vermehrt »Wasser lassen«. Alkoholkonsum führt also dazu, dass der Taucher vermehrt Wasser (und damit Volumen) verliert. Ebenso sorgt die Gewichtslosigkeit und waagerechte Körperhaltung im Wasser dafür, dass sich das venöse Blut aus den Extremitäten zum Körperkern verlagert. Dabei sammelt sich das Blut bevorzugt im venösen System des Brustkorbes und erhöht die Füllung des rechten Vorhofs (rechtes Atrium) des Herzens. Das größere Blutvolumen und die damit verbundene erhöhte Wandspannung im rechten Vorhof aktivieren die hier vorhandenen Dehnungsrezeptoren. Dies führt zur Freisetzung des Hormons ANF (Atrialer-Natriuretischer Faktor). Ähnlich einer Verminderung der Freisetzung des ADH-Hormons wird durch vermehrte ANF-Ausschüttung die Wasserausscheidung über die Nieren (Diurese) gesteigert. Das Ergebnis ist eine vermehrte Urinproduktion. Um eine Schädigung des Körpers durch Dehydration zu vermeiden, sollte man vor einem Tauchgang ausreichend trinken, auch wenn kein Durst verspürt wird. Zu empfehlen ist der Konsum von Getränken, die dem Körper Flüssigkeit und Mineralien

zuführen, wie z. B. Apfelsaftschorle. Durch den Verlust von Flüssigkeit reduziert sich auch das Blutvolumen.

## Lungenüberdehnungsverletzungen

Die Lunge ist ein zartes Organ und von Natur aus an Überdruck nicht angepasst. Bereits ein relativ geringer Überdruck von nur 75 bis 100 Zentimetern Wassersäule (0,075 bis 0,1 bar) kann zum Einreißen von Lungengewebe führen. In der Praxis bedeutet dies, dass man unter Umständen bereits dann eine Lungenüberdehnungsverletzung riskiert, wenn man mit luftgefüllter Lunge aus geringer Tiefe (z. B. im Nichtschwimmerbecken) abrupt zur Oberfläche aufsteigt. Hinsichtlich des Erscheinungsbildes ähneln Lungenüberdehnungsverletzungen auffallend der Dekompressionskrankheit. Auch die in beiden Fällen notwendigen Erste-Hilfe-Maßnahmen und die folgende klinische Behandlung sind so gut wie identisch. Bei den Verletzungen, die durch eine Überdehnung der Lunge entstehen, gibt es verschiedene Erscheinungsformen. Sie gehören zu den gefährlichsten Zwischenfällen und häufigsten Todesursachen beim Tauchen. Wegen des Risikos einer Lungenüberdehnung wird auch die Hauptforderung im Bereich der Atmung »Niemals die Luft anhalten« verständlich, denn eine zu hohe Aufstiegs geschwindigkeit bei nicht ausreichender Abatmung kann schnell zu einer Lungenüberdehnungsverletzung führen. Das Risiko steigt bei älteren Tauchern, da die Dehnungsfähigkeit der Lunge mit dem Alter nachlässt. Im Unterschied zu den Dekompressions-Erkrankungen durch Stickstoff treten bei Lungenüberdehnungsverletzungen die Auswirkungen sofort nach

dem Tauchgang und nicht mit Verzögerung (bis zu 24 Stunden danach) ein.

Neben zu schnellen Aufstiegen (meist in Paniksituationen) können auch folgende Gründe die Ursache für einen Lungenüberdruckunfall darstellen:

- ▶ Organische Probleme – Gewebeschwäche der Lunge, Chronische Bronchitis und andere Erkrankungen, Narben nach Tuberkulosekrankheit, zurückliegende Operation im Brustkorb
- ▶ Eingeschränkte Lungenfunktion im Rahmen sog. obstruktiver Atemwegserkrankungen. – Die Atemluft kann bei einer Verkrampfung der Bronchialmuskulatur oder einer Schleimhautschwellung nicht schnell genug aus den Bronchiolen entweichen, es droht das gefährliche sogenannte »Air-Trapping«.
- ▶ Bronchusverschlüsse (durch Polypen, Tumore oder Fremdkörper) – Die Atemluft kann zwar in die Lunge hineingelangen, jedoch beim Auftauchen aus einem Lungenabschnitt nicht wieder zügig entweichen, da hier die Atemwege blockiert sind.

Die Überdehnung der Lunge kann zu einer Vielzahl von akuten Gefahren führen. Risse im Bereich des Brustmittelraumes, das Platzen von Lungenbläschen und Lungenrisse im Bereich des Brustfells sind einige der verschiedenen Möglichkeiten. Wir möchten hier folgende Überdehnungsverletzungen betrachten:

- ▶ Arterielle Gasembolie
- ▶ Luftembolie
- ▶ Pneumothorax
- ▶ Medistinalempysem
- ▶ Air-Trapping

### Arterielle Gasembolie

Die arterielle Gasembolie ist die gravierendste Komplikation des Lungenrisses durch mechanische Überdehnung der Alveolen. Das in den Alveolen enthaltene Gas gelangt hierbei in die Blutgefäße der Lunge und erhält direkten Zugang zum arteriellen System. Die eingedrungenen Gasblasen gelangen dann über den Blutkreislauf in die lebenswichtigen Organe und blockieren schließlich kleine arterielle Gefäße, was zu einem Infarkt des dahinterliegenden Gewebes führt. Dies kann im ganzen Körper geschehen. Eine Gasembolie schädigt aufgrund der anatomischen Gegebenheiten vorwiegend das Gehirn und das Herz.

### Luftembolie im Gehirn

Arterielle Gasblasen gelangen in die hirnversorgenden Arterien und führen zu Störungen des Blutflusses und der O<sub>2</sub>-Versorgung innerhalb der betroffenen Hirnareale. Wie bei einem Schlaganfall fallen die Erscheinungen oder Ausfälle der Organfunktionen aus. Symptome können sein:

- ▶ Seh- und Sprachstörungen
- ▶ Nervenausfälle und Lähmungen
- ▶ Halbseitensymptomatik unterschiedlicher Ausprägung
- ▶ Bewusstlosigkeit

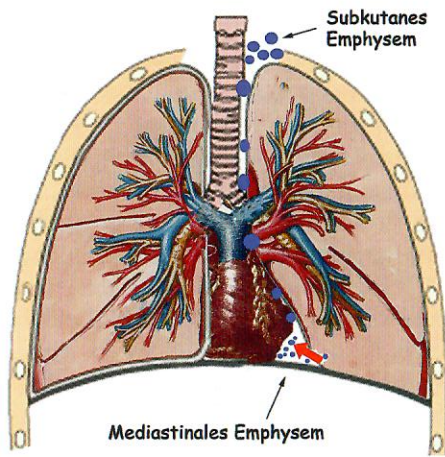
### Luftembolie im Herzen

Gasblasen in den Herzkranzgefäßen können die Blutversorgung der Herzmuskulatur einschränken. Hierbei können Atemnot, Schmerzen und ein Engegefühl in der Brust auftreten. Wenn dabei eine Schädigung der Herzmuskulatur fehlt oder sich vollständig zurückbildet, spricht man von *Angina pectoris*. Ein (irreversibler) Untergang von Herzmuskelgewebe wird dagegen als Herzinfarkt bezeichnet.

### Pneumothorax

Reißt die den Lungenflügel umhüllende Gewebshaut (*Pleura visceralis*) ein, tritt Luft in den Pleuraspalt. Als Pleuraspalt wird der Raum zwischen Brustkorbwand und Lungenoberfläche bezeichnet.

Der Brustkorb ist zur Lunge hin vom Rippenfell ausgekleidet. Im Zwischenraum (*Pleura*) hält ein Unterdruck das elastische Lungengewebe in Form. Sobald der Unterdruck wegfällt, fällt die Lunge zusammen. Atmen ist dann mit der betroffenen Lunge (die Lunge muss nicht verletzt sein, wenn sie beim Pneumothorax kollabiert) nicht mehr möglich. Ein Pneumothorax zeigt sich meist durch plötzlich einsetzende Brustschmerzen und Atemnot. Gelegentlich tritt Hustenreiz auf. Wenn ein Pneumothorax während des Auftauchens erfolgt, führt der sich senkende Umgebungsdruck zur Ausdehnung der im Pleuraspalt eingeschlossenen Luft. Wenn diese aufgrund eines Ventilmechanismus den Pleuraspalt nicht mehr verlassen kann, dann droht ein Spannungspneumothorax. Das Problem liegt hier in der Tatsache, dass durch das immer größer werdende Gasvolumen das Mediastinum zur gesunden Seite geschoben wird und dadurch die gesunde Lunge und das Herz einengt. Hierbei kann es in besonders schweren Fällen zu Herzrhythmusstörungen kommen. Um die Spannung abzubauen, muss der verletzte Pleuraspalt punktiert und die Luft abgesaugt werden. Die Symptome beim Pneumothorax sind mäßige Blässe, Atemnot und Kreislaufbeschwerden. Beim Spannungspneumothorax treten zusätzlich mechanische Behinderungen des venösen Rückstroms zum Herzen auf. Folge können Kreislaufversagen, schwere Atembeschwerden und Schock sein.



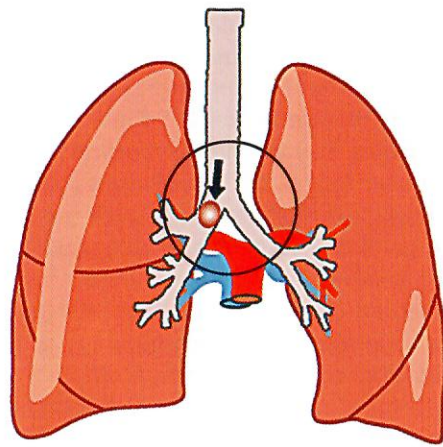
Darstellung eines Mediastinalempysems.

### Mediastinalempysem

Brustschmerzen, Hals- und Schulterschwellungen mit Knistern »wie bei einer Plastiktüte« beim Betasten der Haut, Schluckbeschwerden, »Donald Duck«-Stimme und im ungünstigsten Fall Herzrhythmusstörungen deuten auf ein Mediastinalempysem hin. Ursächlich ist der Austritt von Gas nach einer Lungenüberdehnung in die umgebenden Strukturen wie das Mediastinum und die Haut. Typisch sind die bereits angesprochenen Kreislaufbeeinträchtigungen und die Atemnot mit Stimmenveränderung (»blecherne Sprache« durch Kompression des *Nervus laryngeus recurrens*).

### Air-Trapping

Es kann nicht oft genug betont werden, dass nur der tauchen sollte, der völlig gesund ist. Wer z. B. mit einer bestehenden Bronchitis taucht, riskiert eine arterielle Gasembolie. Der Grund hierfür liegt in Schleimhautschwellungen, die zur Einengung der feinen Bronchien oder Bronchiolen führen. Dabei kann das Atemgas beim Abtauchen (Kompressionsphase) in den eingengten Bereich der Lungenblä-



Einschleimpfropf im Bereich der Bronchien.

schen gelangen. Vergleichbar ist dieser Vorgang mit einer Anschwellung der Schleimhaut der Nasennebenhöhlen, z. B. bei Erkältung. Auch dort kann mit großem Druck noch Luft zum Druckausgleich in die erkrankten Nebenhöhlen gelangen, sodass der Taucher seinen Abstieg fortsetzen kann. Das Problem entsteht dann beim Aufstieg, wenn es zum Verschluss des Nebenhöhleneinganges z. B. durch einen Schleimpfropf kommt. Starke Schmerzen sind die Folge. Ähnlich verhält es sich beim Air-Trapping. Auch in diesem Fall entsteht das Problem beim Auftauchen, wenn Schleimhautschwellungen oder Schleimpfropfe das verbliebene Restvolumen der Bronchie einengen oder verschließen. Die beim Aufstieg expandierende Luft ist nun nicht mehr in der Lage zu entweichen. Der Überdruck in den Alveolen führt schließlich zu einem Einriss der Lungenbläschen. Gas aus den betroffenen Alveolen kann in die Kapillaren der Lungengefäße gelangen. Es kommt in der Folge zu einer arteriellen Gasembolie. Dieses Problem tritt unabhängig von der Aufstiegs geschwindigkeit auf.

## Ertrinken und Beinahe-Ertrinken

Für das Sporttauchen gilt, dass bei den Zwischenfällen mit tödlichem Ausgang in 80 % der Fälle der Tod durch Ertrinken eintritt. Unter Ertrinken im eigentlichen Sinn versteht man einen abgeschlossenen Vorgang, nämlich den Tod durch Ersticken infolge Untertauchens in einer Flüssigkeit. Im Gegensatz dazu ist beim Beinahe-Ertrinken der Ausgang des Geschehens offen. Bei schneller und sachgerechter Hilfe besteht die Chance auf Rettung und damit auf das Überleben des Verunfallten. Beim Beinahe-Ertrinken wird das Ereignis also zumindest für eine gewisse Zeit, nämlich mindestens 24 Stunden, überlebt.

### Ablauf des (Beinahe-)Ertrinkens

Ein ungewolltes und/oder unerwartetes vollständiges Untertauchen führt zu bewusstem Luftanhalten, verbunden mit heftigen Bemühungen, zurück an die Wasseroberfläche zu gelangen. Gegen Ende dieser Phase, wenn willentliches Luftanhalten nicht mehr möglich ist, kommt es zum Einatmen zunächst geringerer Mengen Flüssigkeit, was zum Stimmritzenkrampf führt. Es handelt sich hierbei um einen natürlichen Reflex, der verhindern soll, dass Wasser in die Lunge eindringt. Der Verunfallte schluckt nun in zunehmender Panik größere Mengen Flüssigkeit und erbricht. Infolge des zunehmenden Sauerstoffmangels kommt es zur Bewusstlosigkeit und zum Lösen des Stimmritzenkrampfes, sodass fast regelhaft Wasser in die Lunge eingesogen wird. Dadurch verstärkt sich der bereits bestehende Sauerstoffmangel und es stehen Teile der Lunge nicht mehr für den Gasaustausch zur Verfügung. Es kommt zu erheblichen Veränderungen im Säure-

Basen-Haushalt des Körpers und des Zellstoffwechsels. Diese Veränderungen und vor allem die fortschreitende Sauerstoffunterversorgung führen letztendlich zum Herzstillstand. Diesen Vorgang nennt man nasses Ertrinken, er liegt in ca. 85 % der Fälle vor. Bei einem geringen Teil, ca. 10 %, löst sich der »Stimmritzenkrampf« im Rahmen des Ertrinkungsvorganges nicht. In diesem Fall erstickt der Taucher (trockenes Ertrinken). Ein weiteres Problem kann entstehen, wenn der Krampf der Stimmlippen sich in größerer Tiefe einstellt. Beim Auftauchen kann die in der Lunge befindliche Luft nicht entweichen, und es kommt zu einer Lungenüberdehnungsverletzung. Bei Tauchern führt häufig eine Bewusstlosigkeit unter Wasser zum Ertrinken, sodass der erste Teil des beschriebenen Ablaufs hier fehlt, der weitere Verlauf jedoch mit dem vorher beschriebenen identisch ist.

### Ablauf des Ertrinkens

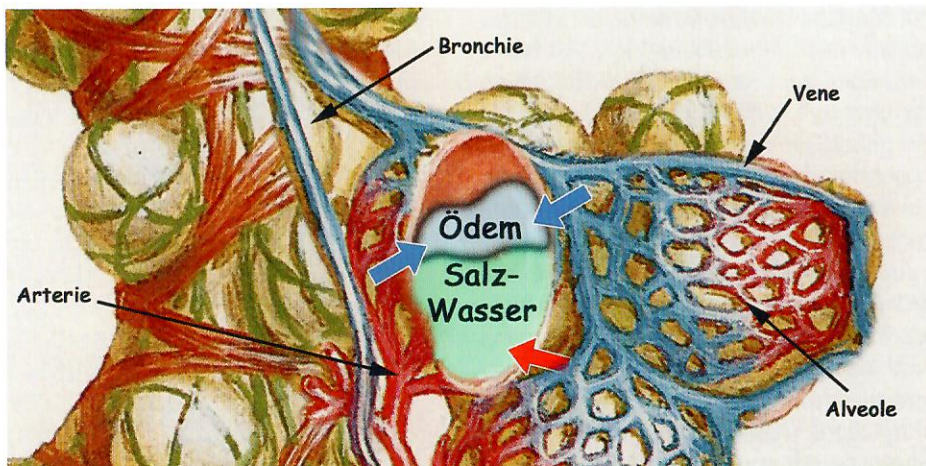
1. zunächst: Untertauchen in Flüssigkeit
2. bewusstes Atemanhalten, dadurch:
3. steigender Sauerstoffmangel, CO<sub>2</sub>-Anstieg
4. maximaler Atemreiz
5. unwillkürliche Atemversuche, dabei:
6. Aspiration kleiner Flüssigkeitsmengen
7. reflektorisches Atemanhalten und Laryngospasmus
8. fortschreitende Hypoxie und Hyperkapnie
9. Bewusstseinsverlust, unwillkürliche Inspiration
10. Aspiration von Flüssigkeit
11. (in ca. 15 % der Fälle keine Aspiration; trockenes Ertrinken)

12. schwerste Hypoxie, Entgleisung des Stoffwechsels
13. Kreislaufzusammenbruch, Herzstillstand
14. Je nach Umgebungsbedingungen (Wassertiefe, Wassertemperatur) tritt der Tod ein

Es wird häufig traditionsgemäß zwischen dem Ertrinken in Salzwasser und in Süßwasser unterschieden.

#### Ertrinken im Salzwasser (z. B. Meer)

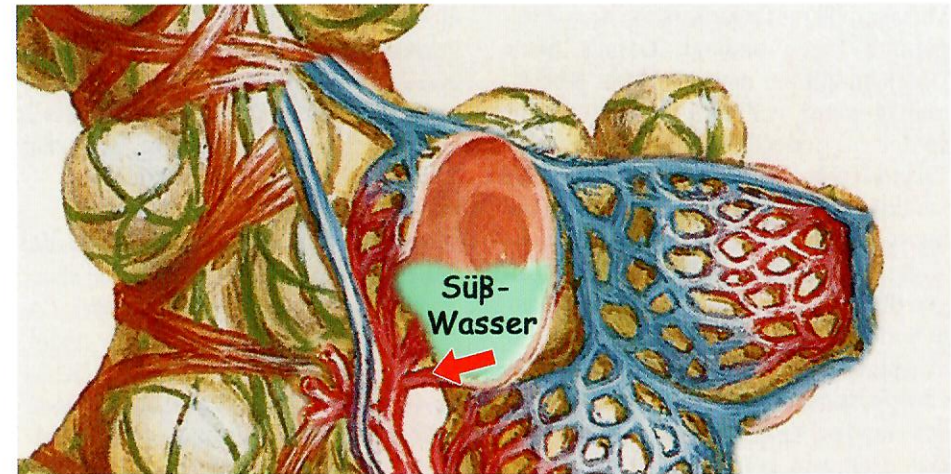
Beim Ertrinken im salzhaltigen Meerwasser spielt Osmose die entscheidende Rolle. Der im Meerwasser enthaltene Salzgehalt ist höher als im menschlichen Körper. Wenn Salzwasser in die Lungen gelangt, wird durch Osmose dem umliegenden Gewebe Flüssigkeit entzogen, die die Lunge weiter auffüllt. Dadurch kommt es zu einem zusätzlichen intraalveolären Lungenödem, sodass die Gasaustauschfläche und damit die Sauerstoffversorgung immer weiter abnimmt.



Darstellung der Ödembildung in der Lunge durch Eintritt von Salzwasser.

#### Ertrinken im Süßwasser

Beim Süßwasser verläuft der Prozess in umgekehrter Richtung. Durch den höheren Salzgehalt im Blut erfolgt die Diffusion des Wassers von den Alveolen der Lunge in die Blutbahn. Der Ausstrom von Süßwasser aus den betroffenen Alveolarabschnitten hat ein Auswaschen des Surfactant zur Folge, jener oberflächenaktiven Substanz also, die ein Zusammenfallen der Alveolen verhindert. Der Verlust an Surfactant führt zur Ausbildung von unbelüfteten Arealen in den betroffenen Lungenabschnitten und somit wiederum zum Verlust von Gasaustauschfläche und zum Sauerstoffmangel. Eine früher als wichtig angenommene Hämolyse, also das Platzen der Erythrozyten, wurde bei den Opfern von Ertrinken und Beinahe-Ertrinken bis auf wenige Ausnahmen nie in stärkerem Maße beobachtet. Stattdessen war in den meisten Fällen eine mehr oder minder stark ausgeprägte Hypoxie vorhanden, nennenswerte Elektrolytverschiebungen oder gar Zeichen einer massiven Hämolyse fan-



Eintritt von Süßwasser in die betroffenen Alveolarabschnitte.

den sich hingegen fast nie. Obwohl das Beinahe-Ertrinken im Salz- oder Süßwasser tatsächlich in gewissem Maße unterschiedliche Auswirkungen auf die dann im Körper ablaufenden Vorgänge hat, ist diese Unterscheidung für den Ersthelfer weder sinnvoll, noch hilfreich, denn im Endeffekt stehen jedesmal der Verlust von Gasaustauschfläche in der Lunge und eine extreme Hypoxie (also ein sehr starker, den ganzen Körper betreffender Sauerstoffmangel) im Vordergrund. Die als so wichtig dargestellten Veränderungen in Bezug auf den Salzgehalt sind hingegen fast nie am Patienten nachweisbar. Die Erstmaßnahmen sind ebenfalls in beiden Fällen gleich.

#### Erstmaßnahmen beim Ertrinkungsfall

Für den Ersthelfer ist oft unklar, ob ein im Wasser Verunglückter bereits tot oder beinahe ertrunken und demzufolge noch erfolgreich wiederzubeleben ist. Deswegen müssen lebensrettende Sofort-

maßnahmen durch den Helfer unverzüglich eingeleitet werden. Es muss deutlich gemacht werden, dass durch die Umgebungsbedingungen unter Umständen erhebliche Schutzfaktoren im Körper wirken, sodass schon von Überlebenszeiten bei Immersion im sehr kalten Wasser von 45–60 Minuten berichtet wurde. Erstaunlicherweise wird beim Beinahe-Ertrinken erheblich weniger Wasser in die Lunge aufgenommen, als dies lange Zeit angenommen wurde. Zumeist werden nicht mehr als 250 ml Flüssigkeit aspiriert, die sich dann auf die Atemoberfläche der Lunge von immerhin 80 m<sup>2</sup> verteilen. Deswegen ist es auch nicht wesentlich, ob die Situation des Beinahe-Ertrinkens in Süß- oder Salzwasser stattgefunden hat. Für den Ersthelfer ist es auf jeden Fall unerheblich. Das Problem ist der Sauerstoffmangel im Organismus, wobei selbstverständlich die empfindlichsten Gewebe zuallererst geschädigt werden. Problemorgane beim Beinahe-Ertrinken sind die Lunge selbst, das Herz, das Gehirn und die Nieren. Todesfälle nach erfolgreicher Reanimation sind oft durch

Versagen dieser Organe in den darauf folgenden Tagen bedingt. Gerade beim Unfall im Wasser macht falsches Notfallmanagement vor Ort möglicherweise später in der Klinik bestehende gute Chancen zunichte. Das Ziel ist daher, den Sauerstoffmangel schnellstmöglich zu beheben, wobei eine ausreichende Atmung angestrebt wird. Obwohl sich in den Lungen der Opfer meist nur wenig Flüssigkeit befindet, können durch Wasserschlucken im Magen-Darm-Trakt allerdings mehrere Liter Flüssigkeit vorhanden sein. »Heimlich-Handgriffe« oder andere Verfahren zum Herausbringen von Fremdkörpern aus der Lunge sind bei Wasserunfällen nicht angezeigt, weil die Gefahr des Erbrechens und der Aspiration von Mageninhalt besteht.

#### Maßnahmen beim Ertrinkungsunfall

- ▶ schnellstmögliche Rettung aus dem Wasser, Flachlagerung auf dem Rücken
- ▶ Bei Bewusstlosigkeit und (erhaltener) Atmung stabile Seitenlagerung und Sauerstoffgabe von 100 % O<sub>2</sub>
- ▶ Bei Atemstillstand Atemspende
- ▶ Bei Kreislaufstillstand Herzdruckmassage
- ▶ Versorgung der Begleitverletzungen

Wichtigste Maßnahme bleibt die Verabreichung von 100 % Sauerstoff.

Da ein Totalausfall der Atmung nicht mit dem Leben vereinbar ist, hat die Sicherstellung von Atmungs- und Kreislauffunktionen oberste Priorität. Bei fast allen Überlebenden von Ertrinkungsunfällen zeigte sich innerhalb von fünf Minuten

eine deutliche Verbesserung der Atmung, in vielen Fällen sogar innerhalb der ersten zwei Minuten. Für das Notfallmanagement bei Ertrinkungsunfällen gilt, dass es auf jede Sekunde ankommt. Schnelligkeit hat hier höchste Priorität.

#### Überlebenschancen und Prognose des Patienten hängen ab von:

- ▶ Einleitung der Erste-Hilfe-Maßnahmen
- ▶ Länge der Immersionszeit (je kürzer desto besser)
- ▶ einer raschen Rückbildung ausgefallener Funktionen (Bewusstsein, Motorik etc.)
- ▶ dem Zeitraum, der verstreicht, bis der Patient auf die Notfallmaßnahmen anspricht
- ▶ Umgebungsparametern (Unterkühlung kann durch Verlangsamung des Stoffwechsels eine gewisse Schutzwirkung entfalten und den Zeitraum bis zum Eintreten irreversibler Schäden deutlich verlängern).

#### Eine ungünstige Situation liegt vor, wenn

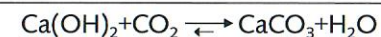
- ▶ die Immersionszeit länger als fünf Minuten gedauert hat
- ▶ keine Erste-Hilfe-Maßnahmen in den ersten zehn Minuten eingeleitet wurden
- ▶ der Patient noch bewusstlos dem Notarzt übergeben wird.

Gerade bei Ertrinken in Kaltwasser gilt es, lange genug mit den Wiederbelebungsmassnahmen fortzufahren: »Niemand ist tot, außer er ist warm und tot!«

## 9. Atemkalk

Allen Kreislauftauchgeräten liegt ein gemeinsames Funktionsprinzip zugrunde. Ausatemgas wird durch Atemkalk geführt, um dort von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>), das durch den Körper des Tauchers produziert wurde, befreit zu werden. Das im Normalfall kohlenstoffdioxidfreie Gas verlässt den Kalk, um in einem Atembeutel (Gegenlunge) wieder zur Veratmung bereitzustehen. Dem Atembeutel wird Sauerstoff zugeführt, um eine Unterversorgung (Hypoxie) des Tauchers mit O<sub>2</sub> zu vermeiden. Der körnige Atemkalk befindet sich in einem vollkommen dichten Behälter aus Verbundwerkstoffen, Metall oder Kunststoff.

Atemkalk bestehen zu großen Teilen aus Calciumhydroxid, Zuschlägen von Alkalihydroxiden und Wasser. Das Calciumhydroxid bindet CO<sub>2</sub> zu Calciumcarbonat unter Freisetzung von Wasser.



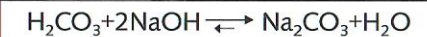
Detaillierter verläuft die Absorption von CO<sub>2</sub> durch Atemkalk in drei Phasen:

1. Gasphase – Säurebildung  
Kohlenstoffdioxid reagiert mit Wasser zu Kohlensäure und schlägt sich auf dem Atemkalk nieder.

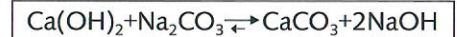


2. Flüssigkeitsphase – Neutralisation  
Die Kohlensäure reagiert mit den Alkali-

hydroxiden, die in den Zuschlägen enthalten sind unter Bildung des Salzes Natriumcarbonat und Wasser.



3. Festphase – Salzumbildung  
Das Natriumcarbonat reagiert mit Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat und Natriumhydroxid. Das durch die Reaktion freigewordene Natriumhydroxid steht für weitere CO<sub>2</sub>-Bindung zur Verfügung.



Diese Reaktionen scheinen zunächst recht komplex, es ist bis jetzt aber noch nicht gelungen, die direkte Reaktion des Hydrogencarbonats oder CO<sub>2(g)</sub> mit Calciumhydroxid mit einer genügenden Reaktionsgeschwindigkeit durchzuführen. Diese Reaktion verläuft viel langsamer und würde eine ausreichend schnelle CO<sub>2</sub>-Absorption im Atemkalk nicht gewährleisten.

#### Rohstoffe und Produktion von Atemkalk

Kalkstein, Calciumcarbonat (CaCO<sub>3</sub>), ist chemisch gesehen ein Gestein. In der Landwirtschaft dient CaCO<sub>3</sub> als Dünger und in der Medizin als Nahrungszusatz und Arzneimittel. Aus dem Großteil des abgebauten Kalksteins entsteht durch



Atemkalk kann in den unterschiedlichsten Formen produziert werden.

einen Brennvorgang der Branntkalk, Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ). Dieser Branntkalk wird dann durch einen Löschvorgang mit Wasser zu Löschkalk, Calciumhydroxid ( $\text{Ca(OH)}_2$ ). Calciumhydroxid wird in der Bauindustrie verwendet, außerdem z. B. in der Abwasseraufbereitung. Für die Produktion von Atemkalk (Hauptbestandteil  $\text{Ca(OH)}_2$ ) in der Tauchtechnik werden nur besonders reine und damit hochwertige Ausgangsstoffe verwendet. Atemkalk gehört zu den Verbrauchsstoffen. Verwendung findet er z. B. auch zur Aufbereitung der Atemluft in U-Booten, in Kreislaufgeräten von Minenarbeitern und im Anästhesiebereich von Krankenhäusern.

Die Herstellung von Atemkalk verläuft nach festgelegten Produktionsschemata. Das Ausgangsprodukt, der Kalkstein, wird zuerst gebrochen. Danach wird der Kalk gebrannt, zermahlen und zu Calciumhydroxid gelöscht. Daraus entsteht eine Paste, die z. B. auf Matrizen aufgetragen in Form gebracht wird. Im letzten Schritt erfolgt die Trocknung des Produkts. In den beschriebenen Reaktionen wird deutlich, dass ein definierter Wassergehalt im Atemkalk erhalten bleiben muss, um eine optimale Absorption von  $\text{CO}_2$  im Atemkalk zu gewährleisten. Zusätzlich hilft das Ausatemgas den Feuchtigkeitsgehalt zu erhalten. Je nach Hersteller und Anwendungsgebiet variiert der Wassergehalt im Atemkalk zwischen

14 und 23 %. Sehr wichtig beim Umgang mit Atemkalk ist der sachgemäße Verschluss der Vorratsbehälter. Dem Atemkalk kann bei falscher Lagerung oder offen stehenden Behältern Feuchtigkeit entzogen werden, er trocknet sprichwörtlich aus. Die Produktion von Atemkalk orientiert sich an bewährten Richtlinien und ist trotz der relativ einfachen zugrunde liegenden Chemie aufwendig und kostenintensiv. Die Körnung des Atemkalks liegt im Bereich von 1 bis 5 mm. Je feiner die Körnung ist, desto höher kann die  $\text{CO}_2$ -Absorption sein. Von Nachteil ist jedoch, dass sich der Atemwiderstand erhöht.

Beim Vergleich verschiedener Atemkalksorten stellt man fest, dass selbst die Produkte desselben Herstellers mit unterschiedlichen Gewichts- und Volumengrößen spezifiziert sind. Um die theoretische Standzeit des Atemkalkes zu definieren, wird die  $\text{CO}_2$ -Absorptionsmenge in Liter

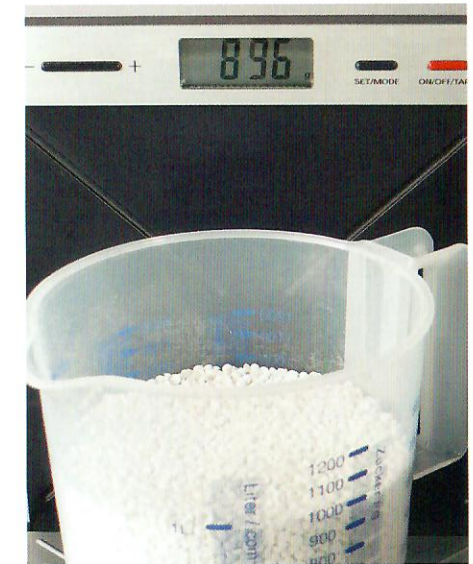
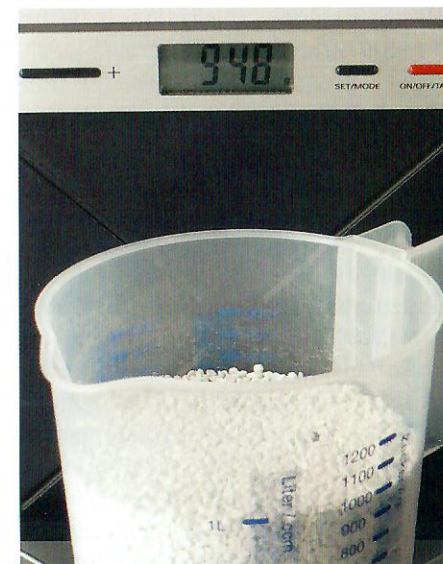


In modernen Fertigungsstraßen wird Atemkalk vollautomatisch produziert.

pro Kilogramm (Liter  $\text{CO}_2$ /Kg) Atemkalk angegeben. Unter optimalen Bedingungen kann die Absorptionsmenge bis zu 140 Liter  $\text{CO}_2$  pro Kilogramm des Absorbers betragen. Wichtig dabei ist, dass sich das Volumen eines Gases immer nur auf eine definierte Temperatur bezieht, die auch angegeben werden muss. Für die Tauchzeitberechnungen sollten allerdings die Angaben der Hersteller berücksichtigt werden. Atemkalke weisen aufgrund abweichender physikalischer Eigenschaften unterschiedliche Gewichte pro Volumeneinheit (z. B. Liter) auf. Um dies zu illustrieren, haben wir die Atemkalke DiveSorb S und DiveSorb Pro der Firma Dräger untersucht. Beide Atemkalke sind für den Taucheinsatz entwickelt worden und haben eine Korngröße von 4 mm. Bei einem Volumen von einem Liter und gleicher Einrüttelung ergeben sich unterschiedliche Gewichte. DiveSorb S, ein Kalk für die Anwendung

in Raumlufthanlagen (z. B. in U-Booten), wiegt dabei 948 Gramm. Das gleiche Volumen an DiveSorb Pro, ein für den professionellen Tauchbereich entwickelter Atemkalk, wiegt unter den gleichen Bedingungen 896 Gramm. Der Unterschied ergibt sich nicht zuletzt aus technischen Feinheiten, zu denen der Hersteller aus verständlichen Gründen keine näheren Angaben veröffentlicht.

Betrachtet man den Atemkalk von Konkurrenzunternehmen, liegt der Toleranzbereich bei einem Liter Füllvolumen zwischen den von Dräger angegebenen Werten. Grundsätzlich ermöglicht ein größerer Kalkbehälter mit einer größeren Füllmenge des Absorbers eine längere Tauchzeit. Für eine entsprechende Tauchzeitberechnung gehen wir davon aus, dass ein Kilo des verwendeten Atemkalkes eine  $\text{CO}_2$ -Absorptionsfähigkeit von 120 Litern hat, und rechnen mit einem



Die Digitalanzeige zeigt deutliche Gewichtsunterschiede zweier Atemkalke bei gleichem Volumen und gleicher Korngröße, die für unterschiedliche Anwendungsbereiche ausgelegt sind.

Atemminutenvolumen von 18 Litern reinen Sauerstoffs.

Beim »Verbrennungsprozess« im menschlichen Körper werden rund 4 % Sauerstoff zur Energiewandlung benötigt und dabei fast die identische Menge an Kohlenstoffdioxid freigesetzt. Da es sich hier um eine reine Beispielrechnung handelt, wurde folgender Faktor nicht berücksichtigt:

Sauerstoffanteil im Atembeutel ca. 76 % (nach dreimaligem Spülvorgang)

Betrachten wir einen normalen Tauchgang mit leichter Belastung. Bei einem Atemminutenvolumen von 18 Litern und einer Sauerstoffausnutzung von 4 % je Atemzug ergibt sich ein Verbrauch von 0,72 Litern Sauerstoff pro Minute.

$$\frac{18 \text{ l} \cdot 4 \%}{100 \%} = 0,72 \text{ l} \quad \checkmark$$

Die Menge der Sauerstoffaufnahme entspricht nicht der abgegebenen CO<sub>2</sub>-Menge. Dieses Missverhältnis zwischen Kohlenstoffdioxidabgabe und Sauerstoffaufnahme wird als respiratorischer Quotient (RQ) bezeichnet. Der RQ hängt ab von der Art des verstoffwechselten Substrates, das bedeutet, er schwankt von Ruhe zu körperlicher Belastung. Dabei ist der RQ bei der Ernährung mit Kohlenhydraten 1,0 (stöchiometrische Menge Kohlenstoff und Sauerstoff im Kohlenhydrat sind gleich), bei Fetten 0,7 und bei Proteinen 0,8. Der durchschnittliche europäische RQ liegt bei 0,82. Zur Vereinfachung wird hier ein respiratorischer Quotient von 0,9 angenommen, d. h., dass etwa 90 % des veratmeten Sauerstoffs in Form von Kohlenstoffdioxid abgeatmet werden. Dabei entstehen aus

den 0,72 l O<sub>2</sub> ca. 0,648 l CO<sub>2</sub>. Von einer mit 2 kg Atemkalk gefüllten Atemkalkpatrone können ca. 240 Liter CO<sub>2</sub> aufgenommen werden. Bei einer Produktion von 0,648 Litern CO<sub>2</sub> in der Minute ergibt sich eine Absorptionsdauer von 370 Minuten.

Die Sauerstoffmenge einer Vorratsflasche mit 2 Liter Fassungsvermögen, die mit 200 bar gefüllt wurde, beträgt 400 bar/Liter. Nach Abzug des Reservedrucks von 20 bar (40 bar/Liter) erhalten wir ein Nutzungsvolumen von 360 bar/Liter. Berücksichtigen wir nur das Nutzungsvolumen, so beträgt die Tauchzeit ca. 555 Minuten:

$$\frac{360 \text{ bar} \cdot \text{l}}{0,648 \text{ l/min}} = \text{ca. } 555 \text{ min}$$

*0,72      ~ 500*

Es wird deutlich, dass die mögliche Tauchzeit wesentlich über der Absorptionsdauer (Standzeit) des Absorbers liegt.

*Wesentlich für die Sicherheit des Tauchgangs ist die Absorptionsdauer des Atemkalkes und nicht die Menge des Vorratsgases!*

Natürlich handelt es sich um theoretische Werte. Bei den Herstellerangaben beruhen die Standzeiten für die Atemkalkpatronen auf den oft recht unterschiedlichen Testverfahren.

Die Firma Dräger arbeitet mit der für Kreislaufgeräte erlassenen Norm nach EN 14143. In dieser wird ein Atemminutenvolumen von 40 Litern pro Minute angenommen.

Als Faustwert gilt: Man kann je eine Füllung Atemkalk mit einer gerätespezifischen Flaschenfüllung verbrauchen.

*→) 72 + (200 - 20) bar = 360 bar \* L !*



Das Bild zeigt einen selbst gebauten Feinstaubfilter, der in die Kalkpatrone eingesetzt werden kann.

### Formen von Atemkalk

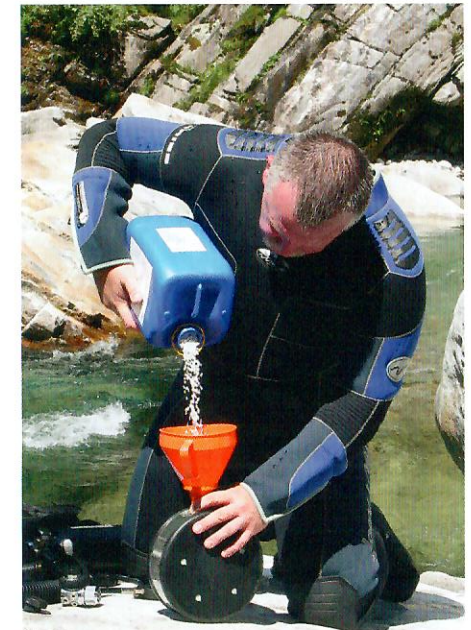
Es gibt recht unterschiedliche Formen (Stangen/Bruch/Pillen) von Atemkalk. Sie bieten eine innere und äußere Reaktionsfläche für die CO<sub>2</sub>-Aufnahme. Wird die Struktur durch mechanische Einwirkung zerstört, z. B. in einem tauchfertigen Gerät bei rauher See in einem Schlauchboot, reagiert der Atemkalk nicht mehr optimal. Als wirksamste Form haben sich die Halbkugel und auch die Kugelform mit grober Oberfläche erwiesen. Sie nehmen den größtmöglichen Anteil an Kohlenstoffdioxid auf.

Bruchkalk ist sehr einfach von den Sorten in Pillenform zu unterscheiden. Die einzelnen Kalkstücke haben je nach Hersteller eine Größe von ca. 1 bis 5 mm. Man hat den Eindruck, dass die einzelnen Stücke von einer langen Stange abgebrochen wurden. Meist ist dieser Kalk mit viel Kalkstaub behaftet, der vor dem Gebrauch ausgesiebt werden sollte, um

eine Kanalbildung im Absorber zu vermeiden. Zudem kann der Kalkstaub über die Atemwege in die Alveolen gelangen und dort Verätzungen verursachen. Einige Kalkbehälter verfügen aus diesem Grund über Feinstaubfilter oder können damit nachgerüstet werden.

Das Befüllen der Atemkalkpatrone sollte aus einer Höhe von 30 cm im Freien durchgeführt werden. Hierbei wird Atemkalkstaub, der sich sonst an der Wand des Behälters festsetzt und Kanalbildung begünstigen könnte, vom Wind weggeblasen.

Im Bereich der am Markt verfügbaren Atemkalke gibt es recht unterschiedliche Produkte. Jede Atemkalksorte ist auf einen speziellen Einsatzbereich abgestimmt.

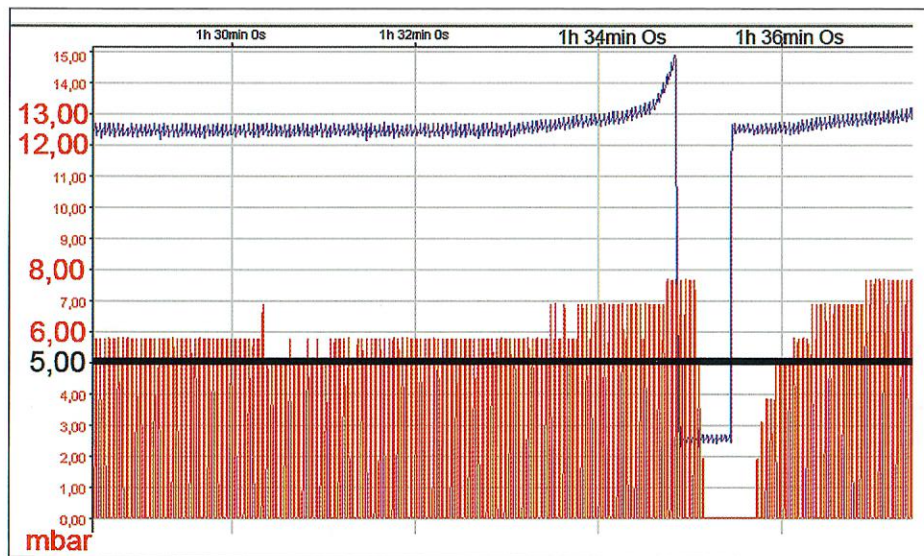


Befüllen des Atemkalkbehälters aus ca. 30 cm Höhe.

## Atemkalk im Gebrauch

Die Effizienz der  $\text{CO}_2$ -Absorption hängt nicht allein von der chemischen Beschaffenheit des verwendeten Atemkalks, sondern auch wesentlich von der gleichmäßigen Befüllung des Atemkalkbehälters sowie der Atemfrequenz des Tauchers ab. Tests haben gezeigt, dass die Sättigungsgrenze von Kalk schneller erreicht wird, wenn sich die Beatmungsrate erhöht. Eine erhöhte Arbeitsleistung führt zu vermehrtem  $\text{O}_2$ -Verbrauch und stärkerer  $\text{CO}_2$ -Produktion, was dazu führt, dass die Sättigungsgrenze des Absorbers schneller erreicht wird. Zusätzlich führen die geringere Verweilzeit des Gases im Absorber und damit auch die Kontaktzeit zwischen dem  $\text{CO}_2$  und dem Atemkalk dazu, dass es zu einer Konzentrationserhöhung des Kohlenstoffdioxids im Atemkreislauf kommt. Hingegen führt eine

ungenügende Verdichtung (Einrütteln des Kalkes in den Absorber) zur Ausbildung von sog. »Gaskanälen«, die die Absorption negativ beeinflussen. Bei einer solchen Kanalbildung sucht sich das Atemgas in dem Behälter einen Weg am Kalk vorbei, z. B. an der Wand oder an der Gewindestange entlang. Um den Kalk in der Patrone zu verdichten, besitzen die meisten Absorber gefederte Verschlussdeckel oder Schwämme zur Reduzierung der freien Räume. Stünde der Kalk nicht unter Druck, könnte er sich aufrütteln und freie Wege für das Atemgas bilden. Um einer Kanalbildung vorzubeugen, werden von einigen Herstellern Gummimanschetten angeboten, die den Gasfluss innerhalb des Atemkalkbehälters steuern. Kalk sollte nicht über die angegebene Standzeit hinaus verwendet werden. Als Standzeit bezeichnet man die Arbeitsdauer der Atemkalkpatrone.



Das Bild zeigt was geschieht, wenn gesättigter Atemkalk nach einer Pause erneut beatmet wird. Zunächst wird  $\text{CO}_2$  gebunden, aber bereits nach kurzer Zeit gelangt zu viel  $\text{CO}_2$  in die Einatemseite (größer 5 mbar).

Diese Zeit hängt entscheidend vom Volumen der Patrone und der Atemkalksorte ab. Dabei ist die Verwendung des Absorbers mehrmals möglich. Atemkalk darf nach der Verwendung nicht getrocknet und wiederverwendet werden, da der Kalk sich sättigt und dann kein  $\text{CO}_2$  mehr aufnimmt. Anders als bei Trockenbeuteln, die durch Zuführung von Hitze die durch Aufsättigung eingelagerte Feuchtigkeit verlieren und wiederverwendet werden können, funktioniert dieses Prinzip beim Atemkalk nicht. Auch nass gewordener Atemkalk, der noch nicht verwendet wurde, darf nicht getrocknet und wieder eingesetzt werden. Ein Farbindikator im Atemkalk ermöglicht es, am Farbumschlag den Verbrauchsgrad des Kalks zu erkennen. Dabei enthalten einige Atemkalksorten einen Farbindikator, bei dem sich die Verfärbung des Atemkalks nach einigen Stunden des Nichtgebrauches wieder umkehrt, sodass der Taucher irrtümlich meinen könnte mit ungebrauchtem Kalk zu tauchen. Nachteilig ist die möglicherweise auftretende Zersetzung des Indikators, die zu einem irritierenden Amingeruch führen kann.

Atemkalk verliert unter bestimmten Bedingungen die Fähigkeit zur  $\text{CO}_2$ -Bindung. Von diesem Zeitpunkt an steigt der  $\text{CO}_2$ -Pegel im Atemkreislauf des Tauchgerätes rasch an. Begünstigt wird dies durch:

- ▶ Nicht für den Tauchsport entwickelten Atemkalk
- ▶ Überlagerten Atemkalk (Verfallsdatum)
- ▶ Absinken der Wassertemperatur
- ▶ Verbrauchten Atemkalk
- ▶ Wassereintritt in das System

## Nicht für den Tauchsport entwickelter Atemkalk

Der in medizinischen Beatmungsgeräten eingesetzte Atemkalk wird immer stärker an den Bedürfnissen des medizinischen Einsatzes ausgerichtet. Während Atemkalk, die für den Tauchsport entwickelt wurden, für hohe Atemfrequenzen und niedrige Temperaturen ausgelegt sind, orientieren sich Absorbentien, die für die Beatmung von Menschen produziert werden, an den Bedingungen bei Raumtemperatur und leichter  $\text{CO}_2$ -Absorption. Das macht diese für den Einsatz in Kreislaufgeräten ungeeignet, unter Umständen sogar lebensgefährlich. Da die Entwicklung der Kalke für spezielle medizinische Fragestellungen noch nicht abgeschlossen ist, kann man davon ausgehen, dass neu entwickelte »Anästhesiekalke« sich noch weniger für den Tauchsport eignen werden.

Anders sieht es im Bereich der Atemkalke aus, die zum Tauchen benutzt werden. Hier sind die Entwicklungsmöglichkeiten nahezu ausgeschöpft. Die Leistungsfähigkeit im Bereich der Absorptionsfähigkeit hat ihre Grenzen erreicht. In Datenblättern unterschiedlicher Hersteller findet man im Bereich der Absorptionsfähigkeit der Kalke recht große Unterschiede. Diese resultieren meist aus den unterschiedlichen Testverfahren. Es ist deshalb wichtig, außer den Leistungsdaten der verschiedenen Atemkalke auch die verwendete Norm bzw. die Prüfparameter (insbesondere Atemminutenvolumen und  $\text{CO}_2$ -Zudosierung mit Bezugstemperaturen) zu kennen, da sonst die Leistungsdaten bezüglich der zu erwartenden Standzeiten nicht untereinander vergleichbar sind.

### Überlagerter Atemkalk

Der für Kreislauffauchgeräte verwendete Atemkalk benötigt eine bestimmte Mindestfeuchtigkeit. Wird diese unterschritten, können chemischen Reaktionen, die der Absorptionsfähigkeit des Atemkalks zugrunde liegen, nicht ablaufen. Der Kalk wird dann wirkungslos. In diesem Zusammenhang muss das Verfallsdatum berücksichtigt werden. Ein Problem stellen angebrochene Gebinde dar, bei denen der zur Reaktion des Atemkalkes benötigte Wasseranteil durch Ausdunstung nicht mehr sichergestellt werden kann.

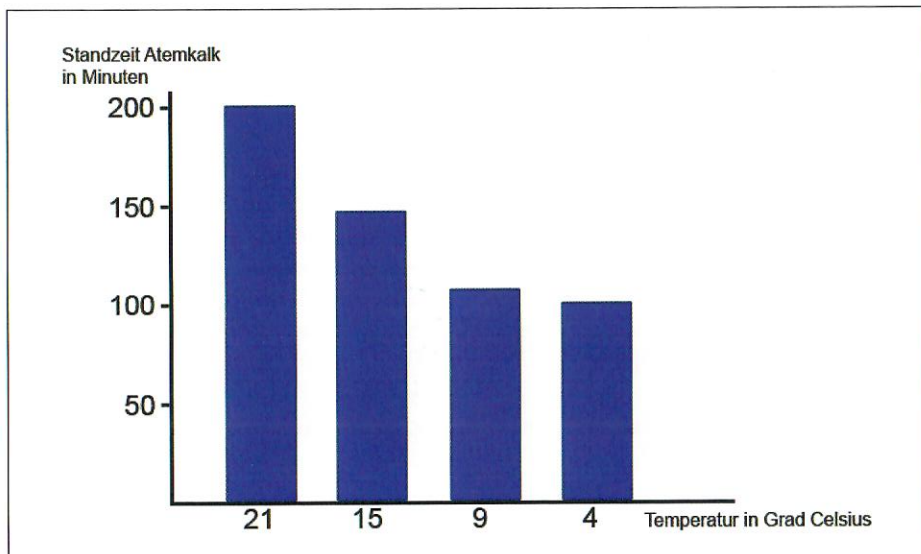
### Temperaturabhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Absorption

Die Reaktion zur CO<sub>2</sub>-Absorption von Atemkalk ist stark temperaturabhängig. Temperaturen von 4 °C und weniger führen dazu, dass die Fähigkeit des Atemkalkes, CO<sub>2</sub> aus der Atemluft zu entfer-

nen, reduziert wird. Bei Temperaturen um 4 °C sinkt bei einigen Kalkarten die Absorptionsdauer bei frischer Füllung um mehr als die Hälfte der vorgegebenen Standzeit.

Die unten aufgeführte Grafik zeigt die ungefähren Gebrauchszeiten für den Atemkalkbehälter eines Dräger LAR V Sauerstoff-Kreislaufgerätes bei verschiedenen Temperaturen.

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit (bei niedrigen Temperaturen) den Atemkalk vor Gebrauch bei Zimmertemperatur zu lagern. Des Weiteren sollte das Gerät vor dem Tauchgang über einen Zeitraum von mindestens einer Minute angeatmet werden. Dabei wird durch die Atmung in das Gerät angewärmte Atemluft zugeführt, die die chemische Reaktion des Atemkalkes beschleunigt. Im Zubehörsortiment gibt es Neoprenüberzüge, die bei



Die Grafik zeigt, dass ein Atemkalk, der bei einer Umgebungstemperatur von 21 °C mit CO<sub>2</sub> belastet wird, eine Nutzungsdauer von 200 Minuten erreicht. Wird jedoch der Atemkalk bei einer Umgebungstemperatur von 4 °C genutzt, so sinkt die Absorptionsdauer auf 110 Minuten.



Ein Neoprenüberzieher verhindert, dass der Atemkalk bei niedrigen Wassertemperaturen zu sehr abkühlt.

niedrigen Temperaturen um die Kalkpatrone gelegt werden, um die Innentemperatur des Behälters zu erhöhen.

### Verbrauchter Atemkalk

Wie bereits beschrieben, hat Atemkalk nur eine definierte CO<sub>2</sub>-Absorptionsfähigkeit. Wird er darüber hinaus genutzt, stellt sich ein Gefühl der Enge und extremer Kurzatmigkeit ein. Dieses sind typische Anzeichen für verbrauchten Atemkalk. Grundsätzlich sollte nicht mehr Sauerstoff veratmet werden, als die für das Tauchgerät vorgesehene Gasflasche bevorratet. Militärische Richtlinien besagen, dass ein betriebsbereites Gerät bis zu fünf Tagen gelagert werden kann, ohne dass davon die Einsatzfähigkeit des Atemkalks wesentlich beeinflusst wird. Das stellt natürlich besondere Anforderungen an den Umgang mit dem Gerät. Vor der Lagerung muss im Gaskreislauf ein Unterdruck erzeugt werden, um zu verhindern, dass Umgebungsluft eindringen kann.

Zusätzlich sollte darauf geachtet werden, dass nach Gebrauch die Wasserfallen entleert und die Atemschläuche gesäubert und getrocknet werden, um eine bakterielle Kontamination zu verhindern.

### Wassereintritt in das Atemkreislaufsystem

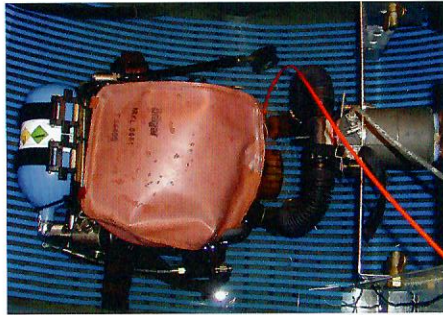
Beim Tauchen mit Kreislaufgeräten stellt insbesondere ein Wassereintritt in die Kalkpatrone ein Risiko dar. Hierbei entsteht der sog. Caustic Cocktail. Dabei handelt es sich um eine aus der Atemkalkpatrone aufgestiegene ätzend wirkende Flüssigkeit, die durch den Atemschlauch in den Mund fließen kann. Sie fühlt sich seifig an und schmeckt auch so. Durch diese Flüssigkeit kommt es zu Reizungen und Brennen der Atemwege, Zwang zum trockenen Husten, Gefühl der Luftnot, in schweren Fällen auch zu schwerer pfeifender Atmung wie beim *Asthma bronchiale*. Im Zuge der Erstversorgung sollten die betroffenen Bereiche mit viel sauberem Wasser gespült werden. Danach empfiehlt es sich mehrere Hübe eines cortisonhaltigen Sprays (entzündungshemmend) zu verabreichen und einen Arzt aufzusuchen. Solche Wassereintritte können die unterschiedlichsten Ursachen haben und führen unweigerlich zum Totalausfall des Kreislaufes des Tauchgerätes. Oft liegt es an einer nicht sorgfältig durchgeführten Überprüfung des Gerätes vor dem Tauchgang. Es kann nicht oft genug darauf hingewiesen werden, dass die Unter- und Überdrucktests des Systems für die Sicherheit des Tauchers von größter Bedeutung sind. Daneben kann Wasser auch durch Beschädigungen des Kreislaufes während des Tauchgangs eindringen. So kann es unter Wasser z. B. zur Perforation von Atemschläuchen oder der Gegenlunge kom-

men. Arbeitet der Taucher unter Wasser an scharfkantigen Gegenständen oder taucht er z. B. in ein Wrack, ist das Risiko mechanischer Beschädigungen des Systems sicherlich deutlich erhöht.

Vielfach hört man von Tauchern, die den Atemkalk mit einem Glas Wasser bewusst anfeuchten, um entweder eine schnellere Absorption des Kohlenstoffdioxids zu erreichen oder ausgetrocknetem Atemkalk die nötige Absorptionsfähigkeit zu verleihen. Von dieser Vorgehensweise raten wir dringend ab.

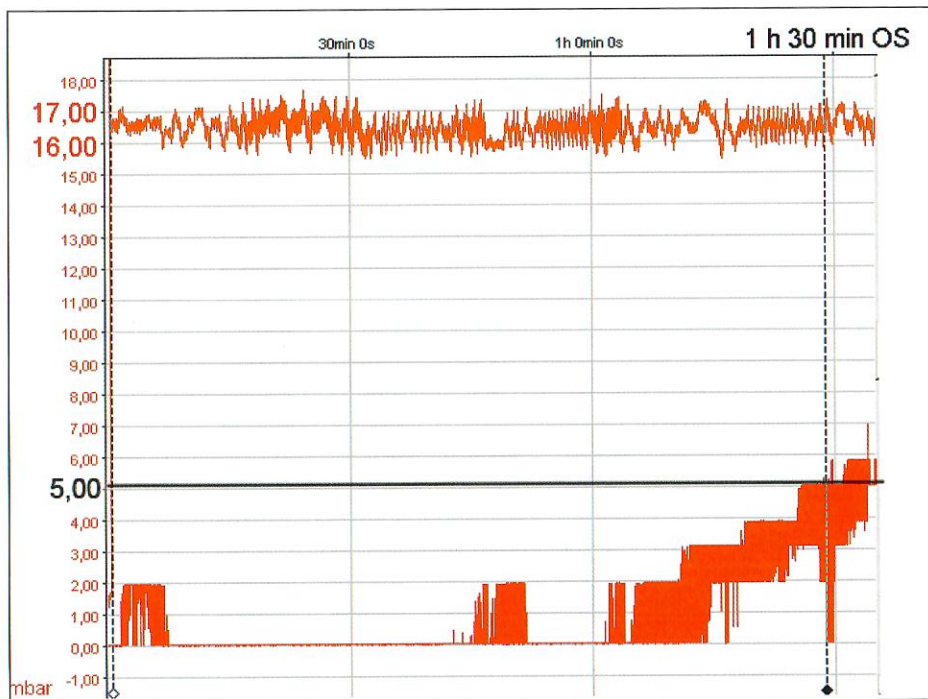
#### Was geschieht grundsätzlich, wenn Wasser in das System gelangt?

Um diese Frage zu beantworten, wurde in der Wehrtechnischen Dienststelle für



Der Versuch wurde mit einem LAR VII durchgeführt. Man sieht die Beatmungsanschlüsse und Messleitungen.

Schiffe und Marinewaffen (WTD 71) in Eckernförde (Bereich Aquatechnik) ein geeigneter Testaufbau vorbereitet.



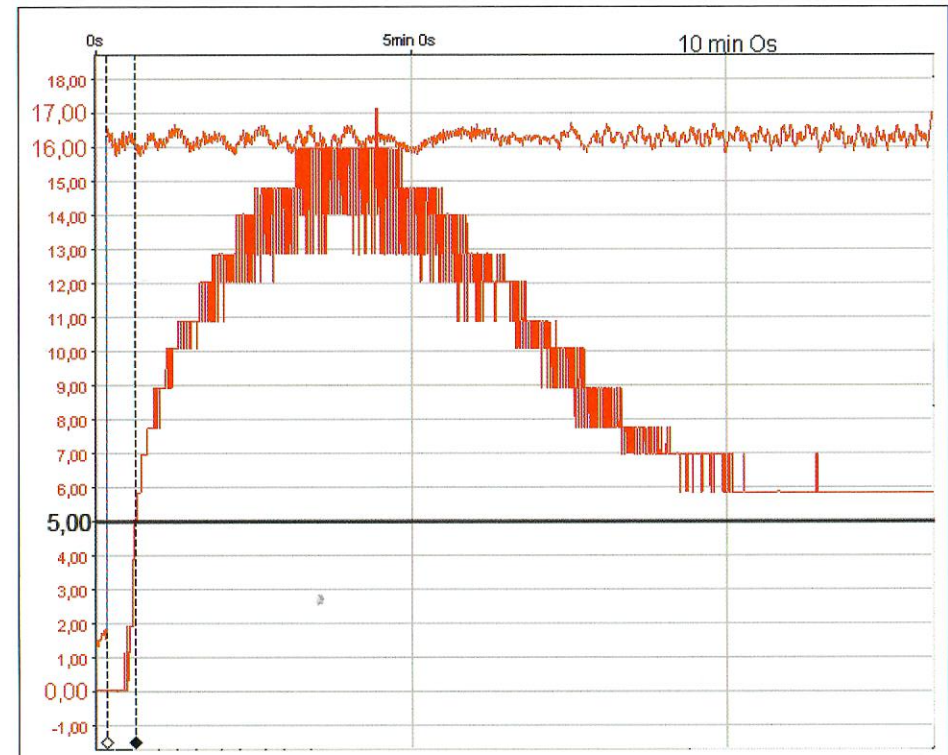
Belastung des Atemkalkes mit 300 ml Wasser. Das zeitweise im Einatemgemisch vorhandene  $\text{CO}_2$  wird bei weiterer Beatmung wieder absorbiert. Die Standzeit betrug bis zum Anstieg des  $\text{CO}_2$  von 5 mbar im Atemgemisch 1 Stunde und 28 Minuten.

Für die folgenden Versuche wurde ein Sauerstoff-Kreislaufgerät mit einem Atemminutenvolumen von 40 Liter/min beatmet. Das Atemgas mit 95 % Luftfeuchtigkeit wurde auf 28 °C erwärmt. Die Umgebungstemperatur betrug 22 °C. Dem System wurden 1,6 Liter  $\text{CO}_2$  (bei 22 °C) pro Minute zugeführt. Die Standzeitgrenze wurde durch den  $\text{CO}_2$ -Gehalt im Atemgemisch definiert. Dieser Grenzwert bezieht sich auf die Maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK-Wert) und beträgt 5 mbar  $\text{CO}_2$  im Atemgas.

Anmerkung: Die Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK-Wert) gibt die maximal zulässige Konzentration einer Substanz als Gas, Dampf oder Schwebstoff in der Atemluft am Arbeitsplatz an, bei der

kein Gesundheitsschaden zu erwarten ist, auch wenn man der Konzentration in der Regel acht Stunden täglich ausgesetzt ist. Diese Grenzwerte gelten daher auch für Tauchgeräte.

Im ersten Versuchsaufbau wurden der Kalkpatrone 300 ml Wasser zugeführt. Die anschließend durchgeführten Messungen zeigten, dass nach Eindringen von Wasser in den Absorber ein Teil des Kalkes unbrauchbar wurde und nicht mehr für die Aufnahme des Kohlenstoffdioxids zur Verfügung stand. Vermutlich trocknete durch die entstandene Reaktionswärme von über 40 °C ein Teil des Kalkes. Dies lässt sich aus dem unten gezeigten Verlauf der Messkurve schließen.



Die Grafik zeigt die Änderung der  $\text{CO}_2$ -Konzentration nach Flutung der Atemkalkpatrone.

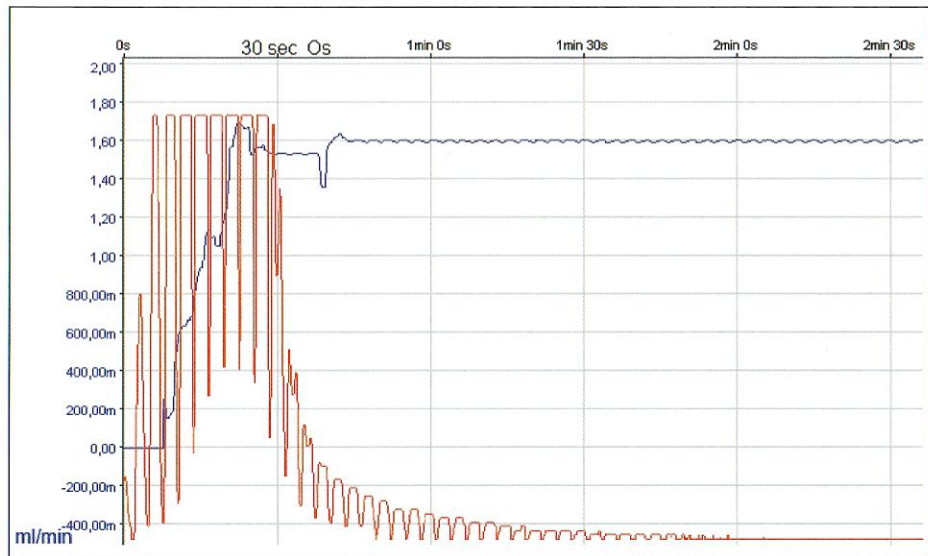
Im zweiten Versuch wurde die Kalkpatrone vollständig »geflutet«. Dies hatte zur Folge, dass die  $\text{CO}_2$ -Konzentration schnell bis auf einen Wert von 16 mbar anstieg und sich nach ca. zehn Minuten auf einen Wert von ca. 5,8 mbar senkte. Dies zeigte, dass trotz der komplett gefluteten Kalkpatrone eine Absorption stattfand, diese jedoch über dem Schwellenwert von 5 mbar lag und somit der Kalk für den Taucheinsatz unbrauchbar war.

So unlogisch das auch klingen mag, einerseits ist man bemüht, dass kein Wasser in den Absorber gelangt, andererseits reagiert und »arbeitet« Atemkalk nur, wenn er einen gewissen Feuchtigkeitsgehalt aufweist. Aus der Grafik geht hervor, dass der Atemkalk die benötigte Reaktionsfeuchtigkeit von ca. 16 % nicht besitzt. Gründe hierfür können große Hitze, Überlagerung oder Ausfrieren der Feuchtigkeit durch tiefe Temperaturen sein. Im

Versuch ließ der Kalk  $\text{CO}_2$  zunächst ungehindert durch die Kalkpatrone hindurch. Nach ca. 30 Sekunden begann die  $\text{CO}_2$ -Absorption, da nun die für die Reaktion notwendige Feuchtigkeit aus der Expiration zur Verfügung stand. Wie man der Grafik entnehmen kann, war nach ca. 30 sec. kein  $\text{CO}_2$  auf Einatemseite mehr messbar.

### Atemkalk-Entsorgung

Auch wenn es sich bei verbrauchtem Atemkalk zum großen Teil um Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) handelt, muss die Entsorgung gem. dem Abfallschlüssel der Bundesländer erfolgen. Aufgrund von EG-Vorschriften ist eine Entsorgung über den Hausmüll nicht mehr erlaubt. Informationen darüber geben die regional zuständigen Entsorgungsbetriebe. Aus Sicherheitsgründen sollte darauf geachtet werden, dass der verbrauchte Atemkalk nicht wieder in den gleichen Gebinden



Durch einen zu geringen Feuchtigkeitsgehalt des Atemkalkes begann die  $\text{CO}_2$ -Absorption erst nach ca. 30 Sekunden.

entsorgt wird. Zu groß ist die Gefahr, dass dieser bereits genutzte Kalk abermals zum Tauchen verwendet wird.

### Zukunftsperspektiven

Die Entwicklung der Kreislaufgeräte erfolgt zurzeit in großen Schritten. In naher Zukunft kann man davon ausgehen, dass präzisere  $\text{O}_2$ -Messgeräte und für den Tauchsport verwendbare  $\text{CO}_2$ -Analysatoren zur Verfügung stehen, um die Gaslogistik zu optimieren. Ebenfalls sind gegen Wassereintrüche resistente Atemkalke vorstellbar. Auch an anderen Chemikalien zur  $\text{CO}_2$ -Absorption oder physikalischen Methoden zur  $\text{CO}_2$ -Filterung wird geforscht. Immer wieder werden Molekularsiebe genannt, die bereits in der Tauchindustrie Verwendung finden. Damit diese aber vergleichbar wie Atemkalke funktionieren, muss ein ausreichend großes Druckgefälle bestehen.

Ein Filter lässt dabei nur Moleküle einer bestimmten Größe durch. Denkbar sind in diesem Zusammenhang auch teildurchlässige Membranen, bei denen sich Gase nur in einer Richtung hindurchbewegen und so das Kohlenstoffdioxid ausgefiltert wird. Kreislaufgerätehersteller experimentieren an kleinen und sehr leichten Konzepten, die auf dem Prinzip elektronischer Gasreinigung arbeiten. Zuletzt könnte man sich auch Tieftemperaturtechnologien vorstellen, die unter Ausnutzung der verschiedenen Gefrierpunkte der Atemgase Kohlenstoffdioxid von den anderen vorhandenen Gasen trennen. Viele Fachleute sind davon überzeugt, dass sich die diversen Alternativen zum Atemkalk nur in großen Kreislaufgeräten realisieren lassen. Dennoch erscheint es denkbar, z. B. ein  $\text{O}_2$ -Kreislaufsystem mit einer elektronischen Gasreinigung zu entwickeln.

## 10. Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten

Kreislaufgeräte sind in ihrer Handhabung gegenüber Pressluft-Tauchgeräten wesentlich anspruchsvoller. Daher sind für ihre Verwendung einige Regeln zu beachten. So sollte der Taucher beispielsweise nach der Dichtigkeitsprüfung des Gerätes sicher sein, dass sein Gerät wasser- und gasdicht und somit zum Einsatz bereit ist. Die folgenden Schritte müssen für jeden O<sub>2</sub>-Taucher völlig selbstverständlich werden und ihm sprichwörtlich ins Blut übergehen. Wie bereits erwähnt unterscheidet man grob zwischen:

- ▶ Tauchgangsvorbereitung
- ▶ Tauchgangsdurchführung
- ▶ Tauchgesetze und Tauchgangsplanung
- ▶ Tauchgangsnachbereitung

### Tauchgangsvorbereitung

#### 1. Ruhe

Kreislauftauchen ist ein Genuss. Dieser Genuss sollte bereits beim Zusammenbau beginnen. Oberstes Gebot hierfür – sich nicht hetzen lassen, von nichts und niemandem.

#### 2. Sichttest des Kreislaufgerätes

Vor dem Tauchgang sollten alle Bauteile überprüft werden. Besonders Augenmerk sollte auf Beschädigungen der Atembeutel, Risse in Schläuchen und mechanische Beschädigungen an Mundstücken, der Außenhülle sowie am Druckminderer gelegt werden.



Überprüfung des Sauerstoffpartialdruck-Messgerätes.

#### 3. Prüfung und Kalibrierung des O<sub>2</sub>-Sensors

Sauerstoffsensoren, die in einem Kreislaufgerät zur Überwachung eingesetzt sind, müssen vor dem Tauchgang kalibriert werden. Die Kalibrierung des Gerätes erfolgt durch Bestimmung des Prozentanteils von Sauerstoff in der Umgebungsluft (20,9 % O<sub>2</sub>). Sollte eine Kalibrierung auf 20,9 % Sauerstoffanteil in der Umgebungsluft nicht möglich sein, ist von einem defekten Sensor auszugehen. Ebenso kann die Kalibrierung mit 100 % Sauerstoff durchgeführt werden.

Diese Variante wird jedoch eher selten angewandt.

#### 4. Überprüfung des Vorratsgases

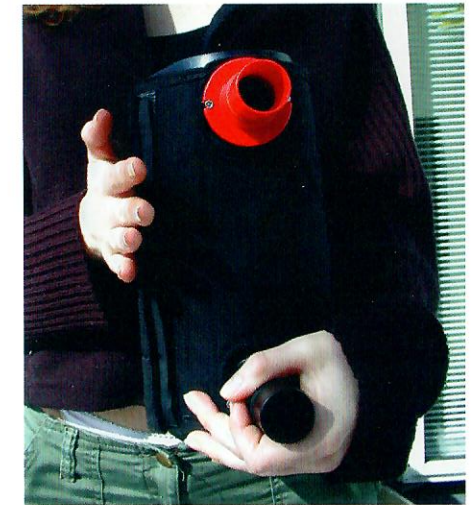
Trotz der Verwendung von reinem Sauerstoff ist die Füllung der Vorratsflasche vor jedem Tauchgang zu überprüfen. Die Analyse erfolgt mit dem kalibrierten Sauerstoffmessgerät. Es bietet sich an, zugleich den Betriebsdruck der Vorratsflasche mit einem sauerstoffgeeigneten Finimeter zu prüfen.

#### 5. Absorberkalk

Der Atemkalk muss vor der Verwendung im Atemkalkbehälter auf sein Haltbarkeitsdatum überprüft werden. Überlagerter Atemkalk verliert mit der Dauer seiner Ablaufzeit an Absorptionsfähigkeit. Aus rechtlichen Gründen sollte überlagerter Atemkalk nicht mehr verwendet werden. Der Kalk muss gut in den Atemkalkbehälter eingerüttelt werden. Wie bereits im Kapitel Atemkalk ausführlich beschrieben, wird eine optimale Verdichtung des Atemkalkes durch leichte Schläge auf die Außenhülle des Absorbers erreicht. Man beobachtet dabei das Setzen des Kalkes.



Die Überprüfung des Gemisches der Vorratsflasche ist vor jedem Tauchgang zwingend notwendig.



Nur ein gut eingerüttelter Atemkalk verhindert eine Kanalbildung innerhalb der Kalkpatrone.

Nachdem die Patrone befüllt wurde, darf der Inhalt bei Schüttelbewegungen keine Geräusche erzeugen. Als Letztes erfolgt der Dichtigkeitstest. Dabei wird Luft durch die Ausatemseite (meist rot gekennzeichnet) in die Patrone geblasen. Zugleich wird mit der Handfläche die Öffnung der Einatemseite verschlossen. Bei richtig montiertem Kalkabsorber kann die Luft nicht entweichen. Durch das Einblasen der Luft kommt es sowohl im Behälter als auch im Mund zu einem Druckanstieg. Auf diese Weise können Undichtigkeiten im Atemkalkbehälter nachgewiesen werden, z. B. durch hörbares Entweichen von Luft.

#### 6. Überprüfung der Atemschläuche und der Ventile

Die Richtungsventile werden bei geschlossenem Mundstück überprüft.

Man unterscheidet:

- ▶ Wangentest und
- ▶ Knutschfleckttest



Der Dichtigkeitstest nach Befüllung des Atemkalkbehälters dient der Überprüfung des richtigen Sitzes der Deckeldichtung und etwaigen Undichtigkeiten (Haarrisse).

### Wangen-Test

Dieser Test wird zur Überprüfung der Richtungsventile von der Einatem- zur Ausatemseite durchgeführt. Das mit roten Markierungen versehene Ende des Ausatemschlauches wird an die Wange gedrückt. Auf der grün gekennzeichneten Seite wird in den Schlauch hineingebla-



Überprüfung der Richtungsventile und der Dichtigkeit der Atemschläuche.

sen. Die Schlauchenden müssen an Mund und Wange abdichten. Hierbei entsteht ein Überdruck im Schlauch, da beide Ventile zur Ausatemseite hin öffnen. Die ein-geblasene Luft kann auf der Wangenseite nicht entweichen und die Schläuche straffen sich.

### Knutschflecktest

Der Schlauch kann mit der grünen Seite am Mund belassen werden. Wie beim Versuch einen Knutschfleck zu erzeugen, wird die Luft im Schlauch angesaugt. Auf der Einatemseite (grün) entsteht ein Unterdruck und der Schlauch zieht sich zusammen. Der Ausatemschlauch (rot) bleibt davon unberücksichtigt, da er sich hinter dem Einatemventil befindet. Um die andere Richtung beim Ausatemschlauch zu testen, wird das rot gekennzeichnete Ende zum Mund geführt und kräftig in den Schlauch geblasen. Bei richtiger Funktion des Ventils strafft sich der Schlauch, da die darin befindliche Luft nicht entweichen kann.

### 7. Flow-Rate

Jedes Gerät mit einer Konstantdosierung muss für einen sicheren Tauchgang eine definierte Menge Sauerstoff (in der Regel 0,4 – 0,7 l/min) pro Minute mithilfe einer Düse zur Verfügung stellen. Um den richtigen Gasfluss zu gewährleisten, muss die Düsenfunktion mit einem Flowmeter vor jedem Tauchgang geprüft werden. Dieses Messgerät befindet sich meistens im Lieferumfang des Gerätes. Sollten die Flowmeter-Anzeigen zu geringe Werte anzeigen, muss die Düse gewechselt werden. Bei gleichem Ergebnis nach dem Wechsel der Bedüsung ist von einem defekten Flowmeter oder falschem Mitteldruck auszugehen.



Geöffnete Walze (Schieber). Bei den meisten Geräten steht der Schieber in waagerechter Position.

### 8. Bedienung des Mundstücks

Völlig anders als beim offenen System wird das Mundstück beim Kreislauftauchen bedient. Immer wenn das Mundstück zum Atmen in den Mund genommen wird, muss der Schieber im T-Stück geöffnet werden. Meist geschieht dies durch Hochstellen des Stiftes in die waagerechte Position (wie auf dem oberen Bild zu sehen). Sollte das Mundstück



Geschlossene Walze (Schieber). Der Hebel zeigt nach unten. In dieser Position befindet sich der Schieber immer dann, wenn nicht getaucht wird. Damit wird versehentliches Eindringen von Wasser in den Kreislauf verhindert.

während des Tauchens oder nach Tauchgangsende wieder aus dem Mund genommen werden, wird der Schieber wieder geschlossen (siehe unteres Foto). Die Stellung der Schieber und somit des Stiftes kann zwischen den einzelnen Modellen variieren.

### 9. Unterdruck-Test

Um die Dichtigkeit des Gerätes zu überprüfen erfolgt zuerst der Unterdrucktest. Das Gerät muss komplett zusammengebaut sein. Im Anschluss wird über das Mundstück ein Vakuum in den Atembeutel gesogen. Das Mundstück wird geschlossen und abgelegt. Der Atembeutel darf sich innerhalb von fünf Minuten nicht entspannt haben.



Beim Unterdrucktest zieht sich der Atembeutel deutlich sichtbar zusammen und muss dieses Vakuum auch nach dem Schließen des Mundstücks beibehalten.

## 10. Überdrucktest

Durch den Unterdrucktest kann man eine Beschädigung einiger Baugruppen nicht mit Sicherheit ausschließen. Befindet sich z. B. ein Loch im Atembeutel und liegen dabei beide Seiten des Beutels passend übereinander, dichtet der Atembeutel durch Adhäsionskräfte des Unterdrucks das Loch ab. Beim Überdrucktest wird durch den Bypass so viel Sauerstoff in den Atembeutel gefüllt, bis er prall gefüllt ist. Meist wird der Überdrucktest im Wasser durchgeführt. Drückt man jetzt das Kreislaufgerät unter Wasser, perlt an den undichten Stellen Sauerstoff heraus. Um die begrenzten Sauerstoffvorräte nicht unnütz zu vergeuden, kann der Test auch durch Einatmen von Luft in das Gerät durchgeführt werden. Für die Überprüfung



fung ist es unbedeutend, ob sich Umgebungsluft oder Sauerstoff im Atembeutel befinden. Sollte ein Test im Wasser nicht möglich sein, z. B. bei der Kontrolle an Bord eines Schiffes bei stärkerem Seegang, ist der Überdrucktest auch mithilfe eines 2 kg-Bleigewichtes möglich. Das Gewicht wird auf den Atembeutel gelegt. Senkt sich der Atembeutel innerhalb von 5 Minuten, ist eine Undichtigkeit vorhanden. Bleibt das Volumen erhalten, ist das Tauchgerät betriebsbereit.



Die Dichtigkeit des Gerätes kann mithilfe eines Bleistückes oder aber durch Eintauchen des Gerätes ins Wasser mit gefülltem Atembeutel überprüft werden.

## Tauchgangsdurchführung

### 1. Einstiegsmöglichkeiten

In den folgenden Bildserien werden zwei Möglichkeiten gezeigt, wie man mit einem Sauerstoff-Kreislaufgerät zu Wasser gehen kann. Der Taucher sollte eine dieser Varianten nur dann wählen, wenn er das Gewässer gut kennt.

### 2. Geräusche

Während des Tauchgangs muss auf Geräuschentwicklungen geachtet werden, die nicht den üblichen Betriebsgeräuschen entsprechen. Bei häufigem Gebrauch des Kreislaufgerätes können schon die geringsten Geräuschänderungen wahrgenommen werden. Diese deuten häufig auf ein Problem innerhalb oder außerhalb des Gerätes hin.

### 3. Kontrolle des $pO_2$

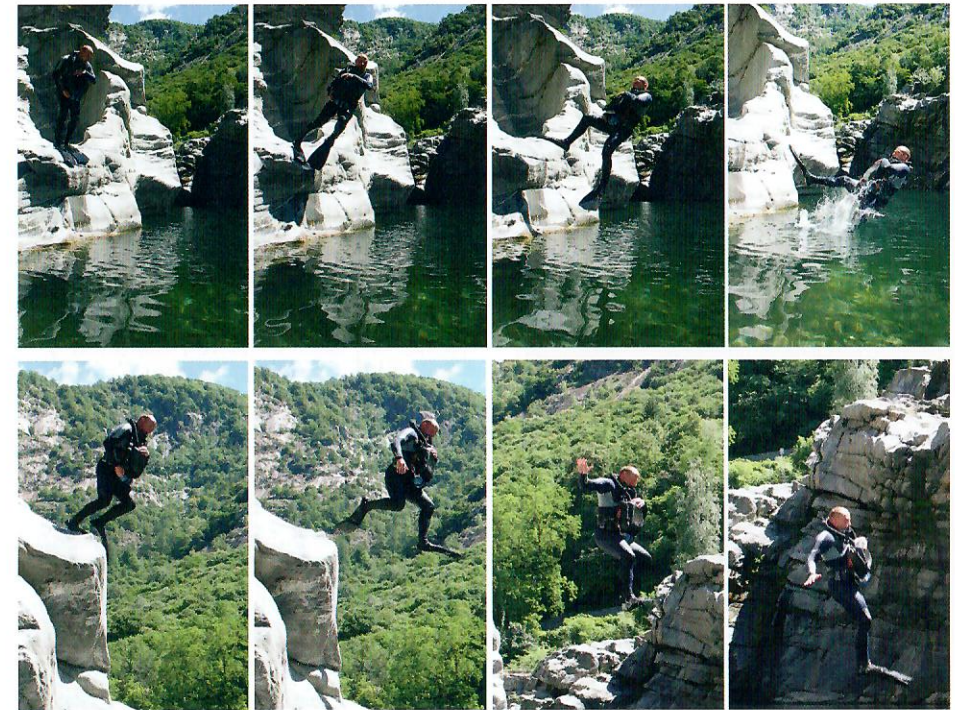
Bei Verwendung eines Sauerstoffmessgerätes sollte im kontinuierlichen Abstand die Kontrolle des Sauerstoffgehaltes in der Gegenlung erfolgen. Änderungen des  $O_2$ -Partialdrucks können auf Wassereintrich, abnehmende  $CO_2$ -Absorption oder zu hohen Stickstoffanteil durch mangelnde Spülung hinweisen. Letztlich kann es sich aber auch um einen »verbrauchten« Sensor handeln.

### 4. Spülen

Stickstoff lässt sich nicht wie Kohlenstoffdioxid im Atemkalk binden, da es sich hierbei um ein Inertgas handelt. Im Atemkreislauf und in den Atemwegen befindlicher Stickstoff muss vor Tauchbeginn

aus dem Kreislaufsystem entfernt werden, um eine Sauerstoffunterversorgung während des Tauchgangs auszuschließen. Aus diesem Grund ist das Spülen des Kreislaufgerätes unumgänglich, da es den Sauerstoffgehalt im Atembeutel beeinflusst.

Die Hersteller von Kreislauf-Tauchgeräten schreiben einen dreimaligen Spülvorgang vor dem Tauchgang vor. Das bedeutet, dass dreimal aus dem Atembeutel das Vorratsgemisch eingeatmet und durch die Nase in die Umgebung abgegeben wird. Tests haben gezeigt, dass mindestens neun Spülvorgänge notwendig wären, um annähernd einen Ausgleich zwischen Gegenlung und Vorratsgas zu erreichen.



Entscheidend für einen sicheren Einstieg ist die Sicherung der Sauerstoffschläuche im Nackenbereich und das Fixieren des Gerätes am Körper.



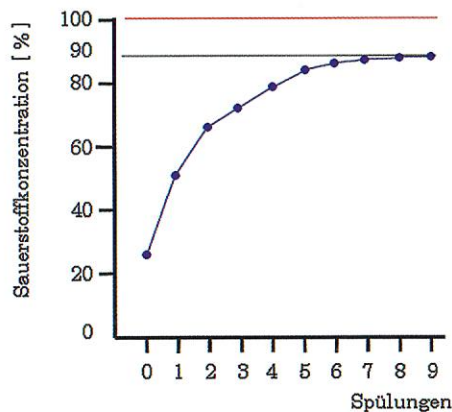
Kontrolle des Tauchcomputers. Moderne Geräte erlauben die Berechnung des Tauchgangs und eine ständige Kontrolle des Sauerstoffpartialdrucks.

Durch das Spülen sinkt zwar der  $N_2$ -Partialdruck im System, jedoch gelangt ständig der in den Körpergeweben gelöste Stickstoff in die Lunge und dann auch in den Atembeutel.



Wie auf dem Foto zu sehen ist, wird während des Spülvorgangs nicht nur Stickstoff, sondern auch  $CO_2$  ausgespült, das während des Tauchens durch den Atemkalk im Gerät gebunden wird.

Dies geschieht aufgrund des Partialdruckgradienten. Dabei wird der Stickstoff aus den Geweben durch den erhöhten Sauerstoffpartialdruck herausgelöst, gelangt in die Lunge und von da aus in den Atembeutel. Aus diesem Grund wird nach jeweils 30 Tauchminuten ein weiterer



Wie in der Grafik ersichtlich, befinden sich nach neun Spülvorgängen durchschnittlich knapp 90 % Sauerstoff im Atembeutel. Der höchste gemessene Wert lag bei 94 %  $O_2$ .

Spülvorgang durchgeführt. Dieser kann um einige Minuten variieren, ohne dass Probleme auftreten. Sollte jedoch ein Presslufttauchgang im Vorfeld durchgeführt worden sein, ist eine Spülung nach Herstellerangaben in dem genannten Zeitfenster dringend zu empfehlen.

### 5. Tauchen und Tariern

Der Tariervorgang beim Sauerstoffkreislaftauchen erfolgt grundlegend anders als bei offenen Systemen. Der Tauchvorgang wird in drei Phasen eingeteilt:

- Grundtariierung
- Tariierung während des Tauchgangs
- Besonderheiten der Tariierung

#### Grundtariierung

Grundsätzlich bleibt festzustellen, dass ein reiner  $O_2$ -Rebreather ohne Tariereinheit betaucht wird. Aufgrund einer fehlenden Tariermöglichkeit würde ein Taucher mit einem Sauerstoff-Kreislaufgerät ab einer bestimmten Tiefe gegen einen unangenehmen Abtrieb antauchen müssen. Aus diesem Grund muss ein Gleichgewicht zwischen Auftrieb und Abtrieb geschaffen werden, welches ein angenehmes Tauchen auf einer definierten Tauchtiefe ermöglicht.

Die optimale Tariertiefe liegt bei einem Kreislaufgerät bei einer Tiefe zwischen 4 und 5 Metern.

Um diese optimale Tariierung zu erreichen, wird so viel Blei angelegt, dass der Taucher mit einem eingeatmeten Atemzug und leerem Atembeutel bis zu den Augen im Wasser einsinkt. Der Taucher befindet sich dabei im hydrostatischen Gleichgewicht. Wenn der Taucher vor dem Tauchgang mit dem »Einspülen« ins Gerät beginnt, sinkt er beim letzten Ausblasen ab.

Natürlich gibt es auch Tariersysteme für Sauerstoff-Kreislaufgeräte. Durch die bevorzugte Trageweise des Gerätes auf der Brust des Tauchers und die fehlenden Tauchflaschen im Rückenbereich müssen die Tariermittel den Gerätebedingungen angepasst sein.

Man unterscheidet bei den Tariersystemen zwischen folgenden Möglichkeiten:

- Nasstauchanzug mit eingearbeiteter Blase (sehr selten)
- Normales Jacket (häufig Eigenbau)
- Konstantvolumenanzug (Trockentauchanzug)
- Tauchersicherungskragen (TSK)
- Spezielle Harnesssysteme (militärisch)



Abtauchen mit den Füßen voran ist auch beim Kreislaftauchen die bevorzugte Variante.



Eines der seltenen Modelle mit eingearbeitetem Auftriebskörper (Modell Sprinter der Firma Marlin).

Sehr selten trifft man auf einen Nass-tauchanzug mit eingearbeiteter Auftriebsblase. Diese Konstruktion hat sich nicht durchgesetzt, obwohl sie vom Ansatz her gut durchdacht ist.

Fast alle konventionellen Jackets können für die Aufnahme eines Kreislaufgerätes umgebaut werden. Dabei handelt es sich immer um Spezialanfertigungen oder auf-

wendige Eigenbauten. Der große Vorteil besteht in der Möglichkeit, bis zur maximalen Einsatztiefe zu tauchen und dann auf das zusätzlich mitgeführte offene System zu wechseln. In jedem Fall muss beim Auftauchen ein erneuter Spülvorgang beim Einsatz des Sauerstoff-Kreislaufgerätes durchgeführt werden. Dieses Konzept eröffnet diverse, interessante Möglichkeiten.

Eine weitere Möglichkeit ist die Kombination eines Trockentauchanzuges und eines Bleigurtharnes ohne Tariereinheit. Die kleine Einliterflasche im Jacket speist das auf dem Oberschenkel angebrachte Einlassventil des Trockentauchanzuges. Auch hier sind vielseitige Kombinationsmöglichkeiten denkbar. Solche Umbauten sind aber sehr teuer, da das auf der Brust liegende Ventil verschlossen werden muss und an den Oberschenkel verlegt wird.



ADV-Jacket mit einer Kombination eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes (Castoro 96 pro) und eines Presslufttauchgerätes.



Konstantvolumenanzug mit umgebautem Einlassventil auf dem Oberschenkel.

Bei der Verwendung von Auftriebsmitteln wird grundsätzlich mehr Blei benötigt. Der erhöhte Bleibedarf ergibt sich aus dem Eigenauftrieb der Tariereinheit. Beim Konstantvolumenanzug kommt hinzu, dass ein Trockenanzug nur dann warm ist, wenn man Luft einfüllt. Aus diesem Grund ergibt sich ein Bleibedarf, der über der normal notwendigen Menge liegt. Die Kampfschwimmer der Bundeswehr



Kampfschwimmer mit Tauchersicherungskragen TSK 47.

betauchen ihr Kreislaufgerät mit einem Tauchersicherungskragen. Er sieht zwar sehr gewöhnungsbedürftig aus, erfüllt aber seinen Zweck. Er wird jedoch weniger zum Trieren als zum Schwimmen an der Oberfläche eingesetzt. In der militärischen Entwicklung befindliche Harnesssysteme erlauben sowohl das Trieren als auch die Möglichkeit das benötigte Blei komfortabel am Körper zu tragen und im Notfall abzuwerfen. Zudem können sie mit einem ballistischen Schutz ausgestattet werden. Ein integriertes Notfallsystem ermöglicht ein Aufsteigen zur Oberfläche und eine ohnmachtsichere Lage im Wasser.

Für den Sporttaucher gibt es auf dem Markt nur wenige Harnesssysteme mit Tariereinrichtung. Trotz fehlender Tariereinrichtung haben Harnesssysteme aber den Vorteil, dass der Taucher durch die



Harnesssystem der Firma OMG mit integriertem Bleiabwurfssystem.



Bei diesem System erkennt man die hinteren Bleitaschen, die jedoch im Notfall nicht gleichzeitig abgeworfen werden können.

integrierten Bleitaschen eine bessere Lage unter Wasser erreicht. Diese Systeme werden wie Jacken getragen und haben dadurch einen sehr guten Tragekomfort. Sie verteilen das Gewicht der Geräte und des Bleis über den gesamten Oberkörper. Einige Modelle bieten zusätzlich ein Schnellabwurfssystem für das Blei an.

Wer sich ein Harness für das Sauerstoff-Kreislaufgerät zulegt, kann auch andere Annehmlichkeiten genießen. Ein zusätzlich angebrachter Schrittgurt verhindert das Herumrutschen des Gerätes und ermöglicht die Befestigung eines Unterwasserscooters an der Schrittgürtöse.

#### Tarierung während des Tauchgangs

Die Tarierung während des Tauchgangs ohne Zuhilfenahme eines Tariermittels kann nur geringfügig beeinflusst werden.



Zu sehen ist ein Scooter, der in den Schrittgurt des Harnesssystems eingehängt ist.

Dem Taucher bleibt nur die Möglichkeit durch Ausatmung über die Nase oder durch lungenautomatische/manuelle Gaszuführung die Tarierung zu ändern. Zusätzlich wird durch Volumenreduktion des verbrauchten Sauerstoffs im Atembeutel die Einhaltung der Tauchtiefe beeinflusst. Bei geringfügigem Absinken von der gewählten Tauchtiefe arbeitet der Taucher mit erhöhtem Flossenschlag dem weiteren Abtrieb entgegen und erhöht das Gasvolumen über lungenautomatische oder manuelle Steuerung. Sollte der Taucher nach einem unbeabsichtigten Absinken von mehreren Metern z. B. durch Unachtsamkeit dem Kreislauf einen erhöhten Gasanteil zugeführt haben, muss er die Ausdehnung des Gases beim Auftauchen berücksichtigen und das Gas über Nase und Mund kontrolliert an die Umgebung abgeben. Berücksichtigt er



Perfekt austariert gibt es nichts Schöneres, als blasenfrei durchs Wasser zu schweben.

das nicht, riskiert er ein zu schnelles Auftauchen zur Oberfläche, welches einen Lungenriss oder aber das Platzen des Atembeutels zur Folge haben kann.

#### Tauchgesetze und Tauchgangsplanung

Sauerstoff-Kreislauf-Taucher, die sich meist in einem Bereich von null bis zehn Metern Wassertiefe bewegen, müssen bereits auf geringe Änderungen der Tauchtiefe reagieren. Diese Änderung soll an einem Taucher in einer Tiefe von vier Metern bei einem Lagewechsel von der waagerechten zur senkrechten Position dargestellt werden. Bei diesem Positionswechsel richtet sich der Oberkörper auf und verringert seine Tauchtiefe etwa um

einen halben Meter. Die Druckentlastung des Atemgases führt zu einem Volumenzuwachs im Atemkreislauf. Für die Berechnung der Volumenänderung wird das Gesetz von Sir Robert Boyle und Edme Mariotte mit folgender Aussage herangezogen.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \text{ bei } T \text{ konstant}$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

$$\frac{1}{V} \sim p$$

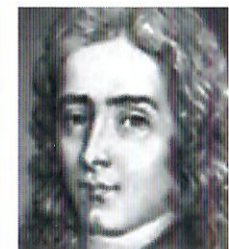
Bei gleichbleibender Temperatur steht für eine gegebene Gasmenge der Druck im umgekehrten Verhältnis zum Volumen.

Mit der genannten Formel kann die oben beschriebene Volumenzunahme berechnet werden. Bekannt ist der Anfangsdruck von 1,4 bar (4 Meter Wassertiefe) und die Druckveränderung von 0,5 bar (0,5 Meter) durch den Lagewechsel. Angenommen werden drei Liter Gas im Atemkreislauf.

0.05!



Sir Robert Boyle.



Edme Mariotte.

Edme Mariotte war ein katholischer Geistlicher und Physiker, der von 1620 bis 1684 in Frankreich lebte. Er formulierte und bestätigte das mit seinem Namen verbundene Boyle-Mariottesche Gesetz.

Berechnung:

$$P_1 = 1,4 \text{ bar} \quad \checkmark$$

$$P_2 = 1,35 \text{ bar} \quad \checkmark$$

$$V_1 = 3 \text{ Liter} \quad \checkmark$$

$$V_2 = ?$$

$$\frac{p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2}{1,4 \text{ bar} \cdot 3 \text{ Liter}} = 1,35 \text{ bar} \cdot V_2$$

$$V_2 = \frac{1,4 \text{ bar} \cdot 3 \text{ Liter}}{1,35 \text{ bar}} = 3,11 \text{ Liter} \quad \checkmark$$

Die Volumenzunahme beträgt lediglich 0,11 Liter im Atembeutel. Das führt nicht zwangsläufig zu einem Aufstieg eines Tauchers an die Wasseroberfläche. Anders sieht es bei größeren Atemgasvolumina im Kreislauf und stärkeren Tiefenänderungen aus. Durch einen raschen Aufstieg über mehrere Meter entspannt sich das Atemgas im Kreislauf zwischen Taucherlunge und Atembeutel. Der Atemgasüberschuss kann so groß sein, dass der Taucher Schwierigkeiten hat das Mundstück im Mund zu halten. Dies gilt besonders für unerfahrene Taucher. Auch erfahrenen Tauchern gelingt es nicht, schnelle Tiefenwechsel zur Oberfläche ohne ein Aufblähen der Wangen durchzuführen. Im Normalfall wird ein Aufstieg beim Kreislauftauchen recht früh begonnen. Der Taucher versucht ohne Gasverlust das im Kreislauf befindliche Atemgas abzuatmen. Unterstützt wird dies durch ein diagonales Tauchprofil. Bei militärischen Einheiten entscheidet ein perfekter Umgang mit dem Atemgas im Kreislauf oft über den Erfolg oder Misserfolg des Einsatzes. Es lassen sich drei Methoden unterscheiden, optimal mit dem Atemgasvolumen umzugehen:

- ▶ Manuelle Gaszuführung
- ▶ Lungengesteuerte Gaszuführung
- ▶ Konstantdosierung

Bei der »Manuellen Gaszuführung« wird durch Öffnen und Schließen des Ventils oder durch eine manuelle Dosiereinrichtung Atemgas dem Kreislauf zugeführt. Es liegt im Ermessen des Tauchers, wie viel Atemgas in den Kreislauf gelangt. Ein Überangebot an Atemgas ist somit vor dem Auftauchen leicht zu vermeiden.

Bei der »Lungengesteuerten Gaszuführung« ist es etwas komplizierter. Dieses Prinzip führt dem Atemkreislauf beim Erzeugen eines Unterdrucks im System (durch die Lunge) so lange Atemgas zu, bis der Unterdruck ausgeglichen ist. Ein Problem stellen Lungenautomaten dar, die ein extrem leichtes Ansprechverhalten aufweisen. In diesem Fall kann schnell ein Überangebot an Atemgas im Kreislauf entstehen. Um beim Aufstieg das Problem zu umgehen, wird bedarfsorientiert die Atemgasflasche geschlossen und bei Bedarf wieder geöffnet. Geübte Taucher stellen den Ansprechdruck ihres Automaten so ein, dass bei flacher Atmung kein Gasfluss erfolgt. Das erspart dem Taucher das Schließen der Vorratsflasche.

Wie bereits beschrieben, stellen Geräte mit einer Konstantdosierung einen konstanten Gasfluss bereit. Beim Aufstieg liegt ein Überangebot an Atemgas vor. Der vermeintliche Vorteil ständig Frischgas im Atemkreislauf bereitgestellt zu bekommen, wird beim Aufstieg zum Nachteil. Die Kontrolle der Atemgasmenge ist nur durch Öffnen und Schließen des Flaschenventils möglich. Erfahrene Militärtäucher atmen bereits frühzeitig das Volumen des Kreislaufes so weit ab, dass sie ohne Atemgas an die Umgebung abgeben zu müssen zur Oberfläche aufsteigen können. Fälschlicherweise wird behauptet, sie würden das Überangebot an Gas herunterschlucken. Das wäre unlogisch,



John Dalton.

da sich das Volumen nicht ändert und weiterhin ein Auftrieb besteht.

Korrekt dagegen ist, dass Militärtäucher das in der Maske beim Auftauchen expandierende Gas in den Kreislauf einatmen und metabolisieren. Bei Tauchgängen mit O<sub>2</sub>-Kreislaufgeräten müssen nicht nur das Sauerstoffangebot und die damit verbundenen Volumenänderungen, sondern auch der Sauerstoffpartialdruck in der Gegenlunge beachtet werden. Wenn während eines Tauchgangs der Partialdruck des Sauerstoffs nicht in medizinisch unbedenklichen Grenzen gehalten wird, kann es für den Taucher lebensgefährlich werden. Grundsätzlich kann man Folgendes festhalten: Je höher der Partialdruck, desto kürzer die Expositionszeiten. Der Zusammenhang zwischen Gasdruck und den Partialdrücken wurde vom britischen Chemiker und Physiker John Dalton (1766 bis 1844) 1801 beschrieben:

Der Gesamtdruck eines Mischgases entspricht der Summe aller Partialdrücke. Dabei verhält sich jedes Gas so, als sei es nur alleine vorhanden und könne das gesamte Volumen alleine einnehmen.



Eine Kampfschwimmerrotte auf dem Weg ins Einsatzgebiet.

$$p_{\text{gesamt}} = p_1 + p_2 + p_3 + p_n \quad \checkmark$$

Die Kunst beim Sauerstoff-Kreislauftauchen besteht darin, den Partialdruck von O<sub>2</sub> in physiologisch unbedenklichen Grenzen zu halten. In der Tauchmedizin werden zwei Grenzwerte für Sauerstoffpartialdrücke definiert. Ein Taucher, der unter optimalen Bedingungen (keine körperlichen Anstrengungen) taucht, kann unbedenklich einem maximalen Sauerstoffpartialdruck von 1,6 bar ausgesetzt werden. Wird hingegen in kaltem Wasser oder unter größeren körperlichen Anstrengungen getaucht, sollte der maximale Partialdruck aus Sicherheitsgründen

um 0,1 bar gesenkt werden. Weitere Faktoren, die die Partialdruckgrenze heruntersetzen, sind längere Tauchzeiten, oder Wiederholungstauchgänge. Grundsätzlich wird der Partialdruck in diesen Situationen auf einen Maximalwert von 1,4 bar reduziert. Zur Kontrolle des Partialdrucks kann ein Tauchcomputer verwendet werden, der eine Eingabe von max. 100 % Sauerstoff ermöglicht. Der Computer warnt den Taucher beim Erreichen der Partialdruckgrenzwerte und zeichnet eine Durchschnittsbelastung auf. Eine andere Möglichkeit besteht in der Berechnung des Sauerstoffpartialdrucks vor dem Tauchgang. Dazu muss die maximale Tiefe des Tauchgangs bekannt sein. Die Einhaltung der berechneten Tauchtiefe wird mit einem Tiefenmesser kontrolliert. Versuche bei militärischen Tauchern haben gezeigt, dass sich nach dreimaligem Spülen des Kreislaufes ein maximaler Sauerstoffanteil von 76 % im Atembeutel befindet. Ist für den Tauchgang eine Tauchtiefe definiert worden, kann man mit der folgenden Formel den  $pO_2$ -Wert berechnen.

$$pO_2 \text{ (bar)} = F_{iO_2} \text{ (bar)} \cdot \left[ \frac{T_{\text{max}} \text{ (m)}}{10\text{m}} + 1\text{m} \right]$$

Für diese Berechnung werden folgende Angaben benötigt:

$pO_2$  = Sauerstoffpartialdruck in bar

T = Tauchtiefe in Metern

$F_{iO_2} = 0,76 \text{ bar } O_2$

Bei 8 Metern Tauchtiefe ergibt sich somit ein Sauerstoffpartialdruck von 1,368 bar.

$$pO_2 \text{ (bar)} = 0,76 \text{ bar} \cdot \left[ \frac{8\text{m}}{10\text{m}} + 1\text{m} \right] = 1,368 \text{ bar}$$

Die Zahlenwerte sind korrekt, aber die Formeln

Neben dem Sauerstoffpartialdruck ist auch die Sauerstoffaufsättigung während eines Tauchgangs von Interesse. Die Sauerstoffaufsättigung, die vergleichbar mit einer Stickstoffanreicherung eines Presslufttauchgangs ist, wird nach dem Tauchgang anhand bestehender Berechnungstabellen ermittelt.

Die dort dargestellte Tabelle zeigt den Zusammenhang zwischen dem Sauerstoffpartialdruck und der Expositionsdauer, der in der Fachliteratur unter der  $O_2$ -Belastung des zentralen Nervensystems (ZNS) bekannt ist. Um eine Schädigung durch eine zu hohe Sauerstoffbelastung des ZNS auszuschließen, dürfen Maximalgrenzen (Tiefe/Zeit) nicht überschritten werden. Weiterführende Erklärungen finden Sie im Kapitel Tauchmedizin.

Anhand der Tabelle können durch die vorgegebenen Sauerstoffpartialdrücke die maximalen Tauchzeiten ermittelt werden.

Beispiel: Bei einem Sauerstoffpartialdruck von 0,9 bar ist eine Tauchzeit von 357 Minuten zulässig; das entspricht einer Sauerstoffbelastung von 0,28 Prozent pro Minute. Um eine Oberflächenpause zwischen zwei Tauchgängen zu berücksichtigen, kann gemäß der dort gezeigten Tabelle die ZNS-Entsättigung berechnet werden.

Ein Beispiel aus der Praxis soll diese Zusammenhänge verdeutlichen:

Ein Tauchgang wird in 5 Meter Wassertiefe durchgeführt. Durch eine starke Strömung und sehr kaltes Wasser wird zunächst auf 3 Meter und kurz vor der Rifflandschaft auf eine Tiefe von 5 Meter abgetaucht. Nach 50 Minuten wird der Tauchgang beendet und der Computer zeigt eine Durchschnittstauchtiefe von

atm!

$pO_2$ (bar)	ZNS $O_2$ %	Tauchzeit (min)	$pO_2$ (bar)	ZNS $O_2$ % (% / min)	Tauchzeit (min)
0,50	0,00	Unbegrenzt	1,30	0,56	179
0,60	0,14	714	1,35	0,61	160
0,70	0,18	556	1,40	0,65	154
0,80	0,22	455	1,45	0,73	136
0,90	0,28	357	1,50	0,83	120
1,00	0,33	303	1,55	1,18	87
1,10	0,42	238	1,60	2,22	45
1,20	0,47	213	1,65	6,25	16

Erholungszeit [std./min]	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00
Multiplikator	0,8	0,63	0,5	0,4	0,31	0,25
Erholungszeit [std./min]	3:30	4:00	4:30	5:00	6:00	9:00
Multiplikator	0,2	0,16	0,13	0,1	0,06	0

Die Tabellen zeigen die einzelnen Sauerstoffpartialdrücke mit den dazu gehörigen Tauchzeiten und der Sauerstoffbelastung (CNS), sowie Erholungszeit und Multiplikationsfaktor.

3,8 Metern an. Ein Sauerstoffanteil von 76 % im Atembeutel wird in der folgenden Berechnung zugrunde gelegt. Zunächst wird der Sauerstoffpartialdruck ( $pO_2$ ) berechnet.

$$pO_2 \text{ (bar)} = 0,76 \text{ bar} \cdot \left[ \frac{3,8\text{m}}{10\text{m}} + 1\text{m} \right] = 1,048 \text{ bar}$$

$$pO_2 = 1,048 \text{ bar}$$

Der  $pO_2$  von 1,048 bar wird auf 1,1 bar aufgerundet. Das entspricht genau einer CNS/ZNS-Belastung von 0,42 % pro Minute. Bei 50 Minuten Tauchzeit entspricht das einer Sauerstoffbelastung von 21 % (0,24 %  $O_2$  pro Minute x 50 Minuten Tauchzeit = 21 %  $O_2$ -ZNS-Belastung). Nach zwei Stunden Oberflächenpause, die dem Multiplikator 0,4 (Tabelle Oberflächenpause) entspricht, soll der nächste Tauchgang durchgeführt werden. Die Sauerstoffrestbelastung beträgt 8,4 %

(21 %  $O_2$ -ZNS-Belastung x 0,4 = 8,4 %  $O_2$ -ZNS-Belastung). Der zweite Tauchgang wird auf einer Tiefe von 6 Metern durchgeführt und nach 65 Minuten beendet. Die Durchschnittstiefe beträgt 4,9 Meter.

$$pO_2 \text{ (bar)} = 0,76 \text{ bar} \cdot \left[ \frac{3,8\text{m}}{10\text{m}} + 1\text{m} \right] = 1,048 \text{ bar}$$

Der berechnete  $pO_2$  von 1,13 bar wird aufgerundet auf 1,2 bar  $pO_2$  und entspricht einer ZNS-Minutenbelastung von 0,47 %. Während des zweiten Tauchgangs wurden somit 65 Minuten x 0,47 %  $O_2$  aufgenommen.

$$65 \text{ Minuten} \cdot 0,47 \% O_2 = 30,55 \% O_2 \text{-ZNS-Belastung}$$

Addiert man die Sauerstoffbelastungen beider Tauchgänge zusammen, erhält man die Gesamtbelastung.

- aufmerks !!!*
- 1. Tauchgang 8,40 O<sub>2</sub>-ZNS-Belastung
  - 2. Tauchgang 30,55 O<sub>2</sub>-ZNS-Belastung
  - Gesamtbel. 38,95 O<sub>2</sub>-ZNS-Belastung

Bei den Tauchgängen ergibt sich eine ZNS-Belastung von 38,95 % O<sub>2</sub>. Die O<sub>2</sub>-Belastung sollte innerhalb von 24 Stunden eine 100%ige Sauerstoffaufsättigung nicht überschreiten, um eine Vergiftung mit Sauerstoff zu vermeiden und einem Krampf entgegenzuwirken. Das Tauchen im Allgemeinen und insbesondere das O<sub>2</sub>-Kreislauftauchen haben sich erst in jüngerer Zeit als Sportart etabliert. Sowohl die wissenschaftlichen als auch die medizinischen Erkenntnisse zum Thema O<sub>2</sub>-Kreislauftauchen beruhen zum großen Teil auf Arbeiten des englischen Wissenschaftlers Ken Donald. Im Auftrag der britischen Royal Navy führte Donald 1942 Untersuchungen zum Auftreten von Sauerstoffvergiftungen durch. Er baute dabei auf den Arbeiten von J.B.S. Haldane (Sohn von John Scott Haldane) auf. Donalds besonderes Interesse galt der Sauerstofftoxizität bei tiefen Tauchgängen und bei Notausstiegen aus U-Booten. Die von Professor Ken Donald festgelegten Grenzwerte wurden für den zivilen Sporttauchbereich konservativer ausgelegt und haben bis heute ihre Gültigkeit.

**Sauerstoffverbrauchskalkulation**

Bei den Herstellerangaben zur möglichen Einsatzdauer eines Gerätes handelt es sich um Idealwerte, die in der Praxis kaum jemals erreicht werden. Für den Taucher ist es interessant zu wissen, wie lange er mit einem vorhandenen Restdruck noch tauchen kann. Mit einer Hilfsberechnung kann man sich schnell weiter-

helfen. Hierzu wird angenommen, dass der Mensch im Normalzustand rund 15l/min Atemgas ventiliert. Man bezeichnet diesen Verbrauch auch als Atemminutenvolumen (AMV). Dabei veratmet er 0,6 Liter reinen Sauerstoffs (4 Volumenprozent aus der Atemluft). Der Verbrauch steigt bei mittleren Anstrengungen auf ein Atemminutenvolumen von 30 Liter pro Minute mit der Veratmung von 1,2 Litern Sauerstoff. Bei Tauchgängen mit körperlicher Belastung kann es zu einem AMV von 70 l/min kommen. Dabei werden 2,8 Liter reinen Sauerstoffs aus der Umgebungsluft aufgenommen. In der nun folgenden Verbrauchskalkulation werden die Werte 1,2 und 2,8 Liter Sauerstoff pro Minute mit einem Sicherheitszuschlag versehen. Bei leichten Arbeiten und normalem Tauchen werden 1,5 Liter und bei schwerer körperlicher Arbeit drei Liter Sauerstoff pro Minute kalkuliert. Eine 1,5 Liter-Vorratsflasche mit Sauerstoff bei 200 bar Fülldruck enthält 300 bar Liter O<sub>2</sub>. Bei normaler Tauchaktivität mit einem Sauerstoffbedarf von 1,5 l/min reichen die 300 Liter Atemgas einschließlich Reserve für ca. 200 Minuten. Als Faustregel kann man bei normalen Tauchgängen einen Verbrauch von ca. 1 bar Flaschendruck pro Minute kalkulieren. Bei körperlich anstrengender Arbeitsleistung ist mit einem Verbrauch von 2 bar pro Minute zu rechnen. Natürlich ist dies nur ein grober Anhaltspunkt, der von der Flaschengröße abhängt. Sauerstoffgerätetaucher rechnen mit einem Restdruck von 20 bar. Bei offenen Systemen werden hingegen 50 bar als Reservedruck zurückgehalten.

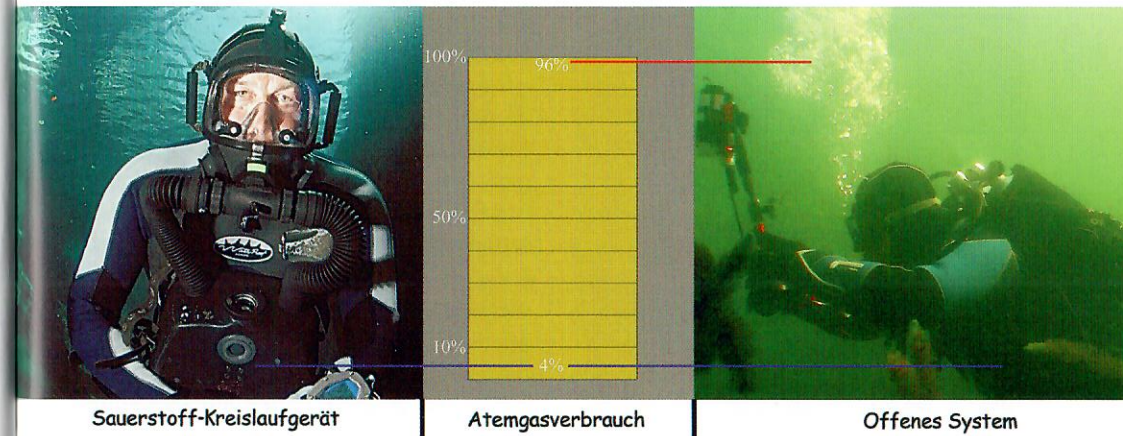
Aufgrund der vorherigen Betrachtung stellt sich die Frage, warum beim Sauerstoffkreislauftauchen ein erheblich gerin-

Atemminutenvolumen [Liter/Minute]	15	25	30	45	60	70
Sauerstoffaufnahme [Liter/Minute]	0,6	1	1,2	1,8	2,4	2,8
Grobwert	1,5 Liter/Minute			3 Liter/Minute		

Die Tabelle zeigt das Atemminutenvolumen in Abhängigkeit von der Sauerstoffaufnahme.

gerer Reservefülldruck ausreicht, obwohl es sich hier um Flaschengrößen handelt, die deutlich unter denen offener Systeme liegen. Der Grund liegt in der unterschiedlichen Gasausnutzung. Beim offenen System steigt mit zunehmender Tiefe der Gasverbrauch. Dieses Phänomen kann mit dem Boyle-Mariotte-Gesetz erklärt werden. Das Volumen eines idealen Gases verhält sich umgekehrt proportional zum Umgebungsdruck. Das bedeutet, dass unsere Lunge in 10 Meter Tiefe und einem Umgebungsdruck von 2 bar nur noch die Hälfte ihres ursprünglichen Volumens ausfüllt. In 20 Meter Tiefe (3 bar) beträgt das Volumen nur noch ein Drittel. Beim Gerätetauchen reagiert der Lungenautomat auf den Druckanstieg und liefert eine erhöhte Gas-

menge um das Volumen der Lunge immer auf gleichem Niveau zu halten. Die veratmete Luftmenge von 6 Litern pro Minute an der Oberfläche steigt auf 18 l/min in 20 Meter Wassertiefe an. Dabei verbraucht der Organismus lediglich die physiologisch benötigte Sauerstoffmenge von 4 %. Ein erhöhter Bedarf wird durch eine Erhöhung der Atemfrequenz kompensiert und nicht durch eine erhöhte Nutzung aus dem bestehenden Sauerstoffanteil (21 %) im Atemgas. Bei jedem Atemvorgang werden somit lediglich 4 % Sauerstoff vom Körper verbraucht. Das restliche Atemgas wird in die Umgebung abgegeben. Je tiefer getaucht wird, desto uneffizienter ist daher die Gasausnutzung in offenen Systemen.



Die Bilder zeigen die unterschiedliche Gasausnutzung eines offenen Presslufttauchgerätes im Vergleich zu einem geschlossenen Sauerstoff-Kreislaufgerät.



Gay-Lussac.

In einem Kreislaufsystem wird lediglich der vom Körper benötigte Sauerstoff verbraucht. Das Restgas wird nach der  $\text{CO}_2$ -Absorption in dem Kalkbehälter wieder dem Atemkreislauf zugeführt. Aus diesem Grund ist die Gasausnutzung bei voll geschlossenen Systemen am effektivsten. Wie im Bereich der offenen Tauchsyste- me unterliegen auch die Sauerstofffla- schen bei einer Erwärmung den Druck- änderungen. Aufgrund der geringeren Flaschengröße und der daraus resultie- renden nutzbaren Gasmenge bei sinken- den Temperaturen ergeben sich kürzere Tauchzeiten. Dies soll an einem Beispiel gezeigt werden:

Eine Sauerstoffvorratsflasche zeigt bei  $24\text{ }^\circ\text{C}$  einen Flaschendruck von 80 bar. Um den Fülldruck dieser Flasche bei  $7\text{ }^\circ\text{C}$  zu berechnen, benötigen wir das Gesetz von Gay-Lussac.

Der französische Chemiker und Physiker (1778 bis 1850) beobachtete, dass bei einem konstanten Volumen eines idealen Gases ein Zusammenhang zwischen dem Druck und der Temperatur besteht:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Um die Druckänderungen in unserem Bei- spiel zu berechnen, müssen die Tempe- raturen in Kelvin (K) umgerechnet wer- den [ $T\text{ (K)} = 273\text{ K} + T\text{ (}^\circ\text{C)}$ ].

$$T_1 = (273\text{ K} + 24\text{ }^\circ\text{C}) = 297\text{ K}$$

$$T_2 = (273\text{ K} + 7\text{ }^\circ\text{C}) = 280\text{ K}$$

Werden nun die Zahlen in die Gleichung von Gay-Lussac eingesetzt und die Gleichung nach  $p_2$  aufgelöst, so erhalten wir 75 bar.

$$p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$p_2 = 80\text{ bar} \cdot \frac{280\text{ K}}{297\text{ K}} = 75\text{ bar}$$

Der Druck sinkt um 5 bar. Das entspricht einer ungefähren Tauchzeit von 5 Minu- ten.

### Instrumente, die zum Tauchen benötigt werden

Wie bereits beschrieben, stellen beim Sauerstoff-Kreislauftauchen der Sauer- stoffpartialdruck und die Expositions- dauer die limitierenden Faktoren dar. Aus diesem Grund benötigt der Taucher als Mindestausrüstung einen Tiefenmesser und eine Uhr. Bei Tiefenmessern kann man zwischen mechanischen, elektri- schen und Kapillartiefenmessern wählen. Für das Sauerstofftauchen sind spezielle mechanische Tiefenmesser mit einer gro- ßen Skalierung und einer maximalen Tie- fenangabe zwischen 16 und 18 Metern entwickelt worden. Durch die Spreizung der Skala ist eine genaue Tiefenbestim- mung möglich. Die aus dem Sporttauch- bereich verschwundenen Kapillartiefen-



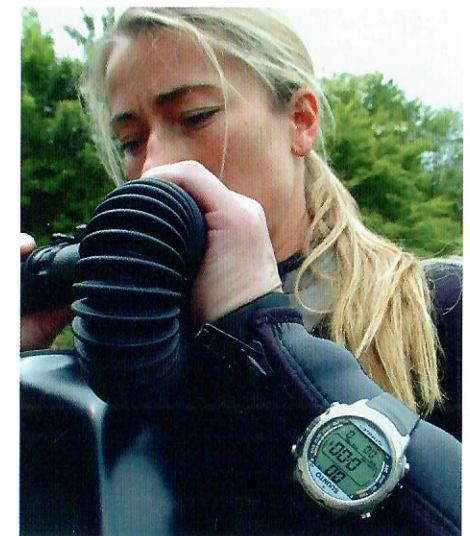
Klassische Variante mit Uhr und mechani- schem Tiefenmesser.

messer wären für den Einsatz mit Sauer- stoff-Kreislaufgeräten besonders gut ge- eignet, da sie im Flachwasserbereich (bis neun Meter) eine hohe Präzision aufwei- sen. In diesen wird eine Luftblase in einer Kapillare durch den Wasserdruck bewegt.

Bei der Wahl der Uhr kommt es auf den persönlichen Geschmack und die Vorlie- ben an. Vom digitalen Zeitmesser mit Start-, Stoppfunktion bis zur Analoguhr mit Drehlunette ist das Angebot sehr weit gestreut.

Viele Taucher nutzen Tauchcomputer, bei denen Tiefenmesser und Zeitfunktion in einem Gehäuse vereint sind. Ein Vor- teil dieser Geräte besteht in der Mög- lichkeit, sich die Durchschnittstauchtiefe anzeigen zu lassen. Damit ist eine exakte Berechnung der Sauerstoffbelastung möglich. Neuere Tauchcomputer sind in der Lage, nach Eingabe des in der Gegen-

lung befindlichen Sauerstoffanteils (%) die ZNS-Belastung eines Tauchgangs zu berechnen und den Sauerstoffpartial- druck anzuzeigen. Ist der Taucher nicht in der Lage den genauen Sauerstoffanteil in der Gegenlung zu bestimmen, muss der Wert von 100 %  $\text{O}_2$  in den Computer ein- gegeben werden, um den Tauchgang sicher durchführen zu können. Eine an- dere Möglichkeit besteht in der Verwend- ung von Tauchcomputern mit einem Sensor, der in die Gegenlung eingebaut wird. Dieser misst den aktuell im Atem- beutel befindlichen Sauerstoffanteil und zeigt die sauerstoffrelevanten Daten an. Einige Taucher verwenden Geräteträger, an denen sie die Standardinstrumente und einen Tauchcomputer anbringen. Vorteil ist die geringe Größe des Sys- tems. Ähnliche Systeme werden von mili- tärischen Einheiten verwendet. Diese nutzen Navigationsbords, die einen Kom- pass, einen Tiefenmesser und eine Uhr



Immer größerer Beliebtheit erfreuen sich Tauchcomputer. Sie ermöglichen die Berech- nung des gesamten Tauchgangs.



Selbstbau eines Instrumententrägers mit Tiefenmesser, Kompass und Computer. Auf der Rückseite ist ein Tauchermesser befestigt.



Von links nach rechts: Tauchcomputer, manueller Tiefenmesser, Kapillartiefenmesser. Darunter ein militärisches Navigationsbord mit Tiefenmesser bis maximal 16 Meter, Uhr und ein Kompass.

integrieren. Für welches System sich der Taucher letztlich entscheidet, bleibt ihm selbst überlassen.

## Tauchgangsnachbereitung

### 1. Demontage des Gerätes

Auch hier sollte man sich wie beim Zusammenbau Zeit lassen. Beim Demontieren des Tauchgerätes ist auf Defekte, Risse oder ggf. gelöste Verbindungen zu achten.

### 2. Kalk

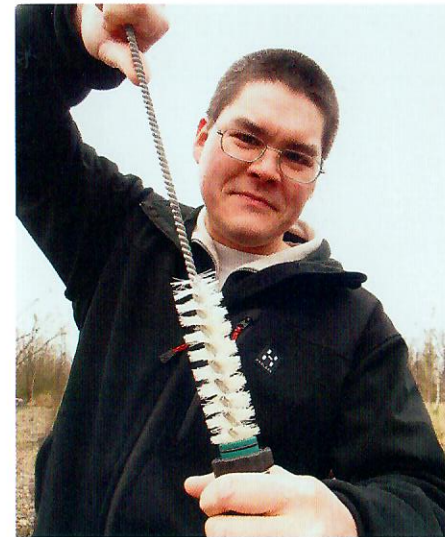
Der Atemkalk in der Kalkpatrone reicht im Normalfall für den Tauchbetrieb mit einer gefüllten Vorratsflasche. Sollte sich nach dem Tauchgang noch Restgas in der Flasche befinden, kann der Atemkalk für weitere Tauchgänge mit dem Restgas innerhalb von vier Tagen genutzt werden. Die Wasserfallen sind direkt nach dem durchgeführten Tauchgang zu entleeren. Bei Wassereintrich muss der Kalk sofort gewechselt werden, auch wenn das Ende der Standzeit noch nicht erreicht ist.

### 3. Reinigung

Nach einem Tauchgang müssen alle Bauteile mit klarem Wasser gespült und an einem sonnengeschützten und gut belüfteten Ort getrocknet werden. In regelmäßigen Abständen empfiehlt sich eine Desinfektion von Atembeutel, Schläuchen mit Mundstück und Kalkpatrone. Für die Desinfektion des Kreislaufsystems sind spezielle Reinigungsmittel erhältlich.

### 4. Lagerung

Die ideale Lagerstelle für die Schläuche und Beutel des Kreislaufgerätes ist ein gut temperierter und trockener Kellerraum. Wer auf andere Aufbewahrungsmöglich-



Atemschläuche lassen sich sehr gut mit einer Flaschenbürste reinigen, da man mit ihr auch die Zwischenräume erreicht.

keiten zurückgreifen muss, sollte auf eine Lagerung achten, bei der keine allzu großen Temperaturschwankungen (15–20 °C) auftreten. Damit wird Kondenswasserbildung vermieden, die einen guten Nährboden für Pilze und Bakterien darstellt. Alle Teile sollten kanten- und knickfrei verstaut werden. Die Gummiteile sollten von Zeit zu Zeit mit Talkum gepflegt werden.



Taucherin beim Einspülen in das System.

\* bei reinem O<sub>2</sub> in 16 m (≙ 2,4 bar abs.) absolut unrealistisch, nur 60% O<sub>2</sub> im Beutel

### 11. Besonderheiten beim Tauchen mit Sauerstoff

$0,8 * 0,76 = 0,6$  \*)

#### Bergseetauchen

Beim Tauchen mit Pressluft und Mischgas, wie NITROX, ist das Tauchen in großen Höhen nicht mit normalen Tauchtabellen möglich. Durch den reduzierten Luftdruck verschieben sich die geltenden Tiefengrenzen. Das Problem besteht in den verwendeten Inertgasen Stickstoff oder Helium. Beim Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten gehen wir von einem 76 %igen Sauerstoffanteil im Atembeutel aus. Dem verbleibenden Stickstoff (24 % N<sub>2</sub>) kommt eine untergeordnete Bedeutung zu. Bei einem Tauchgang auf Meereshöhe mit einem Sauerstoffrebreather und 76 % O<sub>2</sub> im Atembeutel erreichen wir einen Partialdruck von 1,6 bar auf einer Tauchtiefe von ca. 11 Metern. Betrachtet man einen Tauchgang in 2000 Meter Höhe über dem Meeresspiegel, so muss die Abnahme des Umgebungsdrucks in der jeweiligen Höhe berücksichtigt werden. Als Faustformel gilt, dass sich der Luftdruck pro 1000 Höhenmetern um rund 0,1 bar senkt. Die Luftdruckabnahme, in unserem Beispiel auf 2000 m, beträgt somit 0,2 bar (Umgebungsdruck = 0,8 bar). Als Beispiel wird die maximale Tauchtiefe (max. 1,6 bar pO<sub>2</sub>) bei einem Sauerstoffgehalt von 76 % in der Gegenlunge in einer Höhe von 2000 Meter berechnet: Im Gegensatz zum prozentualen Sauerstoffanteil in der Gegenlunge (76 % O<sub>2</sub>) ändert sich der Sauerstoffpartialdruck in 2000 Meter Höhe.

1 bar (Meereshöhe)	= 0,76 pO <sub>2</sub>
	(Gegenlunge)
0,8 bar (2000 m Höhe) = ?	

Wird der Sauerstoffpartialdruck in der Gegenlunge (F<sub>i</sub>O<sub>2</sub>) auf den Umgebungsdruck bezogen (0,8 bar), so erhält man einen pO<sub>2</sub> von 0,608 bar. Setzt man diesen Wert in die Formel für die maximale Tauchtiefe ein, so errechnet man eine maximale Tauchtiefe von 16,3 m bei einem maximalen PO<sub>2</sub> von 1,6 bar in der Gegenlunge auf einer Höhe von 2000 m (0,8 bar).

$$T_{\max} = 10 \text{ m} \cdot \left[ \frac{pO_2 \text{ max (bar)}}{F_i O_2 \text{ (bar)}} - 1 \text{ m} \right]$$

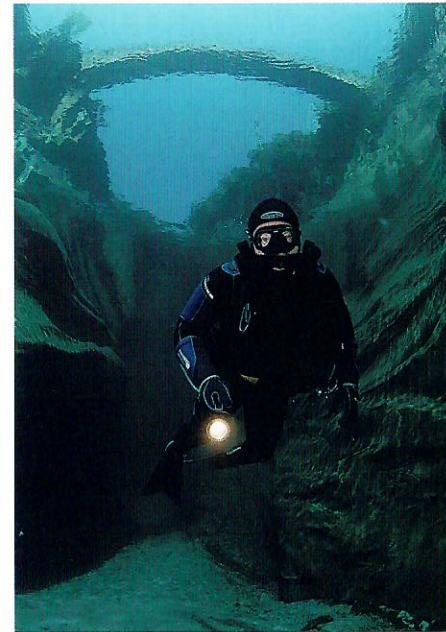
$$T_{\max} = 10 \text{ m} \cdot \left[ \frac{1,6 \text{ bar}}{0,6 \text{ bar}} - 1 \text{ m} \right]$$

$$T_{\max} = 16,3 \text{ m}$$

Es ist zu bedenken, dass nach einem Aufstieg zum Bergsee eine verstärkte Ausspülung von Stickstoff durch den veränderten Partialdruck stattfindet. Er sammelt sich im Atemkreislauf und muss durch zusätzliche Spülvorgänge abgeatmet werden.

#### Kontrollverlust der Gesichtsmuskulatur

Jeder der häufig in kalten Gewässern taucht, kann das Phänomen des Kontrollverlustes der Gesichtsmuskulatur im



Der Fluss Verzasca in der Schweiz bietet gute Bedingungen für Fotografen.

Bereich der Lippen bei Tauchgängen mit Sauerstoff beobachten. Insbesondere Kampfschwimmer, die recht häufig in sehr kalten Gewässern tauchen, kennen dieses Problem. Atemgas entweicht über die Lippen am Mundstück. Der Taucher hat dabei kaum eine Möglichkeit das Entweichen des Atemgases aus den Mundwinkeln zu verhindern. Für dieses Problem konnten bisher keine wissenschaftlichen Erklärungen gefunden werden. Wahrscheinlich ist aber, dass dieses Phänomen durch eine Kombination verschiedener Faktoren hervorgerufen wird, da es fast nur in kaltem Wasser und nach häufigen und langen Sauerstoffexpositionszeiten beobachtet werden konnte. Ebenso tritt dieser Fall gehäuft auf, wenn über einen längeren Zeitraum nicht mit Sauerstoff getaucht und im Anschluss eine längere Expositionszeit unter Wasser

absolviert wurde. Sicher ist, dass hohe Sauerstoffpartialdrücke zu einer »Engstellung« der Gefäße in der Muskulatur führen. Wird diese zusätzlich mit kaltem Wasser belastet, so kann eine Erlahmung der Lippenmuskulatur eintreten. Presst man das Mundstück mit der Hand auf Unter- und Oberlippe so kann der Gasaustritt aus den Mundwinkeln unterbunden werden. Auch das Massieren der Lippen nach dem Herausnehmen des Mundstücks lindert die oben genannten Symptome.

#### Mittelohrbarotrauma durch erhöhte Sauerstoffkonzentration

Das Ohr wird aufgrund der Anatomie in drei Abschnitte unterteilt: das Außenohr, das Mittelohr und das Innenohr. Das Mittelohr, ein luftgefüllter Hohlraum, ist durch das Trommelfell vom Außenohr luft- und wasserdicht abgetrennt. Durch die Ohrtrumpete (Eustachische Röhre) steht das Mittelohr mit dem Nasenraum in Verbindung und wird auf diesem Weg z. B. bei Kau- und Kieferbewegungen in regelmäßigen Abständen belüftet. Diese Belüftung ist nötig um den geringen Volumenverlust auszugleichen, der durch das Metabolisieren von Sauerstoff durch das Gewebe im Mittelohr entsteht. Die beim Tauchen entstehenden Druckdifferenzen müssen durch den Taucher aktiv ausgeglichen werden. Wird nun mit reinem Sauerstoff getaucht, so kommt es durch die Belüftung des Mittelohres während des Tauchgangs zum Ausspülen des Stickstoffs. Die Gasatmosphäre wird immer sauerstoffhaltiger. Während und kurz nach dem Tauchgang hat der Taucher dadurch im Regelfall keinerlei Beschwerden. Wird aber das Mittelohr nach dem

\* esentlich = 1,6 - 0,6 = 1,0 bar ...

Tauchgang nicht häufig genug belüftet und damit die Gasatmosphäre nicht mit dem Inertgas  $N_2$  angereichert, so metabolisiert das Gewebe den in hohen Konzentrationen vorhandenen Sauerstoff. Der entstehende Unterdruck kann zu einem Mittelohrbarotrauma führen, welches sich durch Schmerzen in den Ohren, eingeschränktes Hörvermögen, Schwindel und Übelkeit bemerkbar macht. Es wird daher empfohlen nach dem Tauchgang in Intervallen aktiv einen Druckaus-

gleich durchzuführen, um die Gasatmosphäre des Mittelohres wieder an die Umgebungsluft anzugleichen. Im Regelfall führt der Taucher unwillkürlich den Druckausgleich durch, um das durch den Unterdruck entstandene unangenehme Gefühl zu lindern. Interessant ist, dass ältere, erfahrene Sauerstofftaucher weit mehr mit dieser Problematik zu kämpfen haben. Diese schildern, dass die oben beschriebenen Symptome von Jahr zu Jahr immer deutlicher zu spüren sind.



Wenn keine Gasblasen die Sicht und Wasseroberfläche stören.

## 12. Sauerstoff-Umfüllanlagen

Die Füllung der Sauerstoffflasche wird wie bei Pressluftflaschen im Allgemeinen von einem Tauchsporthändler oder einer Tauchbasis übernommen. Probleme kann es geben, wenn zum Beispiel eine Urlaubsreise an einen Ort geplant wird, an dem das Befüllen der Flaschen nicht möglich ist. In diesem Fall kann mittels Überströmtechnik die Einsatzflasche aus einer großen Vorratsflasche gefüllt werden. Bei diesem Verfahren strömt das Gas der Vorratsflasche durch einen Überströmschlauch in die leere Flasche des Kreislaufgerätes, bis ein Druckausgleich zwischen beiden Flaschen besteht.

Herrscht z. B. in einer 10 Liter-Vorratsflasche ein Druck von 150 bar, so enthalten nach dem Überströmen in eine 2 Liter-Flasche beide Druckbehälter nur 125 bar. Um einen Druck von 200 bar in der 2 Liter-Flasche zu erreichen, muss der Sauerstoff der Vorratsflasche in die Geräteflasche durch eine Sauerstoff-Umfüllpumpe umgepumpt werden. Dabei können auch kleine Sauerstoffrestmengen genutzt werden. Man unterscheidet dabei handbetriebene, elektrische und pneumatische Umfüllpumpen. Diese werden nicht nur beim Tauchen eingesetzt, sondern auch überall dort, wo komprimierter Sauerstoff benötigt wird (z. B. beim Bergsteigen in großer Höhe).

### Handbetriebene Sauerstoff-Umfüllpumpe

Die klassische Methode Sauerstoff zu verdichten besteht im Einsatz einer manuell

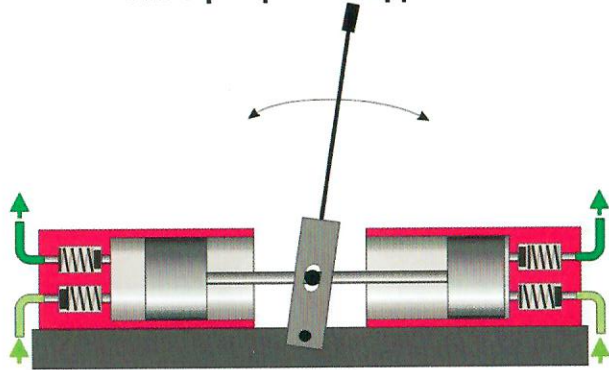


Der Überströmschlauch ist mit einem Digitalmanometer, Nadelventil und einem Rückschlagventil ausgestattet. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten Überströmschläuchen aus gewebeummantelten Kunststoffschläuchen wurde hier ein flexibler Edelstahlringwellschlauch verwendet, der gegenüber Sauerstoff inert ist.

betriebenen Sauerstoff-Umfüllpumpe. Es handelt sich dabei um eine einstufig doppelt wirkende Pumpe. Mit jedem Pumpvorgang am Handhebel des Gerätes wird der Sauerstoff aus den Vorratsflaschen gesaugt und durch Druckleitungen in den Wasserabscheider und die Trockenpatrone geleitet. Das getrocknete Gas wird danach verdichtet und in die Druckleitung gepresst. Dieser Vorgang wiederholt sich bei jedem Hub.

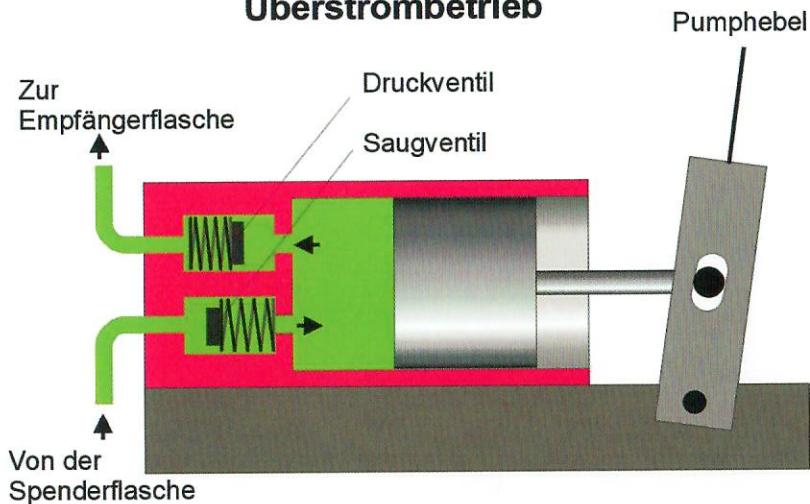
Je nach Gerätehersteller sind die Häufigkeit einer Wartung der Anlage und der Austausch der Trockenpatrone verschieden. Pumpen älterer Bauart müssen an

**Vereinfachtes Funktionsprinzip einer Sauerstoff-Umfüllpumpe mit Doppelkolben**



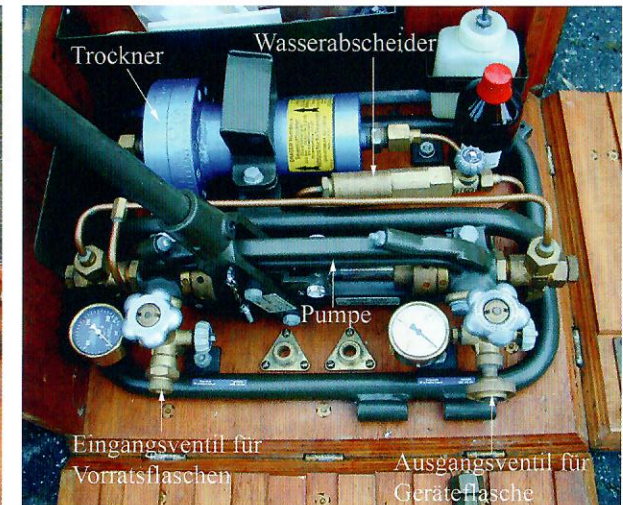
Beide Kolben arbeiten wechselseitig auf die gleiche Empfängerflasche  
Maximale Druckerhöhung 1 : 4

**Überströmbetrieb**



Ist der Druck in der Spenderflasche höher als in der Empfängerflasche, öffnen Saug- und Druckventil, der Sauerstoff strömt über, danach schließen die Ventile durch Federdruck. Beim Pumpbetrieb öffnen die Ventile wechselseitig.

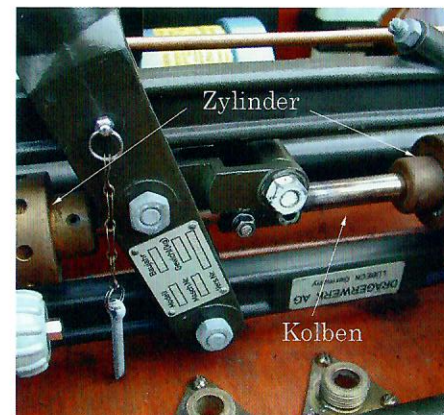
Funktionsprinzip einer Handumfüllpumpe.



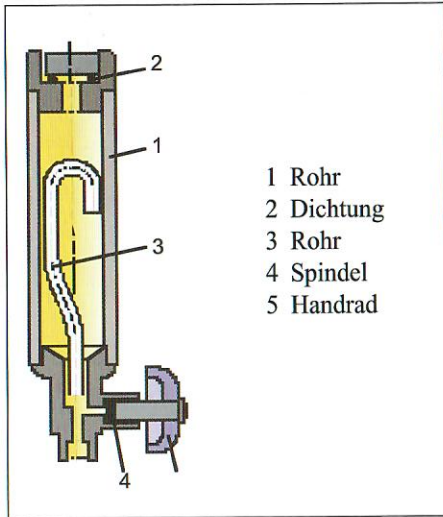
Dräger Sauerstoff-Handumfüllpumpe Model Uh 2 T. Ein stabiler Holzkasten ist Basis und Schutz des Gerätes. Die Außenabmessungen der Kiste mit der Pumpe betragen 60 cm Länge, 50 cm Breite und 30 cm Höhe.

den Manschetten, in denen sich die Druckkolben bewegen, mit einem Glycerin-Wassergemisch (1:4) geschmiert werden, um eine Überhitzung und erhöhte mechanische Abnutzung der Dichtungen

zu vermeiden. Das oben gezeigte Bild stellt eine ältere Sauerstoff-Handumfüllpumpe des Typs Uh 2 T der Firma Dräger da.

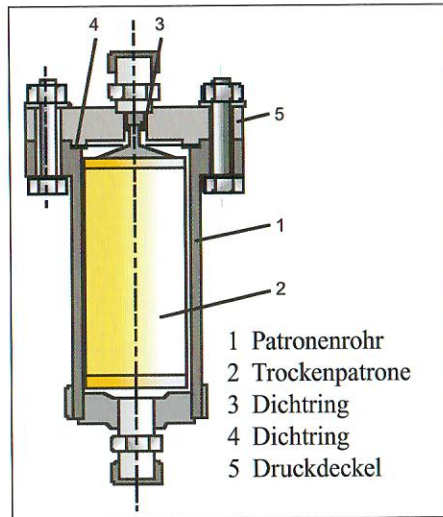


Gut zu erkennen ist die Kolbenstange mit den beiden Zylindern.



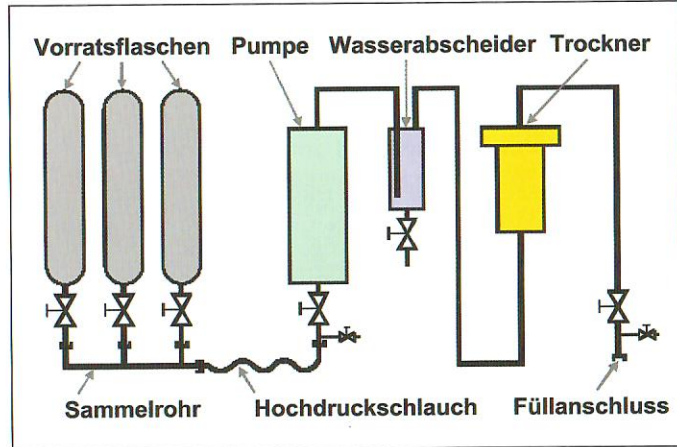
- 1 Rohr
- 2 Dichtung
- 3 Rohr
- 4 Spindel
- 5 Handrad

Schematische Zeichnung des Wasserabscheiders.



- 1 Patronenrohr
- 2 Trockenpatrone
- 3 Dichttring
- 4 Dichttring
- 5 Druckdeckel

Schematische Zeichnung einer Trockenpatrone.



Schematische Darstellung des Rohrleitungsschaltplanes der Umfüllanlage Uh 2 T.

Direkt hinter dem Abscheider befindet sich der O<sub>2</sub>-Hochdrucktrockner. Er setzt den verbleibenden, dampfförmigen Wasseranteil herunter. Ein Trockenmittel aus

hochaktiven K-C-Perlen ist patroniert in das Gehäuse eingebaut. Neuere Modelle kommen ohne zusätzliche Schmierung durch den Nutzer aus.



Der Dräger Oxygen Booster DOB-H ist klein, effektiv, leicht und sicher. H steht für Handbetrieb.

### Elektrische Sauerstoff-Umfüllpumpe

Wer nicht mit Muskelkraft arbeiten möchte, kann einen Elektromotor für sich arbeiten lassen, der die Sauerstoffumfüllpumpe antreibt.

### Boosterpumpen

Eine weitere Möglichkeit Sauerstoff aus Vorratsflaschen umzufüllen und zu verdichten, besteht in der Verwendung von Boosterpumpen. Die Pumpentechnik beruht auf einem pneumatischen Antrieb. Letztendlich ersetzt komprimierte Luft (Antriebsgas) den Elektro- oder Benzinmotor.



Dräger Sauerstoff-Umfüllstation DOB-M-T. Die Dräger Oxygen Booster DOB-M (mobile Version) und DOB-T (Tischversion) sind Sauerstoff-Umfüllstationen zum Umfüllen von Sauerstoff aus Vorratsflaschen PN 200 bar in Geräteflaschen. Bei dem Füllvorgang können bis zu vier Geräteflaschen gleichzeitig befüllt werden.



Das Bild zeigt den Rob rebreather-oxygen-booster der Firma Mavotec. Dieser besticht durch seine kompakte Bauart, durch sein geringes Gewicht (3,6 kg) und die Möglichkeit Sauerstoff bis zu 300 bar zu komprimieren.

## 13. Tauchausbildung

Zum sicheren Umgang mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten gehört nicht nur das theoretische Wissen über die Technik und deren Besonderheiten, sondern eine fundierte praktische Ausbildung. In diesem Bereich existieren durch die unterschiedlichen Ausbildungsorganisationen verschiedene Möglichkeiten, einem Kreislaufgeräte-Tauchanfänger die ersten Schritte zu vermitteln. Im Folgenden wird versucht in einem modularen System die einzelnen Ausbildungsschritte im Hallenbad und im Freiwasser aufzuzeigen. Dabei orientiert sich der Ablauf an den Lernerfolgen der Taucher und geht von leichten zu schwerer werdenden Übungsabfolgen.

### Modul I

#### Praktische Ausbildung am Gerät

- ▶ Zerlegen eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes
- ▶ Vorbereiten des Gerätes für einen Tauchgang
- ▶ Anlegen und Einstellen des Tauchgerätes
- ▶ Funktion des Schiebers am Mundstück
- ▶ Spülen des Atemkreislaufs
- ▶ Atmen unter Wasser
- ▶ Grundlagenübungen mit Sauerstoff-Kreislauf-Tauchgeräten

**Zerlegen eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes**  
Aufgrund der Vielzahl der auf dem Markt verfügbaren Sauerstoff-Kreislaufgeräten



Casoro 96 Pro ohne Außenhülle (softpack).

und deren unterschiedlicher Bauarten sind die einzelnen Arbeitsvorgänge zum Teil verschieden. Wir wollen exemplarisch an dem italienischen Gerät Casoro 96 Pro der Firma OMG die einzelnen Baugruppen zerlegen und das Zusammenwirken beschreiben.

Vor dem Zerlegen eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes sollte eine Sichtprüfung erfolgen. Diese umfasst sowohl das eigentliche Kreislaufsystem als auch die Trageeinrichtung. Dabei ist auf mechanisch verursachte Einwirkungen oder Beschädigungen zu achten. Nach der Sichtprüfung beginnt die Demontage des Gerätes. Dabei wird zuerst die Schlauchgarnitur, bestehend aus Mundstück mit Schieber und den beiden Schläuchen von der Verschraubung des Gerätes gelöst.



Zu sehen ist die Deckelplatte des Casoro 96 pro mit den farblich markierten Anschlüssen für die Atemschlauchgarnitur.

Danach wird das Mundstück von den Schläuchen getrennt.

Eine Besonderheit bei diesem Kreislaufgerät stellt die Befestigung der Atemkalkpatrone im Atembeutel dar. Zum Ausbau des Absorberbehälters wird zunächst die Deckelplatte abgeschraubt. Im Anschluss wird der Kalkbehälter aus dem Atembeutel entnommen.

Zur Aufnahme von durch Atmung oder eingedrungenes Wasser entstandenen Kondensats ist ein Fleece in das Gerät eingesetzt. Der Stoff soll die Flüssigkeit auf-



Das besondere beim Casoro 96 pro ist, dass die Kalkpatrone innerhalb des Atembeutels liegt.



Das Fleece besteht aus einem besonders saugfähigen Material.



Die unter dem Atembeutel befindliche Sauerstoffflasche wird von der Schlauchverbindung gelöst.

nehmen und binden. Das Fleece wird zur Reinigung und zum Trocknen entnommen.

#### Vorbereiten des Gerätes für einen Tauchgang

Nachdem man durch die Demontage bereits den Umgang mit den einzelnen Baugruppen erlernt hat, wird das Gerät für einen Tauchgang vorbereitet. Dabei sind die zum Einsatz kommenden Kreislaufgeräte im Normalfall zur guten Belüftung und Lagerung demontiert. Beim Zusammenbau und den dabei durchzuführenden Dichtigkeitsüberprüfungen wird nicht

mehr auf alle Abfolgen eingegangen, da einige bereits im Kapitel »Tauchen mit Sauerstoff-Kreislaufgeräten« ausführlich beschrieben wurden. Zunächst erfolgt die Überprüfung des Flaschenfülldruckes. Im Anschluss wird mit dem Sauerstoffmessgerät die Reinheit des Atemgases ermittelt. Als Nächstes folgt die Vorbereitung der Atemkalkpatrone. Neben der Verwendung von Atemkalk, der für Sauerstoff-Kreislaufgeräte zugelassen ist, muss auf die richtige Verdichtung im Kalkbehälter geachtet werden. Bei der Verwendung von Atemkalk-Restmengen sollte darauf geachtet werden, dass möglichst kein Atemkalkstaub in den Behälter gelangt. Nachdem der Atemkalkbehälter verschraubt ist, erfolgt eine Dichtigkeitsüberprüfung, die man jedoch beim Castoro 96 pro nicht durchführen kann. Nun erfolgt der Einbau in den Atembeutel und in das Trägergehäuse des Gerätes. Abschließend wird der Verschlussdeckel mit der Kalkpatrone und dem Atembeutel verschraubt. Die Montage der Atemschlauchgarnitur beinhaltet die Sichtprüfung der einzelnen Bauteile und die Verschraubung der farblich unterschiedlich markierten Gewinde. Nach erfolgreicher Überprüfung der Richtungsventile (Wagentest und Knutschflecktest) wird die Atemschlauchgarnitur mit dem Trägergehäuse verschraubt. Die Komplettierung des Kreislaufgerätes erfolgt durch Montage der Sauerstoffflasche an den Druckminderer.

Im Anschluss werden Unter- und Überdrucktests durchgeführt.

### **Anlegen und Einstellen des Tauchgeräts**

Beim Anlegen der Ausrüstung orientieren wir uns an den Geräten, die vor der Brust getragen werden. Sie sind die Klassiker unter den Sauerstoff-Kreislaufgeräten.

Die bereits vom optischen Aspekt gewöhnungsbedürftige Trageweise erfordert ein gewisses Maß an Zeit um die individuelle Anpassung an den Taucher vorzunehmen. Wer das erste Mal mit einem Brustgerät abtaucht, sollte die Gurtlängen den Körperproportionen anpassen. Dies geschieht vernünftigerweise an Land und in der Nähe eines Tisches oder einer vergleichbaren Abstellmöglichkeit. In der Grundversion werden die Geräte mit einem Nacken- und einem Hüftgurt ausgeliefert. Der Nackengurt fixiert den Rebreather in seiner Höhenlage. Die Oberkante des Gehäuses sollte bei Männern in Höhe der Brustwarzen liegen. Der Hüftgurt fixiert das Gerät am Körper und sollte so stark angezogen werden, dass ein Verrutschen des Kreislaufgerätes nicht möglich ist. Wer seinen Sauerstoffrebreather rund 15 cm unter dem Halsansatz in der Höhe befestigt und recht



Die Taucherin stellt sich die Trägergurte vor dem Tauchgang richtig ein.

fest an den Körper schnallt, hat eine gute Grundeinstellung gewählt. Nach den ersten Tauchgängen verändert man die Position geringfügig, bis man den idealen Sitz herausgefunden hat.

Neben dem richtigen Sitz des Gerätes am Körper ist die notwendige Bleimenge zu ermitteln und zu testen. Diese ist optimal für den Tauchgang angepasst, wenn der Taucher mit einem tiefen Atemzug bis zu den Augen einsinkt. Dabei darf die Gegenlunge nicht gefüllt sein. Auf die Funktion des Schiebers am Mundstück wurde bereits im Kapitel Rebreather-Bauteile eingegangen. Anfänger und insbesondere Taucher, die bereits Erfahrung im Tauchen mit offenen Systemen gemacht haben, benötigen einige Zeit, um sich an das Schließen des Mundstückes zu gewöhnen, wenn es aus dem Mund genommen wird. Im Wasser kann ein nicht geschlossenes Mundstück zum Wassereintritt in das System führen. Das bedeutet das Ende eines Tauchgangs. Die meisten Schieber sind so konstruiert, dass der Stift des Schiebers am oberen Anschlag des Mundstückes steht, wenn das Mundstück geöffnet ist.

Weitaus problematischer als die Schieberbedienung ist für bereits erfahrene Presslufttaucher das Spülen des Systems. Sie sind es gewohnt aus der zweiten Stufe ihres Automaten ein- und auszuatmen. Beim Sauerstoff-Kreislaufgerät bewegt das Ein- und Ausatmen lediglich das Gas im Atemkreislauf. Der Sinn des Spülvorgangs besteht darin, den im Kreislauf zwischen Lunge und Atembeutel bestehenden Anteil an Stickstoff sowie Kohlendioxid auszuspülen. Aus diesem Grund atmet der Kreislaufgerätetaucher aus der Gegenlunge ein und durch die Nase in die Umgebung aus. Dieser Vorgang ist drei-

mal zu wiederholen. Danach sollte der Großteil an Stickstoff abgeatmet sein. Nach dem dritten Spülvorgang atmet der Taucher in den Atembeutel des Gerätes, somit durch den Mund in die Gegenlunge. Nach einigen Trockenübungen an der Oberfläche sollte das Spülen des Gerätes bei den ersten Tauchgängen mit dem Kopf unterhalb der Wasseroberfläche erfolgen. Dabei kann der Tauchpartner oder Tauchlehrer den richtigen Spülvorgang kontrollieren. Durch die Blasenbildung beim Ausatmen kann der Tauchanfänger sich selbst überprüfen. Auch beim Sauerstoff-Kreislauftauchen kann die Maske voll Wasser laufen. Aus diesem Grund werden einige Übungen zum Ausblasen der Maske durchgeführt. Zum Abschluss folgt im ersten Modul ein Tauchgang. Der Tauchanfänger sollte sich bemühen, einen ausgewogenen Atemrhythmus zu halten und nicht durch den Mund ein- und die Nase auszuatmen.

## **Modul II**

### **Praktischer Teil Hallenbad**

- ▶ Abtauchen
- ▶ Überprüfung während des Tauchgangs
- ▶ Spülen während des Tauchgangs
- ▶ Trier- und Schwebeübungen
- ▶ Auftauchen

### **Abtauchen**

Bewährt hat sich das Abtauchen nach festgelegten Abläufen. Ständige Wiederholungen von festgelegten standardisierten Abläufen (»Drill«) verschaffen Sicherheit und erleichtern das Tauchen mit anderen. Beim Abtauchen sollten die im Folgenden aufgezählten Punkte eingehalten werden.

**5-Punkte-Abstieg:**

1. Dem Tauchpartner das Zeichen zum Abtauchen geben
2. Absinken lassen
3. Den Druckausgleich durchführen
4. Orientieren
5. Die Zeit festhalten

**Überprüfung während des Tauchgangs**

Während des Tauchens sollte der Taucher auf fremdartige Geräusche seines Tauchgerätes achten. Diese könnten auf eine Fehlfunktion des Gerätes hindeuten. Erfahrende Kreislauf-Taucher hören kleinste Änderungen der Funktionsabläufe innerhalb des Gerätes. Sollten während des Tauchgangs Blasen am Kreislaufsystem austreten, so deutet dies auf Undichtigkeiten des Systems hin.



*Koordinationsübung, bei der die Tauchtiefe beibehalten werden muss und ein Abblasen des Sauerstoffs vermieden werden soll.*

**Spülen während des Tauchganges**

Ca. alle 30 Minuten sollte der Kreislauf gespült werden. Durch einmaliges Einatmen durch den Mund und Ausatmen durch die Nase wird der Stickstoffgehalt im Atemkreislauf gesenkt und der Sauerstoffanteil erhöht.

**Tarier- und Schwebübungen**

Ist die Grundeinstellung der Tarierung erreicht, kann die Feintarierung ausschließlich über die Abgabe von Sauerstoff durch die Nase bzw. durch tieferes Einatmen durchgeführt werden. Eine optimale Tarierung erreicht der Taucher durch kontinuierliches Üben.

**Auftauchen**

Besondere Aufmerksamkeit erfordert der Aufstieg. Das beim Auftauchvorgang expandierende Gas im Atemkreislauf muss bei militärischen Einsätzen aufgrund der taktischen Gegebenheiten abgeatmet werden, um keine Blasen ins Wasser



*Ruhe ist das Besondere beim blasenfreien Tauchen.*

abgeben zu müssen. Für zivile Kreislauf-Taucher ist dies ohne Bedeutung, da sie den Sauerstoff an die Umgebung abgeben können. Dadurch wird ein zu schnelles Auftauchen an die Oberfläche vermieden.

Der bereits beschriebene Spülvorgang im Abstand von 30 Minuten ist zwingend erforderlich, um beim Auftauchvorgang eine Ohnmacht durch Sauerstoffmangel zu verhindern. Um eine größere Sicherheit im Sporttauchbereich zu erreichen, wird ein zusätzlicher Spülvorgang vor dem Auftauchen empfohlen. Beim Auftauchen sollten die im Folgenden aufgezählten Punkte berücksichtigt werden.

**5-Punkte-Aufstieg:**

1. Dem Tauchpartner Zeichen zum Auftauchen geben
2. Langsam nach oben tauchen
3. Gerät abatmen
4. Tarierung überprüfen
5. Die Zeit festhalten

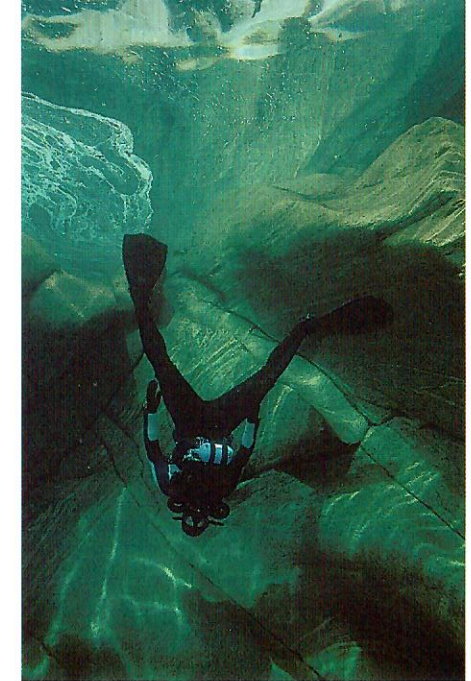
**Modul III**

**Praktischer Teil Hallenbad**

- ▶ Tauchen ohne Maske
- ▶ Tauchübungen

**Tauchen ohne Maske**

Als Grundübung sollte der Sauerstoff-Kreislauf-Taucher aus einem sicheren Stand am Hallenbadboden seine Maske abnehmen und atmen. Der vorhandene Reflex durch die Nase ausatmen zu wollen muss unterbunden werden. Wer bei der statischen Übung ausreichend Sicherheit gewonnen hat, führt diese Übung während des Tauchens durch. Dabei wird die Maske abgenommen ohne durch die



*Bei optimaler Tarierung kann im Kopfstand die Tiefe genau gehalten werden.*

Nase auszuatmen. Die Tarierhöhe sollte während dieser Übung nicht verändert werden.

**Tauchübungen**

Ein Sauerstoff-Kreislaufgerät zeigt ein völlig anderes Tauchverhalten als ein offenes System. Um sich damit vertraut zu machen und ggf. die letzten Ängste vor diesen Tauchgeräten zu verlieren, gibt es Übungen, die den Taucher im Umgang mit diesem Gerätetyp schulen.

**Kopfstand**

Der Taucher taucht kopfüber auf den Grund zu. Beim Atmen stellt er fest, dass eine Tarierung nicht möglich ist. Wer sich gut austariert hat, kann in dieser Position schweben ohne seine Tarierung zu verlieren.

**Tauchen in Rückenlage**

Das Tauchen in Rückenlage verdeutlicht die unterschiedlichen Druckverhältnisse beim Umgang mit Sauerstoff-Kreislauf-



Tauchen in Rückenlage.

geräten. Das auf der Brust getragene Tauchgerät und der darin befindliche Atembeutel sind in Rückenlage einem geringeren Druck ausgesetzt, als die Lunge des Tauchers. Das führt dazu, dass die Ausatmung leichter fällt als die Einatmung.

#### Korkenzieher

Bei dieser Übung werden die Arme in Tauchrichtung ausgestreckt und der Anfänger dreht sich in der Vorwärtsbewegung um seine eigene Achse. Wird diese Übung langsam durchgeführt, erfährt man die unterschiedlichen Druckdifferenzen zwischen Lunge und Gegenlunge. Die bereits beim Tauchen in Rückenlage beschriebene Atemcharakteristik wechselt sich mit der beim Tauchen in Bauchlage (leichte Einatmung, schwere Ausatmung) ab. Bei der Durchführung dieser

Übung kommt es darauf an, die Tauchtiefe einzuhalten.

#### Purzelbäume

Dieser Übungsabschnitt dient der Koordination unter Wasser. Dabei soll das Gefühl für die Bewegung mit dem Kreislaufgerät vermittelt werden. Diese Übung sollte sowohl vorwärts als auch rückwärts durchgeführt werden. Hierdurch gewinnt der Übende Vertrauen in sein Gerät und lernt ebenfalls die unterschiedlichen Druckdifferenzen kennen.

#### Gerät ablegen

Der Taucher legt sein Gerät am Grund ab, hält es dann in Schwimmrichtung vor sich und taucht weiter. Die Lageänderung im Wasser (Höhe/Tiefe) wird durch die Haltung des Gerätes, ähnlich eines Tiefenruders, bestimmt.



Die Übung »Korkenzieher« dient der Koordinationsschulung unter Wasser.



Koordinationsübung: Rolle rückwärts.



Koordinationsübung: Rolle vorwärts.



Die Haltung des Gerätes vor dem Körper ermöglicht eine Tiefensteuerung.

#### Wechselatmung

Mit einem Sauerstoff-Kreislaufgerät ist nur die Wechselatmung möglich, da eine alternative Luftversorgung fehlt. Für den

Tauchanfänger als auch den militärischen Taucher sind folgende Punkte zu beachten, die den reibungslosen Ablauf einer Wechselatmung ermöglichen. Dazu zählen:

- ▶ Schieberstellung
- ▶ Ausblasen des Mundstückes
- ▶ Tauchlage im Wasser
- ▶ Tarierung
- ▶ Taktische Gesichtspunkte des militärischen Tauchens

Wenn bei einer Wechselatmung der Schieber falsch bedient wird, führt der daraus folgende Wassereintrich zur Beendigung des Tauchgangs. Es gilt die Atemdisziplin einzuhalten und den Schieber des Mundstückes erst dann zu öffnen, wenn das Mundstück sich im Mund befindet und das Wasser völlig ausgeblasen wurde. Die einfachste Übung beinhaltet das Schließen und Öffnen des Schiebers ohne das Mundstück aus dem Mund zu nehmen. In der folgenden Übung schließt der Taucher seinen Schieber und nimmt das Mundstück aus dem Mund. Danach führt er es erneut ein, bläst das Wasser aus, öffnet den Schieber und atmet weiter. Eine Steigerung besteht in der Wechselatmung mit einem Partner. Diese



Bei der Wechselatmung hält sich der Taucher mit dem defekten Gerät über dem Tauchpartner an den Schultern fest.



Übergabe des Mundstücks zum Tauchpartner mit dem defekten Gerät.



Die Wechselatmung mit Kreislaufgeräten erfordert Disziplin.

Übung kann in drei verschiedenen Stellungen durchgeführt werden. Die Leichteste ist das Tauchen übereinander, bei der sich das defekte Kreislaufgerät in der oberen Position befindet. Der unten liegende Taucher schließt den Schieber und reicht die Atemschläuche nach oben. Jetzt erfolgt der bereits beschriebene Ablauf. Wichtig bei dieser Übung ist der Übergaberhythmus, damit es zu keiner lebensbedrohlichen Situation durch Atemnot kommt.

Die zweite Möglichkeit der Wechselatmung besteht darin, dass die beiden Taucher sich nebeneinander befinden, wobei es keine Rolle spielt, von welcher Seite das Spendergas gereicht wird. Die Atemgasspende sich gegenüber befindenden Tauchern stellt die höchste Anforderung der Wechselatmung dar. Beide Taucher sollten in den Genuss kommen, einmal

ein »über Kopf« angereichtes Mundstück zu öffnen. Die Abläufe sind dabei spiegelverkehrt, wenn das Mundstück vom Partner herübergereicht wird.

Bei den oben beschriebenen Wechselatmungen ist es besonders wichtig, dass die Übenden die Tarterkontrolle behalten. Ein Absinken oder unbeabsichtigtes Aufsteigen muss verhindert werden. Das erfordert sehr viel Übung und ist mit nur wenigen Trainingsabschnitten nicht zu erreichen. Besonders schwierig ist dies bei Nacht ohne Tiefenreferenz.

Militärische Spezialeinheiten sind bei Annäherungen an ihre Ziele und bei taktischen Operationen auf das unerkannte An- und Abtauchen angewiesen. Hierzu ist ein intensives Training der o. g. Tauchübungen zwingend notwendig. Betrachtet man die Wechselatmung, so stellt



*Ablauffolge der seitlichen Wechselatmung, bei der sich beide Taucher auf gleicher Tauchtiefe befinden.*

unter taktischen Gesichtspunkten bei der Annäherung an einen feindlichen Hafen der Ausfall eines Sauerstoff-Kreislaufgerätes für beide Taucher ein ernst zu nehmendes Problem dar. Die Gefährdung besteht darin, dass aufsteigende Blasen oder der Verlust der Trierung und damit der Aufstieg an die Wasseroberfläche mit dem Risiko verbunden sind, entdeckt zu werden. Aus diesem Grund werden die hier aufgezeigten Übungs- und Trainingseinheiten im militärischen Bereich um spezielle Varianten erweitert und ständig geübt.

## Modul IV

### Praktischer Teil Freiwasser

Die Freiwassertauchgänge führen den Taucher in die eigentliche Tauchumgebung ein. Dabei werden die Kenntnisse und das Wissen der im Pool erlernten Übungen umgesetzt.

Neben den vielen neuen Fertigkeiten, die im Freiwasser trainiert werden müssen, kommen unter anderem die Änderungen hinsichtlich der Trierung aufgrund einer veränderten Salzkonzentration und eine Beeinträchtigung der Orientierung durch schlechte Sichtverhältnisse hinzu. Es muss ausdrücklich betont werden, dass die Tauchtiefe im Freiwasser nicht durch einen Schwimmbadboden begrenzt wird, der ein unbeabsichtigtes Absacken in für Sauerstoff-Kreislaufgeräte gefährliche Tiefen verhindert.



# Formeln und Tabellen

Zur Vereinheitlichung der Maßeinheiten wurden verschiedene Basisgrößen standardisiert und werden als SI-Einheiten (Abk. für frz.: *Système international d'unités*) bezeichnet. So wird z. B. die Größe Druck nicht mehr in bar, sondern in N/m<sup>2</sup> angegeben. Da sich bis heute die SI-Einheiten sowohl im Tauchsport als auch in der Medizin noch nicht ganz durchgesetzt haben, sind in den unten aufgeführten Tabellen die Zusammenhänge der Größen aufgeführt.

Die Bezeichnung bar drückt das Verhältnis von Kraft durch Fläche aus:

$$\text{Druck (p)} = \frac{\text{Kraft (F)}}{\text{Fläche (A)}}$$

## Druckeinheiten und Umrechnungsfaktoren

	Pascal	Bar	technische Atmosphäre	physikalische Atmosphäre	Torr	Pfund pro Quadratzoll
	(Pa)	(bar)	(at)	(atm)	(torr)	(psi)
	= 1 N/m <sup>2</sup>	= 1 Mdyn/cm <sup>2</sup>	= 1 kp/cm <sup>2</sup>	= p <sub>STP</sub>	= 1 mm <sub>Hg</sub>	= 1 lbf/in. <sup>2</sup>
1 Pa	1	1,0000 · 10 <sup>-5</sup>	1,0197 · 10 <sup>-5</sup>	9,8692 · 10 <sup>-6</sup>	7,5006 · 10 <sup>-3</sup>	1,4504 · 10 <sup>-4</sup>
1 bar	1,0000 · 10 <sup>5</sup>	1	1,0197 · 10 <sup>0</sup>	9,8692 · 10 <sup>1</sup>	7,5006 · 10 <sup>2</sup>	1,4504 · 10 <sup>1</sup>
1 at	9,8067 · 10 <sup>4</sup>	9,8067 · 10 <sup>-1</sup>	1	9,6784 · 10 <sup>2</sup>	7,3556 · 10 <sup>2</sup>	1,4223 · 10 <sup>1</sup>
1 atm	1,0133 · 10 <sup>5</sup>	1,0133 · 10 <sup>0</sup>	1,0332 · 10 <sup>0</sup>	1	7,6000 · 10 <sup>2</sup>	1,4696 · 10 <sup>1</sup>
1 torr	1,3332 · 10 <sup>2</sup>	1,3332 · 10 <sup>-3</sup>	1,3595 · 10 <sup>-3</sup>	1,3158 · 10 <sup>-3</sup>	1	1,9328 · 10 <sup>-2</sup>
1 psi	6,8948 · 10 <sup>3</sup>	6,8948 · 10 <sup>-2</sup>	7,0307 · 10 <sup>-2</sup>	6,8046 · 10 <sup>-2</sup>	5,1715 · 10 <sup>1</sup>	

- 1 bar = 100 000 N/m<sup>2</sup>  
= 100 000 Pa  
= 1000 hPa  
= 100 kPa
- 1 torr = 1 mm Hg = 101325/760 Pa ≈ 133,322 Pa
- 760 torr = 1 atm = 101,325 kPa = 1013,25 hPa = 1,01325 bar
- 1 mm Hg = 760·9806,65 mWS ~ = 13,5951 mmWS = 34 Pa

## Tauchtiefe und Sauerstoffpartialdruck

Um einen Tauchgang mit Sauerstoff zu planen, müssen die Tauchtiefe, der Sauerstoffpartialdruck und der Sauerstoffanteil in der Gegenlung berücksichtigt werden. Zur Berechnung dieser Größen können verschiedene Formeln verwendet werden:

### Tauchtiefe

$$T_{\text{max}} = 10 \text{ m} \cdot \left[ \frac{p_{\text{O}_2 \text{ max (bar)}}}{F_{\text{I O}_2 \text{ (bar)}}} - 1 \right]$$

F<sub>I O<sub>2</sub></sub> = Sauerstoffanteil im Atembeutel  
pO<sub>2</sub> = Sauerstoffpartialdruck

## Sauerstoffpartialdruck

$$p_{\text{O}_2 \text{ (bar)}} = F_{\text{I O}_2 \text{ (bar)}} \cdot \left[ \frac{T_{\text{max (m)}}}{10 \text{ m}} + 1 \right]$$

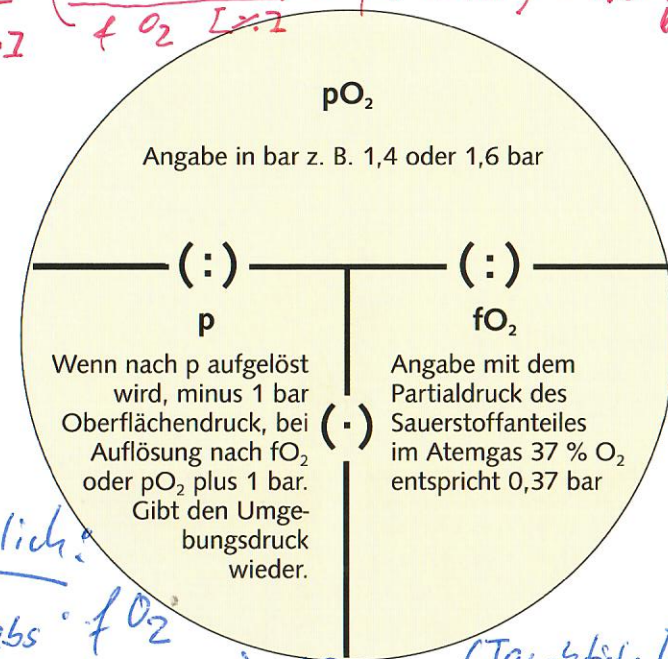
pO<sub>2</sub> = Sauerstoffpartialdruck  
T = Tauchtiefe  
F<sub>I O<sub>2</sub></sub> = Sauerstoffgehalt im Atembeutel

Viele Kreislaufgeräte- und NITROX-Taucher verwenden ein Schema, das als »T - im Kreis« bezeichnet wird. Dieses Schema stellt einen Zusammenhang zwischen Druck, Sauerstoffpartialdruck und Sauerstoffanteil in der Gegenlung dar.

*ganz falsch! +*

*ist dimensionslos (Anteil!!!)*

$$MOD = \frac{(p_{\text{O}_2 \text{ max [bar]}} - p_0 \text{ [bar]})}{f_{\text{O}_2 \text{ [L:2]}}} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{bar}}$$



*(\*) eigentlich:*

$$p_{\text{O}_2} = p_{\text{abs}} \cdot f_{\text{O}_2} = (p_{\text{Hydro}} + p_0) f_{\text{O}_2} = \left( \frac{\text{Tauchtiefe [m]} + p_0}{10 \text{ m/bar}} + p_0 \right) f_{\text{O}_2}$$

*für Bspsee*

*↳ + +) ≈ 1 bar*

~~Tauchtiefe~~

*Druck!*  $p = \frac{pO_2}{fO_2}$

Partialdruck

$$pO_2 = p \cdot fO_2$$

~~Atemgas im Atembeutel~~

*O<sub>2</sub>-Anstieg!*

$$fO_2 = \frac{pO_2}{p}$$

Gesetz von Boyle-Mariotte

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

bei konstanter Temperatur

Gesetz von John Dalton

$$P = p_{\text{gesamt}} = p_1 + p_2 + p_3 \dots p_n$$

Gesetz von Gay-Lussac

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

Henry'sches Gesetz

$C_x = a_x \cdot p_x$   
 $C_x$  = Konzentration der gelösten Gasmoleküle  
 $a_x$  = Löslichkeitskoeffizient des Gases  
 $p_x$  = Flüssigkeitspartialdruck

tolerierte OTU's pro Tauchgang	1.Tag	2.Tag	3.Tag	4.Tag	5.Tag	6.Tag	7.Tag	8.Tag	9.Tag	10.Tag	>10
	850	700	620	525	460	420	380	330	310	300	300

*350 330 310*

OTU (Oxygen tolerance unit)

$$OTU = \frac{0,5 \cdot t}{(pO_2 - 0,5)^{0,83}}$$

t = Expositionszeit (min.)  
 $pO_2 = O_2$  Partialdruck (bar)

Unit of Pulmonary Toxicity Dose

1 UPTD = 1 min  $O_2$ -Atmung bei 1 bar

$pO_2$	Kp Faktor	$pO_2$	Kp Faktor
0,5	0,00	1,3	1,48
0,6	0,26	1,4	1,63
0,7	0,47	1,5	1,78
0,8	0,65	1,6	1,93
0,9	0,83	1,7	2,07
1,0	1,00	1,8	2,22
1,1	1,16	1,9	2,36
1,2	1,32	2,0	2,64

UPTD	Abnahme der Vitalkapazität in %
615	2 %
825	4 %
1035	6 %
1230	8 %
1425	10 %
1815	15 %
2190	20 %

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

Tauchzeit Limit (min) für Einzel-tauchgänge	Tageslimit (min) für Mehrfach-tauchgänge	Maximaler $O_2$ -Druck (bar) <i>atm</i>	% ZNS/min
45	150	1,6	2,22
120	180	1,5	0,83
150	180	1,4	0,67
180	210	1,3	0,56
210	240	1,2	0,48
240	270	1,1	0,42
300	300	1,0	0,33
360	360	0,9	0,28
450	450	0,8	0,22
570	570	0,7	0,18
720	720	0,6	0,14

Tabelle ZNS-Belastung

$pO_2$ (bar) <i>atm</i>	ZNS $O_2$ % (%/min)	Tauchzeit (min)	$pO_2$ (bar) <i>atm</i>	ZNS $O_2$ % (%/min)	Tauchzeit (min)
0,50	0,00	Unbegrenzt	1,30	0,56	179 <i>180</i>
0,60	0,14	714 <i>720</i>	1,35	0,61	160
0,70	0,18	556 <i>570</i>	1,40	0,65	154
0,80	0,22	455 <i>480</i>	1,45	0,73	136
0,90	0,28	357 <i>360</i>	1,50	0,83	120
1,00	0,33	303 <i>300</i>	1,55	1,18	87
1,10	0,42	238 <i>270</i>	1,60	2,22	45
1,20	0,47	213 <i>240</i>	1,65	6,25	16

*100%*

Erholungszeit [std./min]	0:30	1:00	1:30	2:00	2:30	3:00
Multiplikator	0,8	0,63	0,5	0,4	0,31	0,25
Erholungszeit [std./min]	3:30	4:00	4:30	5:00	6:00	9:00
Multiplikator	0,2	0,16	0,13	0,1	0,06	0

*0,125*

## Wir sagen Danke

- Frank Ballack Für seine Bereitstellung von Tauchausrüstung und technischen Support.  
 Dr. Dietmar Bernd Für die Korrekturlesung und Anregungen im Bereich der Vorschriften.  
 Simone Büth Für die Tauchgänge zur Herstellung der ersten Fotos für dieses Buch und ihre Tipps.
- Alexander Fritsch Für seine Grafiken.  
 Alexander Fertig Für die Bereitstellung von Taucheranzügen der Firma Waterproof.  
 Dr. Anja Hoff Für ihre Geduld bei den oft bohrenden Fragen zur Medizin und ihrer Mithilfe als Fotografin.
- Thomas Hartwig Für seine Tests zur Sicherung wichtiger Erkenntnisse beim Umgang mit Atemkalken.
- Andreas Hilsenbeck Für seine fantastischen Fotos und seine Bereitwilligkeit, mit uns zu weit entfernt liegenden Tauchgebieten zu reisen.
- Annette Kosegarten Für ihre Mühe uns die Geheimnisse der Atemkalkentwicklung und Herstellung näherzubringen.
- Udo Koss Für ihre Unterstützung mit Bildern und Informationen (Firma Dräger)  
 Ute Laue Für die Mühe bei der Korrekturlesung der ersten Entwürfe.  
 Dr. Claus-Martin Muth Für seine Unterstützung im medizinischen Bereich und die Korrektur und Ausarbeitung medizinischer Spezialbereiche.
- Norbert Probst Für seine zur Verfügung gestellten Fotos der Kampfschwimmer.  
 Werner Scheyer Für seine Zeichnungen, die wesentlich zum Verstehen technischer Abläufe beitragen.
- Markus Voigt Für Fotos und Informationen zu Sauerstoff-Umfüllpumpen.  
 Kurt Wenderoth Für Ihre Unterstützung mit Bildern und Informationen (Firma Dräger)  
 Bernd Rusch Für seine im Studio angefertigten Bilder und seine Ruhe bei der Umsetzung der außergewöhnlichsten Wünsche.
- Nicht zuletzt unseren Partnern, Lebensgefährten, Eltern und allen Menschen, die geduldig unsere Launen, langen Abende und Nächte mit viel Verständnis erduldet haben.

## Register

### A

- abdominale Atmung 53  
 Abfallschlüssel 94  
 Absinken 106, 135  
 Absorberkalk siehe Atemkalk  
 Absorptionsdauer 86  
 Absorptionseffekt 43  
 Absorptionsfähigkeit 92  
 Absorptionsmenge 85  
 Abtauchen 129  
 Abtrieb 103, 106  
 Abwehrmechanismen 60  
 Aceton 50  
 adiabatische Verdichtung 49  
 ADV-Jacket 104  
 Air-Trapping 76  
 Alkoholkater 68  
 Alkoholkonsum 75  
 Alterungsprozesse 60  
 Aluminium 43  
 Alveolarmembran 61  
 Alveolarraum 56  
 Alveolen 54, 55, 71  
 Amphetamie 68  
 Amphora 24, 30  
 Anästhesiekalke 89  
 ANF (Atrialer-Natriuretischer Faktor) 75  
 Angina pectoris 77  
 Angstgefühle 71  
 anstrengende Arbeitsleistung 112  
 Anti-Diuretischen-Hormon (ADH) 75  
 antimagnetischen Materialien 43  
 Antioxidantien 60  
 antioxidative Kapazität 60  
 Apfelsaftschorle 76  
 Arbeitsbelastung 76  
 Arbeitsplatz-Konzentration, maximale (MAK-Wert) 93  
 ARO 57 22
- arterielle Gasblasen 77  
 arterielle Gasembolie 69, 76, 78  
 Asthma bronchiale 91  
 Atelektasen 60, 62  
 Atembedarfssteuerung 20, 21  
 Atembeutel 38, 83  
 Atemfrequenz 113  
 Atemgaskontrolle 69  
 Atemgasüberschuss 108  
 Atemgaszirkulation 20  
 Atemkalk 83, 84, 94, 95  
 Atemkalk-Restmengen 128  
 Atemkalkbehälter 97  
     linear 41  
     radial 41  
 Atemkalkmenge 43  
 Atemkalkpatrone 29, 58  
 Atemkalksorten 84, 89  
 Atemkomfort 38  
 Atemlosigkeit 72  
 Atemluft 73  
 Atemminutenvolumen (AMV) 43, 57, 73, 86, 112  
 Atemmuskulatur 37  
 Atemnot 60, 77  
 Atemprozess 56  
 Atemreiz 53  
 Atemrhythmus 129  
 Atemschläuche 34, 91  
 Atemwege 74  
 Atemwegreizung 60  
 Atemwegserkrankungen 76  
 Atemwiderstand 38, 41, 84  
 Atmosphäre, Formeln 52  
 Atmungs- und Kreislauffunktionen 82  
 Ätzkalk-Lösung 13  
 Aufregung 74  
 aufsteigen 135

Aufstieg 108  
 Aufstiegsgeschwindigkeit 76, 78  
 Auftrieb 103  
 Ausatembeutel 38  
 Ausatemluft 57  
 Ausatemschlauch 98  
 Ausatemseite 97  
 Ausbildungsschritte 126  
 Auskühlung 74  
 Außenohr 119  
 Austrocknung 74

**B**

bakterielle Kontamination 91  
 Bakterien 28  
 Bauchlage 132  
 Baumusterprüfung 48  
 Bedarfsventil 16  
 Beinahe-Ertrinken 69, 79, 81  
 Beklemmungen 68  
 Berechnungstabelle 111  
 Bergsee 118  
 Bergseetauchgang 46  
 Bert, Paul 15, 64  
 beschleunigtes Atmen 71  
 Betriebsgeräusche 100  
 Bewusstlosigkeit 58, 77, 79  
 Biomarine 155 21  
 Blasendefuser 45  
 Blasendiffusor 21  
 Blasenspuren 45  
 Blasenzerstäuber 29, 45  
 Blässe 77  
 blecherne Sprache 78  
 Bleiabwurfssystem 105  
 Bleibedarf 105  
 Bleigewicht 100  
 Bleigurtharness 104  
 Bleimenge 129  
 Blut 56  
 Blutkreislauf 71  
 Blutvolumen 76  
 Boosterpumpe 125  
 Boyle-Mariotte-Gesetz 107, 113  
 Boyle, Sir Robert 107

Brennen der Atemwege 91  
 Brennen hinter dem Brustbein 60  
 Bronchiolen 54  
 Bronchusverschlüsse 76  
 Brustatmung 53  
 Brustkorb 53, 61  
 Buddy Inspiration 21  
 Buddy System 69  
 Bypass 24, 29, 45

**C**

Calciumcarbonat 83, 94  
 Calciumhydroxid 83, 84  
 Calciumoxid 84  
 Carbamat 71  
 Carl Wilhelm Scheele 13  
 Castoro 96 41  
 Castoro 96 PRO 23, 126, 127  
 Castoro P 96 22  
 Caustic Cocktail 91  
 CCR = Closed Circuit Rebreather 21  
 Chemorezeptoren 53  
 Chronische Bronchitis 76  
 chronische Hyperoxie 60  
 CNS siehe ZNS Belastung  
 CO<sub>2</sub>-Absorption 94, 95, 101  
 CO<sub>2</sub>-Analysatoren 95  
 CO<sub>2</sub>-Filterung 95  
 Cousteau, Jacques-Yves 15  
 Cyanobakterien 52

**D**

Dalton, John 109  
 Davis, Robert 14  
 Davis-Tauchretter 14  
 Deane, John 13  
 Dehydration 74  
 Dekompressions-Erkrankungen 76  
 Desinfektion 116  
 Diazepam (Valium) 68  
 Dichtigkeitsprüfung des Gerätes 96, 98  
 Dichtigkeitsstest 98  
 Diffusion 54  
 Diffusionsgradient 56  
 DIN EN 13 949 48, 50

DIN EN 14 143 48  
 DIN EN 144-1 49  
 DIN EN 144-2 51  
 DIN EN 144-3 49, 51  
 Diurese 75  
 Dive-Cleaner 50  
 DiveSorb Pro 85  
 DiveSorb S 85  
 DNA-Schäden 59  
 DOLPHIN 20  
 »Donald Duck«-Stimme 78  
 Donald, Ken 112  
 Dosiereinheit 29  
 Dräger, Bernhard 14  
 Druckausgleich 120  
 Druckammerbehandlung 65, 70  
 Druckminderer 32  
 Druckreferenzzone 35  
 Druckverhältnisse in der Lunge 35  
 Durchschnittsbelastung 110

**E**

Edelstahlspiralen 39  
 Einatembeutel 38  
 Einatemseite 97, 98  
 Eisbildung 32  
 Elektrolytverschiebungen 80  
 Elektronenkonfiguration 52  
 elektronische Gasreinigung 95  
 elektronischer Steuerrung 22  
 Energiewandlung 52  
 Entsorgung 94  
 Entzündungsgefahr 49  
 Entzündungsreaktion 61  
 epileptischer Krampf 64  
 Erinnerungsverlust 65  
 Erschöpfungszustände 65  
 Erste-Hilfe-Maßnahmen 76, 82  
 erste Sauerstoff-Kreislaufgerät 13  
 Erstmaßnahmen 81  
 Erstversorgung 91  
 Ertrinken 65, 79  
 Ertrinkungsfall 81, 82  
 Erythrozyten 55, 71, 80  
 Essoufflement 72, 73

Europäische Norm (EN) 57  
 Eustachische Röhre 119  
 Explosion 49  
 Expositionsdauer 111  
 Expiration 94  
 exsudativ 61

**F**

Farbindikator 89  
 Feintarierung 130  
 Fette 86  
 Feuchtigkeit 94  
 Feuchtigkeitsgehalt 94  
 Feuchtigkeitsgehalt des Atemkalkes 94  
 Flaschengrößen 113  
 Fleuss, Henry 13  
 Flowmeter 98  
 Flüssigkeitsverbrauch 75  
 Fotosynthese 52  
 Freiwassertauchgänge 136  
 fremdartige Geräusche 130  
 Frieren 74  
 Fülldruck 43  
 Füllgas 62  
 Füllmenge des Absorbers 85  
 Füllungsgrad 26  
 Funktionsprinzip 83  
 Furcht 74

**G**

Galileo 46  
 Gagnan, Emile 16  
 Gasausnutzung 114  
 Gasaustausch 73  
 Gasblasen 77  
 Gasdichte 72  
 Gasfluss 43  
 Gaskanäle 88  
 Gasstrom 49  
 Gaszuführung 34  
 Gay-Lussac 114  
 Gedächtnislücken 58  
 Gefahrenquellen 49  
 Gefahrguttransporte 50  
 Gefäßweitsteller 68

Gefühllosigkeit in den Lippen 58  
 Gegenlunge 14, 36, 109, 129  
 Gehirn 53  
 Geräuscentwicklungen 100  
 Gesamtsauerstoffmenge 57  
 Geschlossene Systeme 19, 20, 21  
 Gesetz von Boyle Mariotte 139  
 Gesetz von Gay-Lussac 114, 139  
 Gesetz von John Dalton 139  
 Gesichtsmuskulatur 118  
 Gewebeatmung 19  
 Glycerin-Wassergemisch 123  
 Gorman, Siebe 13  
 Grundtarierung 103  
 Gummidichtungen 50  
 Gummieinsatz 43

## H

Haarrisse 98  
 Habanero 21  
 Halbgeschlossene Systeme 20  
 Halbgesichtsmaske 46  
 Halbseitensymptomatik 77  
 Haldane, J.B.S. 112  
 Hämoglobin 54, 71  
 Hämoglobinsättigung 54  
 Hämolyse 80  
 Handdosierung 23  
 Harnausscheidung 74  
 Harnesssystem 31  
 Harnproduktion 75  
 Hass, Hans 11 ff, 28, 48  
 Hauptbronchien 54  
 Heimlich-Handgriffe 82  
 Helium 118  
 Helmtaucher 12  
 Helmtauchgerät 13  
 Henryschen Gesetz 54, 139  
 Herstellerangaben 86  
 Herzinfarkt 77  
 Herzmedikamente 68  
 Herzmuskulatur 77  
 Herzrhythmusstörungen 77  
 Herzstillstand 79  
 Hirndurchblutung 68

Hirnflüssigkeit 53  
 Hitze 74, 94  
 Hochdruckschlauch 45  
 Hodges, Jimmy 15  
 Hüftgurt 128  
 Hummerhead 46  
 Husten 60  
 Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) 55, 71, 83  
 Hydroperoxid 59  
 hydrostatischen Gleichgewicht 103  
 hyperbare Sauerstofftherapien 48  
 Hyperkapnie 71  
 Hyperoxie 59, 60  
 Hypoglykämie 68  
 Hypoxie 57, 58, 79, 80, 83

## I

Ida 64 30, 31, 40  
 Inertgas 101, 118  
 Infarkt 77  
 Infektionsgefahr 28  
 Innenoberfläche 28  
 Innenohr 119  
 Inspiration 53

## J

Jacket 103  
 Joule-Thomson-Effekt 32

## K

Kaffee 75  
 Kalkabsorber 97  
 Kalkstaub 87  
 Kalkstein 83  
 Kampfschwimmer 105  
 Kanalbildung 71  
 Kanalwirkung 43  
 Kapillaren 61  
 Kapillartiefenmesser 114, 116  
 Katalyse 52  
 Katox 24  
 K-C-Perlen 124  
 Kehlkopf 54  
 Kelvin 55  
 Kiefermuskulatur 39

Kleintauchgerät 138 14, 17  
 Knutschflecktest 97, 128  
 Koffein 75  
 Kohlenhydrate 86  
 Kohlensäure 83  
 Kohlenstoffdioxidabsorption 29  
 Kohlenwasserstoff 50  
 Kompressionsphase 78  
 Kondenswasser 32  
 Kondenswasserbildung 74, 117  
 Konstantdosierung 20, 22, 34, 45, 98, 108  
 Konstantfluss 20  
 Konstantvolumenanzug 103  
 Kontrolle des Sauerstoffgehaltes 101  
 Kontrollinstrumente 29  
 Konzentrationsschwäche 58  
 Kopfschmerzen 65, 71  
 Körnung des Atemkalks 84  
 Körperstoffwechsel 75  
 körperliche Anstrengungen 109  
 körperliche Belastung 68  
 kostale oder thorakale Atmung 53  
 Kp Faktor 62  
 Krampfanfälle 15, 65, 68  
 Krämpfe 63  
 Kreislaufbeschwerden 77  
 Kreislauftauchgeräte 19  
 kryogener Rebreather 12  
 Kugelventile 49  
 Kupferdichtungen 32  
 Kurzatmigkeit 91

## L

Ladungssicherung 51  
 Lagerstelle 116  
 Lähmungen 77  
 laminare Strömung 73  
 Langzeituntersuchung 61  
 LAR V 24, 30, 43, 45, 90  
 LAR VII 92  
 Laugen 34  
 Leutnant Lund II 17, 24  
 Lipidperoxidation 60  
 Lippenmuskulatur 119

Lorrain-Smith-Effekt 60, 61, 62  
 Löschkalk 84  
 Luftanhalten 79  
 Luftdruck 118  
 Luftdruckabnahme 118  
 Luftembolie 76  
 Luftnot 91  
 Lunge 63  
 Lungenarteriolen 61  
 lungenautomatische Sauerstoffzufuhr 22, 34  
 Lungenbläschen 72, 76  
 Lungenfell 53  
 lungengesteuerte Gaszuführung 108  
 Lungengewebe 55  
 Lungenintoxikation 62  
 Lungenödem 80  
 Lungenriss 69, 76, 107  
 Lungenschädigung 60, 61  
 Lungenüberdehnung 76  
 Lungenüberdehnungsverletzung 76, 79  
 Lungenvitalkapazität 63

## M

Magen-Darm-Trakt 82  
 Mageninhalt 82  
 Magnetventile 24  
 mangelnde Spülung 101  
 Manschette 43  
 manuelle Gaszuführung 108  
 manueller Bypass 23  
 manuelle Sauerstoffzufuhr 22, 34  
 manueller Tiefenmesser 116  
 Mariotte, Edme 107  
 maximale Tauchtiefe 28  
 maximaler Sauerstoffpartialdruck 109  
 Medikamente 68  
 Medistinalempysem 76  
*Medulla oblongata* 53  
 Meerwasser 80  
 Membranveränderungen 59  
 Mindest-Sauerstoffpartialdruck 57  
 Mindestausrüstung 114  
 Mindestfeuchtigkeit 90  
 Mineralien 75

Mischgase 19  
 Mitochondrien 59  
 Mitteldruckleitung 34  
 Mittelohr 119  
 Mittelohrbarotrauma 120  
 Modell Sprinter 104  
 Molekularsiebe 95

## N

N<sub>2</sub>-Partialdruck 102  
 Nackengurt 128  
 Nasennebenhöhlen 78  
 nasses Ertrinken 79  
 Nasstauchanzug 103  
 Natriumcarbonat 83  
 Natriumhydroxid 83  
 Naubos AR 88 22  
 Navigationsbord 116  
 Neoprenüberzüge 90  
 Nervenausfälle 77  
*Nervus laryngeus recurrens* 78  
 Neutralisation 83  
 Niederdruckschlauch 45  
 Nieren 75  
 Nierenfunktion 75  
 NITROX 19, 20, 21, 49, 118  
 NOAA 66  
 Normalbedingungen 26  
 normobar 48  
 Norten, Trevor 13  
 Notfallmanagement 82

## O

O<sub>2</sub>-Ergänzung 20  
 O<sub>2</sub>-Hochdrucktrockner 124  
 O<sub>2</sub>-Sensor 96  
 oberflächenaktiven Substanzen  
 (Surfactant) 62  
 Oberflächenaufenthalt 40  
 Oberflächenpause 67, 111  
 Ödementwicklung 61  
 offene Systeme 16, 19  
 OH-Radikal 59  
 Ohnmacht 131  
 ohnmachtsichere Lage 105

Ohrensausen 71  
 optimale Tarierung 103  
 Organdurchblutung 68  
 Osmose 80  
 OTU (Oxygen tolerance unit)  
 62, 140  
 Oxidationsmittel 52  
 Oxygauge 45  
 Oxygen Booster DOB-H 125  
 Oxygen Booster DOB-M 125  
 Oxygen tolerance unit 62  
 Oxygen-clean 50  
 Oxygen-compatible 50  
 Oxygen-Service 50  
 Oxymax 3 24

## P

Paniksituationen 76  
 Panzerretter 21  
 Partialdruckabfall 58  
 Partialdruckgradient 54  
 Partialdruckgrenzwerte 110  
 Pascal 55  
 Pendelatmung 22  
 Peroxidradikale 60  
 Peroxinitrit 59, 68  
 Peroxinitrit-Bildung 65  
 pfeifende Atmung 91  
 pH-Wert 53  
 Phenytoin (Dilantin) 68  
 physiologische Sauerstoffbedarf 26  
 Pilze 28  
 Pleura 53, 77  
*Pleura visceralis* 53, 77  
 Pleuraflüssigkeit 53  
 Pleurahöhle 53  
 Pleuraspalt 77  
 Pneumothorax 76, 77  
 Polypen 76  
 Poseidon Oxylyon 31  
 Pressluft 19  
 Pressluftflaschen 121  
 Presslufttauchgang 58, 111  
 Presslufttauchgerät 26  
 Priestley, Joseph 13

proliferative Phase 61  
 Proteine 86  
 PSA = Persönliche Schutzausrüstung 48  
 PSA-Richtlinie 48  
 pulmonale Toxizität 61  
 Pulsveränderungen 68

## Q

Quecksilbersäule 55  
 Querschnittsverengung 49

## R

Rachenraum 54  
 Rachenschmerz 60  
 Radikal-Angriffe 59  
 Radikale 59  
 radikalische Kettenreaktion 59  
 RB 80 21  
 reactive oxygen species, ROS 69  
 Reaktionsfeuchtigkeit 94  
 Reaktionswärme 93  
 reaktive Stickstoffspezies 59  
 reduzierte Sauerstoffformen 59  
 Reflex 131  
 Reinheit des Atemgases 128  
 Reizungen 91  
 Reservedruck 112  
 respiratorischer Quotient (RQ) 86  
 Restdruck 112  
 Rg-UF/M 21  
 Richtungsventile 22, 39  
 Rippenfell 53  
 RNS 65  
 Rob rebreather-oxygen-booster 125  
 Rohrquerschnitte 51  
 ROS 65  
 Rückenlage 131  
 Rückenmark 53

## S

Salzgehalt 80  
 Salzbildung 83  
 Sättigung 43  
 Sättigungsgrenze 88  
 Sauerstoff 13

Sauerstoff-Umfüllpumpe 121  
 Sauerstoff-Umfüllstation 125  
 Sauerstoff-Vergiftungssymptomen 65  
 Sauerstoffangebot 109  
 Sauerstoffanreicherung 46  
 Sauerstoffaufsättigung 111, 112  
 Sauerstoffausnutzung 86  
 Sauerstoffbedarf 52  
 Sauerstoffexplosion 51  
 Sauerstoffexpositionszeiten 119  
 Sauerstoffflasche 121  
 Sauerstoffgabe 82  
 sauerstoffgeeignete Finimeter 97  
 Sauerstoffgradient 57  
 Sauerstoffhandumfüllpumpe 123  
 Sauerstoffintoxikation 64  
 Sauerstoffkrampf 28, 69  
 Sauerstoffmangel 69, 79, 80, 81  
 Sauerstoffmenge 86  
 Sauerstoffmessgerät 46, 69, 101, 128  
 Sauerstoffpartialdruck 15, 27, 53, 54,  
 109, 111, 119  
 Sauerstoffpartialdruckmessgerät 45, 96  
 Sauerstoffradikale 62  
 Sauerstoffrebreather 118  
 sauerstoffrein 32, 50  
 Sauerstoffsensoren 24, 96  
 Sauerstofftoleranztest 66  
 Sauerstofftoxizität 47, 112  
 Sauerstoffunterversorgung 58, 101  
 Sauerstoffverbrauch 52  
 Sauerstoffvergiftung 59, 64, 112  
 Sauerstoffvorräte 100  
 Säure-Basen-Haushalt 79  
 Säurebildung 83  
 Schädigung des Lungengewebes 63  
 Schieber 99  
 Schieberbedienung 129  
 Schieberstellung 133  
 Schlaganfall 77  
 Schleimhautbiss 65  
 Schleimhäute 54, 56, 74  
 Schleimhautschwellung 76  
 Schleimpfropf 78  
 Schluckbeschwerden 78

- Schmierstoffe 32, 39  
 Schmutzpartikel 50  
 Schnellabwurfssystem 106  
 schnelles Auftauchen 107  
 Schutzhülle 31  
 Schwan, Dr. Theodor 13  
 Schweißausbrüche 71  
 Schwellung der  
   Nasenschleimhäute 60  
 SCR = Semi Closed Rebreather 20  
 Seekrankheit 74  
 Seh- und Sprachstörungen 77  
 Sehstörungen 58  
 Seitenlagerung 82  
 Shadow 30  
 SI = Systeme International d'Unités 55  
 SI-Einheiten 138  
 Sicherheitsvorschriften 68  
 Siliconfett 50  
 SIVA S-10 24  
 Smith, Lorrain 60  
 Sonneneinstrahlung 74  
 Sonnenlicht 52  
 Spannungspneumothorax 77  
 spezielle Harnesssysteme 103  
 Spindel- oder Nadelventile 49, 51  
 spülen 45  
 Spülen des Kreislaufgerätes 101  
 Spülvorgang 40, 86, 131  
 Stahl 43  
 Standzeit 86  
 Standzeit des Atemkalkes 84  
 Stäube 50  
 Staudrücke 51  
 Stealth EOD 21  
 Stelzner, Hermann 14  
 Steroide 68  
 Steuerungsventile 29  
 Stickstoff 58, 118  
 Stickstoffanreicherung 111  
 Stickstoffanteil 101  
 Stickstoffgehalt 130  
 Stickstoffmonoxid 59, 68  
 Stimmbänder 54  
 Stimmritzen 54  
 Stimmritzenkrampf 79  
 Stoffwechselvorgänge 70  
 Strömungsgeschwindigkeit 73  
 Strömungswiderstände 51  
 Surfactant 80  
 Süßwasser 80
- T**
- Tariermittel 106  
 Tariersystem 103  
 Tariierung 106, 130, 133  
 Tariervorgang 103  
 Tauchcomputer 102, 110, 115  
 Tauchersicherungskragen TSK 47  
   103, 105  
 Tauchlage 133  
 Tauchmedizin 52  
 Tauchphysiologie 55  
 Tauchretter 1910 23  
 Tauchtabellen 118  
 Tauchübungen 131  
 Tee 75  
 Teein 75  
 Temperaturschwankungen 34  
 Therapiedruckkammer 61, 65  
 Thoraxvolumen 53  
 Thrombosierung 61  
 Tiefenmesser 114  
 tonisch-klonische Krämpfe 64  
 Totalausfall der Atmung 82  
 Totraum 22  
 Toxizität von Sauerstoff 59  
 Trägeratembeutel 35  
 Tragesystem 31  
 Trainingszustand 74  
 TRIMIX 19, 20, 21  
 trockener Husten 91  
 Trockenmittel 124  
 Trockenpatrone 124  
 Trockentauchanzug 103  
 Trommelfell 119  
 Tuberkulosekrankheit 76  
 Tumore 76  
 Tunnelblick 58  
 turbulente Strömung 72

**U**

- U-Boot-Rettungsgeräte 14  
 U-Boot-Tauchretter DM 2 14  
 Übelkeit 68  
 Überdehnung der Lunge 70  
 Überdehnungsverletzungen 76  
 Überdrucktest 100  
 Überdruckventil 29, 32, 34, 45  
 überlagerter Atemkalk 97  
 Überlagerung 94  
 Überströmtechnik 121  
 Uh 2 T 123  
 Uhr 115  
 Umgebungsdruck 26  
 Umgebungsluft 56  
 Undichtigkeit 100  
 Undichtigkeiten im Atemkalkbehälter  
   97  
 Unit of Pulmonary Toxicity Dose 62,  
   140  
 Unterdrucktest 99  
 Unterkühlung 70, 82  
 Unterwasserscooter 106  
 UPTD 62  
 Urinproduktion 75

**V**

- venöses Blut 56  
 Verätzungen 87  
 Verbrauchskalkulation 112  
 verbrauchter Atemkalk 46, 71, 94  
 Verbrennungsmotor 52  
 Verdichtung des Atemkalkes 97, 128  
 Verdunstung 74  
 Vereisung 32  
 Verfallsdatum 89  
 Vergiftungssymptome 69  
 Verwirbelungssystem 42  
 Vitalkapazität 60, 62  
 Vitamin A 60

- Vitamin C 60  
 Vitamine 60  
 Viton-O-Ringe 50  
 Vollgesichtsmaske 13, 29, 46  
 Vorbereitung 28  
 Vorratsflasche 86, 121  
 Vorratsgas 46  
 VR 3 46

**W**

- Waffentaucher 17  
 Walzenschieber 29  
 Wangentest 97, 128  
 Wartungszustand 68  
 Wasserabscheider 124  
 Wasserausscheidung 75  
 Wassereinbruch 47, 71, 133  
 Wasserfalle 42, 116  
 Wassergehalt 57  
 Wassergehalt im Atemkalk 84  
 Wassersäule 55  
 Wasserstoffperoxid 59  
 Wechsellatmung 133, 135  
 Wiederholungstauchgang 67, 110  
 WTD 71 92

**Z**

- Zeit- und Tiefenlimit 68  
 Zellmembranen 65  
 Zellschädigungen 59  
 Zellstoffwechsel 79  
 zentrales Nervensystem (ZNS) 63, 65,  
   111  
 Zirkulationssystem 22  
 ZNS 63, 65, 111  
 ZNS-Belastung 115  
 ZNS-Minutenbelastung 111  
 ZNS-Toxizität 65, 67  
 Zöller, J.F. 13  
 Zwerchfellatmung 53



Waldemar Boczek wurde 1959 in Gleiwitz/Oberschlesien geboren. Mit 16 Jahren hat er das Flossenschwimmen und anschließend den Tauchsport für sich entdeckt.

Als Berufssoldat der Bundeswehr ließ er sich zum Tauchereinsatzleiter der Schwimmtaucher ausbilden. Die so erworbenen Kenntnisse und Fertigkeiten erwiesen sich als sehr nützlich für seine journalistischen Aktivitäten. In seiner zwölfjährigen Tätigkeit als Redakteur und Unterwasserkameramann war er am Entstehen vieler Tauchfilme beteiligt und wurde mehrfach mit internationalen Filmpreisen ausgezeichnet. Sauerstoff-Kreislaufgeräte lernte er bei Filmarbeiten über Spezialeinheiten kennen. Sie wurden zu seiner großen Leidenschaft und führten nicht zuletzt dazu, dass er einer der ersten zivilen Tauchlehrer in diesem Bereich wurde.



Jens Hilbert wurde 1966 in Herford geboren. Durch Unterwasserfilme inspiriert begann er 1985 mit der Tauchausbildung bei der Deutschen Lebensrettungsgesellschaft.

Ein Jahr später ließ er sich bei der deutschen Marine zum Kampfschwimmer ausbilden. Das Tauchen wurde schnell zur großen Leidenschaft. Jens Hilbert hat drei deutsche Rekorde und drei Weltrekorde in den Disziplinen Streckentauchen, Mischgastieftauchen und Apnoetauchen

aufgestellt. Er ist ein Taucher, der alle Facetten des Tauchens ausprobiert hat. Jens Hilbert widmet einen großen Teil seiner Freizeit internationalen Dokumentationen und Tauchexpeditionen in aller Welt.



Dr. Wataru Kähler wurde 1966 in Kiel geboren. Er entdeckte erst im Alter von 30 Jahren den Tauchsport für sich. Während seines Studiums an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

wurde sein Interesse an der Tauch- und Überdruckmedizin geweckt. Seit 1998 ist er als wissenschaftlicher Assistent und Projektleiter an verschiedenen Forschungsvorhaben in diesem Fachbereich beteiligt. In seiner Freizeit widmet er sich dem Kreislauftauchen.



Dr. med. Andreas Koch, Flottillenarzt, geboren am 11. Juni 1963 in Wilhelmshaven, leitet den Bereich »Angewandte Wissenschaften« am Schifffahrts-

medizinischen Institut der Marine in Kronshagen bei Kiel. Als Facharzt für Innere Medizin, Tauchmedizin und Sportmedizin beschäftigt er sich schwerpunktmäßig mit praxisnaher Forschung auf dem Gebiet der Tauch- und Überdruckmedizin und versieht Lehrtätigkeiten in der Abteilung Sportmedizin und im Physiologischen Institut der Christian-Albrechts-Universität Kiel.