

## Physiologische Grundlagen zur Verlängerung der Apnoe-Zeit

Dr. med. Claus-Martin Muth  
(alle Rechte beim Verfasser!)

Apnoe-Tauchen, bis vor wenigen Jahren für viele Taucher allenfalls ‚Mittel zum Zweck‘ im Rahmen des Hallentrainings, ist mittlerweile schon fast zur Trendsportart avanciert.

Diese Entwicklung geschah nicht zuletzt unter dem Einfluss erstaunlicher Leistungen einzelner, die letztlich diese Sparte des Tauchens ins Gespräch brachte.

Tatsächlich ist in der Folge denn auch aus dem reinen Trainingsbestandteil ‚Apnoetauchen‘ bei der organisierten Taucherschaft ein gezieltes Training für diese eigene Sparte des sportlichen Tauchens geworden. Mit Blick auf die zum Teil übernatürlich wirkenden Leistungen einzelner herausragender Spitzenathleten stellt sich dem Apnoisten daher die Frage, wie er die eigene Leistungsfähigkeit verbessern kann.

Da es sich beim Apnoetauchen in weiten Bereichen quasi um ein ‚Spielen mit der Physiologie‘ handelt, liegt im Verständnis der zugrundeliegenden Physiologie auch der Schlüssel zur eigenen Leistungsfähigkeit, bzw. zum Verständnis der Spitzenleistungen.

Doch es ist nicht nur die Physiologie allein, die die Leistung beim Apnoetauchen determiniert. Weitere Faktoren spielen eine wesentliche Rolle, und diese sollen im folgenden, zumindest soweit bislang bekannt, ein wenig beleuchtet werden.

Diese Betrachtungen führen daher (zumindest zunächst einmal) weg von der Physiologie und hin zur **Psychologie**. Diese spielt nämlich gerade auch beim Apnoetauchen, wie übrigens bei jeder Form der Leistungserbringung, eine wesentliche Rolle. Es ist längst bekannt, dass jede Form von Höchstleistung, egal, ob sportlicher oder beruflicher Art, nicht nur mit der grundsätzlichen Fähigkeit zu dieser Leistung, sondern auch mit der entsprechenden Motivation desjenigen zusammenhängt, der die Leistung erbringen soll. Nicht nur im Bereich des Leistungssports haben daher Motivationstrainer ebenso Fuß gefasst, wie gezielte Methoden zur Willensbildung. Und auch beim Apnoe-Tauchen ist der Wille des Individuums, verknüpft mit der individuellen Leidensfähigkeit ganz wesentlich für die Fähigkeit, die Luft anzuhalten.

Allerdings muss an dieser Stelle auch ganz deutlich und mit aller Nachdrücklichkeit betont werden, dass eine Übermotivation bei dieser Sportart leicht zu einer Bedrohung für die Gesundheit, ja sogar für das Leben werden kann. Weil dieser Grat ab einer gewissen Grenze durchaus sehr schmal ist, bedarf das Training von Apnoe-Tauchern eine zu jedem Zeitpunkt bestehende, sorgfältige Überwachung mit der Möglichkeit des jederzeitigen Eingreifens.

Neben der Motivation und der persönlichen Willensausprägung stellt noch die Ablenkung einen leistungssteigernden Faktor dar, wie aus Versuchen mit Probanden bekannt ist. So konnte z.B. gezeigt werden, dass sich die Atemanhaltezeit verlängern lässt, wenn kurz vor Erreichen jener Schwelle, die zum Atmen zwingt (dem sog. ‚Breath-hold breaking point‘) den Probanden bestimmte Aufgaben gestellt werden. Konkret handelte es sich dabei um einfache mathematische Gleichungen bzw. manuelle Geschicklichkeitsübungen. In beiden Fällen war die Atemanhaltezeit deutlich im Vergleich zur Apnoe ohne Ablenkung verlängert.

Konkret bedeutet das: fehlt die Motivation, fehlt auch die Leistung. Werden die unwillkürlichen Zwerchfellkontraktionen, die bei längerer Apnoezeit einsetzen, als unangenehm empfunden, wird die Apnoe beendet. Werden sie hingegen als etwas angenehmes betrachtet und für eine gewisse Zeit ertragen, so verlängert sich zwangsläufig die Apnoezeit. Lenkt der Taucher sich dann noch von dem Problem ‚Ich muss atmen‘ ab, wirkt das synergistisch. Doch nochmals muss hier nachdrücklich betont werden, dass Apnoetaucher im Grenzbereich sich auf einem sehr schmalen Grat befinden!

Doch zurück zur Physiologie und, damit in gewisser Weise zwingend verbunden, zur Anatomie. Konkret soll hier zunächst die Steuerung der Atmung von Interesse sein. Diese Thematik scheint den meisten Tauchern zwar wohlbekannt, tatsächlich sind die Kenntnisse in der Regel aber eher unvollständig.

Es zählt zum Grundwissen eines jeden Tauchers, dass die Steuerung der Atmung im Übergangsbereich zwischen Rückenmark und Gehirn, dem sogenannten verlängerten Mark bzw. der Medulla oblongata, und hier im Atemzentrum erfolgt. Als wesentliche Steuergrößen gelten dabei der Kohlendioxid- und Sauerstoffgehalt des Blutes, bzw. genauer die jeweiligen Partialdrücke. Einigen Tauchern ist dann noch der pH-Wert des Blutes als Regelgröße bekannt. Diese Sicht der Dinge ist auch grundsätzlich korrekt, nur bei weitem nicht vollständig, da eine Vielzahl weiterer Faktoren die Atemsteuerung beeinflussen (Abbildung 1). Die im Hinblick auf das Apnoetauchen wichtigsten Einflussgrößen werden daher im folgenden kurz besprochen:

So spielen Kälterezeptoren der Haut ebenso eine Rolle, wie die Bluttemperatur. Eine Reizung der Kälterezeptoren und/oder ein Abfall der zentralen Bluttemperatur führen zu einer Reizung des Atemzentrums und so zu einer Erhöhung des Atemminutenvolumens. Im Hinblick auf das Apnoetauchen ist dieser Zusammenhang deshalb von Interesse, weil durch Kältereiz und damit verbundener Reizung des Atemzentrums die Fähigkeit zum Luftanhalten eher limitiert ist, in kaltem Wasser die Leistungen daher nicht denen in warmen Wasser entsprechen.

Ein weiterer, wichtiger stimulierender Faktor für das Atemzentrum sind Stresshormone und hier vor allem die Ausschüttung von Adrenalin. Dieses Hormon, entwicklungsgeschichtlich betrachtet gelegentlich auch als ‚Flucht-oder-Kampf-Hormon‘ bezeichnet, stellt im Körper die Weichen für Höchstleistung. Seine erhöhte Ausschüttung bewirkt u.a. ein Angstgefühl, umgekehrt führt Angst oder Aufregung zu seiner Ausschüttung. Eine erhöhte Adrenalinausschüttung führt aber über Steigerung des Blutdrucks und des Herzminutenvolumens nicht nur zu einer Erhöhung des Sauerstoffverbrauchs, sondern, wie erwähnt, auch zu einer Reizung des Atemzentrums. Es handelt sich also im Hinblick auf das Apnoetauchen um begrenzende Faktoren für die Atemanhaltezeit. Aus diesem Grunde sind Aufregung und innere Anspannung, vielleicht auch Angst (z.B. im Wettkampf oder bei Prüfungen) eher hinderlich. An dieser Stelle gehen Physiologie und Psychologie daher Hand in Hand: für ambitionierte Apnoeisten ist daher ein Entspannungstraining eine wichtige Ergänzung des Trainingsplans, denn psychische Gelassenheit reduziert die Ausschüttung von Stresshormonen.

Von besonderer Bedeutung sind auch Dehnungsrezeptoren der Lunge, die vor allem bei vollständigen Inspiration, aber auch bei vollständiger Expiration gereizt werden und dann quasi reflektorisch einen Atemreiz auslösen. Dieses Phänomen erklärt einerseits die Beobachtung, dass nach maximaler Inspiration bei nicht speziell trainierten Schwimmern und Tauchern die Atemanhaltezeit und damit auch die Strecke unter Wasser deutlich geringer ist, als nach submaximaler Inspiration. Andererseits ist aber bei bestimmten Disziplinen des Apnoetaucher gerade die maximale Inspiration von besonderer Bedeutung. Auch ergibt sich der Konflikt, dass die maximale Inspiration zwar einen reflektorischen Atemreiz auslöst, die möglichst vollständig gefüllte Lunge aber den besten Puffer sowohl für CO<sub>2</sub> als auch für Sauerstoff darstellt und somit, zumindest aus Sicht des Gasaustausches, die Atemanhaltezeit erhöht. Untersuchungen zu dieser Fragestellung haben gezeigt, dass eine submaximale Inspiration auf ca. 85 % der Totalkapazität für die Disziplinen Zeit- und Streckentauchen den wohl besten Kompromiss darstellen: die Atemanhaltezeiten unterschieden sich nicht von denen nach maximaler Inspiration, das subjektive Empfinden der Probanden war bei

submaximaler Inspiration aber besser, was bedeutet, dass ein so bedingter Atemreiz nicht bereits frühzeitig unterdrückt werden musste.

Beim Thema Lunge spielen neben den beschriebenen Dehnungsrezeptoren auch die die Lungenvolumina und die anatomischen Verhältnisse im Thoraxbereich eine entscheidende Rolle für die in den verschiedenen Apnoe-Disziplinen erbrachten Leistung. Insbesondere die Veränderungen, die durch reine Immersion, also durch Eintauchen in Wasser, aber auch durch Kompression beim Tieftauchen in Apnoe stattfinden sind von großer Bedeutung. Auf diese Grundlagen und physiologischen Zusammenhänge soll daher im nun folgenden kurz eingegangen werden:

Aus der Tauchausbildung ist bekannt, dass bei der Lunge verschiedene Volumina unterschieden werden können. So wird das totale Fassungsvermögen der Lunge als Totalkapazität bezeichnet, jener Anteil, der durch Atembewegung verändert werden kann als Vitalkapazität und schließlich das Restvolumen, welches auch nach maximal tiefer Expiration in der Lunge verbleibt, als Residualvolumen.

Die Vitalkapazität ist definiert als jenes Volumen, welches nach maximaler Inspiration ausgeatmet werden kann. Sie stellt auch eine jener Größen dar, die bei einer einfachen Lungenfunktionsprüfung, wie sie z.B bei einer Untersuchung auf Tauchtauglichkeit durchgeführt wird, gemessen wird. Das Residualvolumen hingegen entzieht sich einfachen und direkten Messmethoden und kann nur durch aufwendigere Untersuchungsverfahren bestimmt werden. Es gilt nun gemeinhin, dass die Summe aus Vitalkapazität und Residualvolumen die Totalkapazität ergeben, wobei die Vitalkapazität (abgekürzt VC)  $\frac{3}{4}$  der Totalkapazität (TLC) ausmache, das Residualvolumen (RV) hingegen  $\frac{1}{4}$  der TLC. Diese Annahme stimmt aber nur sehr bedingt und stellt lediglich einen groben Mittelwert dar. Tatsächlich ist dieses Verhältnis  $\frac{3}{4}$  zu  $\frac{1}{4}$  nämlich in beide Richtungen veränderbar.

Die VC, und damit auch das RV hängen nämlich ganz wesentlich von der Elastizität des Brustkorbes, und hier im Besonderen des knöchernen Anteils des Thorax ab. Zum besseren Verständnis sei hier erläutert, dass die Rippen im Verbund mit der Wirbelsäule und dem Brustbein keinen absolut starren Käfig bilden, sondern dass die Teilkomponenten grundsätzlich elastisch mit einander verbunden sind. Dies ist vor allem deshalb nötig, weil die Brustatmung sonst nicht möglich wäre. Die einzelnen Rippen sind daher sowohl im hinteren Bereich knorpelig-gelenkig mit den jeweiligen Dornfortsätzen der Wirbelsäule verbunden, im vordern Bereich ebenfalls knorpelig gelenkig mit dem Brustbein.

Je elastischer dieses System aber ist, desto größer ist die verschiebliche Luftmenge der Lunge, und damit die VC. Im Umkehrschluß ist aber auch die in der Lunge verbleibenden Restmenge in diesem Fall kleiner, also das RV.

Steifen hingegen diese gelenkigen Verbindungen ein, nimmt entsprechend die VC ab, das RV aber in gleichem Maße zu. Sieht man einmal von krankhaften Zuständen ab, ist vor allem ein Mangel an Aktivität für solche Einsteifungen zuständig, wobei auch das Altern eine gewisse Rolle spielt. Umgekehrt kann sportliche Aktivität und hier vor allem der Ausdauersport dazu beitragen, diese Verbindungen elastisch zu halten. Einen besonderen Beitrag können neben regelmäßigem Ausdauersport auch besondere Atemübungen und Atemgymnastik leisten. Beides, also trainingsbegleitender Ausdauersport und Atemgymnastik sind daher für ambitionierte Apnoeisten sinnvolle Trainingsergänzungen.

Ein günstiges Verhältnis TLC (bzw. VC) zu RV ist für jede Form des Apnoetauchens von Bedeutung, weil die Lunge, wie bereits weiter oben erwähnt, der wichtigste Sauerstoffspeicher und CO<sub>2</sub>-Puffer des Körpers ist. Von besondere Bedeutung ist es aber vor allem für Dauerzeittaucher und Tieftaucher, denn im ersten Fall gewährleistet eine große VC bei relativ kleinem RV eine rasche Durchlüftung der Lunge und damit einen guten

Gasaustausch in kurzer Zeit, im zweiten Fall determiniert das Verhältnis TLC zu RV neben anderen Größen die maximale Tauchtiefe (siehe unten)

In diesem Zusammenhang ist jedoch festzuhalten, das Eintauchen in Wasser bis zum Hals, die sog. 'Head-out Immersion', einen ganz erheblichen Einfluß auf das Lungenvolumen hat. Eintauchen in Wasser hat grundsätzlich immer eine Umverteilung des zirkulierenden Blutvolumens in den Thoraxraum und damit u.a. in die Lungengefäße zur Folge. Dies ist die Folge hydrostatischer Effekte. Zusätzlich kommt es, ebenfalls durch hydrostatische Effekte hervorgerufen, zu einer Verlagerung des Zwerchfells in Richtung Kopf, was eine Abnahme des Lungenvolumens zur Folge hat. Ist eine maximale Leistungsfähigkeit gefordert, ist es daher zwingend erforderlich, die maximale Inspiration für Tieftauchversuche noch mit dem Oberkörper an Luft durchzuführen und erst unmittelbar danach vollständig in das Wasser einzutauchen. Dies lässt sich am besten sitzend realisieren, weil so ein Hineingleiten ins Wasser möglich ist. Ein Sprung ins Wasser kann hingegen einen inadäquaten Atemreiz auslösen.

Es sei noch kurz bemerkt, dass auch die Elastizität des Zwerchfells, also quasi die ‚Hochwölbungsfähigkeit‘ in gewisser Weise trainierbar ist und eine Bedeutung vor allem für das Tieftauchen hat. Die Übungen hierzu bestehen (vereinfacht ausgedrückt) im ‚Bauch einziehen‘, also im Training der queren Bauchmuskulatur (M. transversus abdominis). Ebenso sei bemerkt dass Übergewicht mit erhöhtem Bauchfettanteil sich ähnlich negativ auf das Zwerchfell und damit auf das Lungenvolumen auswirken kann, wie das Eintauchen in Wasser, weil der Bauchfettanteil eine mehr oder minder starke Hochwölbung des Zwerchfells bewirkt. Dies sollte vor allem von ambitionierten Apnoeisten bedacht werden.

Beim Thema Tieftauchen für viele die in diesem Bereich erbrachten Leistungen geradezu mystisch, scheinen sie doch im krassen Gegensatz zur Physik und zur Physiologie zu stehen. Doch gerade auch hier ist das Gegenteil der Fall: die Kenntnis der zugrundeliegenden physiologischen Vorgänge führt nicht nur zum Verstehen der Leistung, sondern auch zum Erkennen der möglichen Grenzen. Und besonders der letztgenannte Aspekt rechtfertigt die Erklärung im Zusammenhang mit der Thematik dieses Kapitels.

Wie bereits weiter oben erwähnt, stellt den wesentlichen limitierenden Faktor für das Tieftauchen in Apnoe das Verhältnis von TLC zu RV im Taucher dar. Wie ebenfalls vorab erwähnt ist dieses Verhältnis keinesfalls immer gleich, sondern kann interindividuell stark variieren. Doch trotz dieser Variation kommt man bei Berechnungen immer wieder erstaunlich exakt auf die in allen Lehrbüchern angegebene maximale Tiefe von 30 bis 35 m.

Als Beispiel hierfür diene der wohl bekannteste Apnoe-Taucher der Neuzeit, Pipin Ferreras, besser bekannt nur als ‚Pipin‘:

Seine Lungenparameter sind bekannt: seine TLC beträgt 9,6 Liter, sein RV wurde mit 2,2 Litern bestimmt. Bildet man nun das Verhältnis TLC:RV, erhält man die maximale Tiefe in bar. Also:  $9,6:2,2 = 4,4$ , was einer theoretisch maximalen Tauchtiefe von 34 Metern entspräche ( $4,4 \text{ bar} = 34 \text{ m}$ ). Tatsächlich liegt sein Rekord aber mehr als 100 m tiefer. Was passiert also wirklich?

Tatsächlich werden durch die Zunahme des Umgebungsdrucks die Alveolen der Lunge gemäß dem Gesetz von Boyle und Mariotte zusammengedrückt und das in ihnen befindliche Atemgas entsprechend komprimiert. Neben den Alveolen finden sich aber noch weitere Strukturen in der Lunge, die grundsätzlich ebenfalls in der Lage sind, ihren Innendurchmesser zu variieren, nämlich die Lungengefäße. Und durch die Abnahme der Alveolarvolumina kommt es zu einem relativen Unterdruck in der Lunge, der einen vermehrten venösen Rückstrom von Blut in die Lungengefäße zur Folge hat, so dass diese sich vermehrt mit Blut füllen. Diese vermehrte Füllung wiederum hat zur Folge, dass der Durchmesser der einzelnen

Blutgefäße größer wird, so dass der durch die Schrumpfung der Alveolen geschaffenen Raum (dies ist eine vereinfachte Darstellung!) nun durch die vermehrt gefüllten Blutgefäße eingenommen wird. Dies hat einerseits zur Folge, dass es (in gewissen Grenzen) eben nicht zur prognostizierten Lungenschädigung kommt, zum anderen aber, dass das RV um jenen Betrag schrumpfen kann, um den sich das Blut umverteilt.

Gemessen und nachgewiesen sind im Experiment bislang 1,53 Liter Blut, die sich in die Lungengefäße umverteilen. Rechnet man nun erneut nach, findet sich erstaunliches:

bei Blutumverteilung von 1,53 l in den Brustkorb schrumpft RV auf 0,67 l, also:

$TLC = 9,6 \text{ l}$ ,  $RV[\text{korr.}] = 0,67 \text{ l}$ ;  $9,6 : 0,67 = 14,3$ , was einer Tiefe von 133 m entspricht.

Und genau hier lag zwischenzeitlich mal sein Rekord.

Dieser hier beschriebene Effekt wird auch als *blood-shift* bezeichnet. Es ist jedoch ganz klar herauszustellen, dass es sich dabei **nicht** um eine Anreicherung von Blut in den Alveolen oder gar Quellung der Alveolarmembranen handelt, wie immer wieder völlig falsch dargestellt, sondern um eine vorübergehende vermehrte Füllung der Blutgefäße der Lunge. Es ist zwar richtig, dass in Einzelfällen auch Flüssigkeit in den Alveolen gefunden werden kann, das aber immer als Folge eines (im Verhältnis zu den Möglichkeiten des Betroffenen) zu tiefen Tauchens. Eine solche Flüssigkeitsansammlung oder gar Einblutung in die Alveolen wird als alveoläres Lungenödem oder (mit Einblutung) Hämorrhagie genannt und ist nicht so ohne weiteres umkehrbar. Im Gegenteil, es ist immer potentiell lebensbedrohlich und hat immer eine intensivmedizinische Behandlung zur Folge. Der Blood-shift ist, wie dargestellt, etwas völlig anderes (Abbildung 2).

Wie beschrieben verändert der Blood-shift also die eine Seite der Gleichung  $TLC:RV = \text{Tauchtiefe}$  und allein durch ihn lassen sich schon so unglaubliche Tiefen wie die noch 1998 geltenden Rekorde erklären. Mittlerweile ist die Tiefengrenze jedoch schon ein Stück weiter nach unten verschoben worden. Dazu ist zu sagen, dass die absolut mögliche Umverteilungsmenge bislang nicht bekannt ist. Die Tauchmediziner wissen, dass in jedem einzelnen die Dehnbarkeit der Lungengefäße das jeweilige Tiefenlimit darstellen und dass ein Überschreiten dieses Limits zum lebensbedrohlichen Zerreißen der Lungengefäße führen kann. Wieviel Blut indes maximal verschoben werden kann, bevor es im Einzelfall zu einem solchen fatalen Einreißen kommt, ist nicht bekannt. Es ist daher anzunehmen, dass die nachgewiesenen 1,53 Liter nicht zwingend das Maximum darstellen, und auf diese Weise für Pippin größere Tiefen erreichbar sind.

Eine weitere Möglichkeit an der Tiefenschraube zu drehen stellen Veränderungen an der anderen Seite der Gleichung dar, nämlich Veränderungen an der TLC. Dies ist in sehr engen Grenzen durch eine Verbesserung der Thoraxelastizität möglich, oder durch das sogenannte *lung-packing* bzw. auch *buccal pumping*. Es handelt sich hier um eine Besondere Einatemtechnik, die es dem Kundigen erlaubt, nach einer maximalen Inspiration noch (ebenfalls nachgewiesen) bis zu 2 Liter Luft in die Lunge zu pressen. Es sei hier bemerkt, dass auch hier nicht bekannt ist, was das Maximum des Möglichen darstellt, und dass es sich dabei um eine willentlich herbeigeführte Überblähung der Lunge handelt, die auf Dauer nicht ohne negative Folgen für das Lungengewebe sein kann. Obwohl diese Technik von den Tauchmedizinern durchaus mit einer gewissen Sorge betrachtet wird, betet sie dem Athleten die Möglichkeit, deutlich größere Tiefen zu erreichen. Betrachtet man sich die obige Rechnung unter diesem Aspekt erneut, so ergibt sich für Pippin:

Bei zusätzlicher TLC – Vergrößerung durch Lung-Packing um 2 l:

$TLC [\text{korr.}] = 11,6 \text{ l}$ ,  $RV[\text{korr.}] = 0,67 \text{ l}$ ;  $11,6 : 0,67 = 17,3$ , was einer Tauchtiefe von nun 163 m entspricht und dem derzeitigen Rekord von 162 m schon sehr nahe kommt.

Es sei aber deutlich darauf hingewiesen, dass sowohl durch lung-packing, als auch durch exzessiver Volumenüberladung der Lungengefäße schwere bis lebensbedrohlich Störungen

der Gesundheit auftreten können, die neben der bekannten Gefahr der Flachwasserohnmacht zu einem vorzeitigen Ende einer hoffnungsvollen Karriere als Apnoetaucher führen können. Darüber hinaus sei angemerkt, dass auch wiederholtes Luftanhalten bis an die Black-out Grenze nicht zwingend gesund für das Gehirn sind, so dass es auch hier zu bislang noch nicht bekannten Langzeitschäden kommen kann. Dies sollten vor allem jene Taucher bedenken, die das Apnoetauchen als sinnvolle Ergänzung ihres Hobbies sehen und als Möglichkeit der Entspannung.

Dieser Artikel sollte daher die physiologischen Hintergründe erläutern, über falsches und richtiges aufklären und jenen die Möglichkeit geben ihr Training gezielt zu verbessern, die sich dieser faszinierenden Art des Tauchens verschrieben haben, ohne dabei die natürlichen Grenzen zu vergessen.

### **Weiterführende Literatur:**

1. Schagatay E, van Kampen M, Emanuelsson S, Holm B. Effects of physical and apnea training on apneic time and the diving response in humans. *Eur J Appl Physiol.* 2000;82:161-9.
2. Boussuges A, Pinet C, Thomas P, et al. Haemoptysis after breath-hold diving. *Eur Respir J.* 1999;13:697-9.
3. Sala-Sanjaume J, Desola Ala J, Geronimo Blasco C, et al. The intrathoracic hypertension syndrome in a breath-hold diver. *Med Clin (Barc).* 1998;111:798.
4. Andersson J, Schagatay E. Arterial oxygen desaturation during apnea in humans. *Undersea Hyperb Med.* 1998;25:21-5
5. Schagatay E, Andersson J. Diving response and apneic time in humans. *Undersea Hyperb Med.* 1998;25:13-9.
6. Andersson J, Schagatay E. Effects of lung volume and involuntary breathing movements on the human diving response. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol.* 1998;77:19-24
7. Boussuges A, Succo E, Bergmann E, Sainy JM. Intra-alveolar hemorrhage. An uncommon accident in a breath holding diver. *Presse Med.* 1995;24:1169-70
8. Manley L. Apnoeic heart rate responses in humans. A review. *Sports Med.* 1990 May;9(5):286-310
9. Ferrigno M, Ferretti G, Ellis A, Warkander D, Costa M, Cerretelli P, Lundgren CE. Cardiovascular changes during deep breath-hold dives in a pressure chamber. *J Appl Physiol* 1997;83:1282-90
10. Grassi B, Ferretti G, Costa M, Ferrigno M, Panzacchi A, Lundgren CE, Marconi C, Cerretelli P. Ventilatory responses to hypercapnia and hypoxia in elite breath-hold divers. *Respir Physiol.* 1994;97:323-32.
11. Liner MH, Ferrigno M, Lundgren CE. Alveolar gas exchange during simulated breath-hold diving to 20 m. *Undersea Hyperb Med.* 1993;20:27-38.
12. Ferretti G, Costa M, Ferrigno M, Grassi B, Marconi C, Lundgren CE, Cerretelli P. Alveolar gas composition and exchange during deep breath-hold diving and dry breath holds in elite divers. *J Appl Physiol.* 1991;70:794-802.
13. Qvist J, Hurford WE, Park YS, Radermacher P, Falke KJ, Ahn DW, Guyton GP, Stanek KS, Hong SK, Weber RE, et al. Arterial blood gas tensions during breath-hold diving in the Korean ama. *J Appl Physiol.* 1993;75:285-93
14. Liner MH. Cardiovascular and pulmonary responses to breath-hold diving in humans. *Acta Physiol Scand Suppl.* 1994;620:1-32.
15. Sterba JA, Lundgren CE. Breath-hold duration in man and the diving response induced by face immersion. *Undersea Biomed Res.* 1988;15:361-75.

Verfasser:

Dr. med. Claus-Martin Muth

Facharzt für Anästhesiologie, Spez. Schmerztherapie  
Sportmedizin, Tauch- und Überdruckmedizin (GTÜM)

Staatl. anerkannter Tauchlehrer, CMAS TL \*\*\*, DLRG TL III

Universitätsklinik für Anästhesiologie, Universität Ulm

Steinhövelstr. 9

89075 Ulm

### **Legenden zu den Abbildungen:**

#### **Abbildung 1:**

**Wichtige Regelgrößen des Atemzentrums im verlängerten Mark (Medulla oblongata)**

(siehe Text). Grafik modifiziert nach:

Silbernagl/Despopoulos. Tachenatlas der Physiologie, Thieme Verlag

#### **Abbildung 2:**

**Vergleich Blood-Shift gegen intraalveoläres Lungenödem in schematisch vereinfachter Form**

Beim Bloodshift kommt es zur Umverteilung von Blut in die Lungengefäße (hier dargestellt nur die Lungenkapillare), wobei es in Extremfällen konsekutiv auch zum Zerreißen der Gefäße oder zum Austritt von Blutplasma kommen kann.

Beim intraalveolären Lungenödem kommt es hingegen zur Flüssigkeitsansammlung in der Alveole. Dies kann, wie erwähnt, auch die Folge einer Überlastung des Systems durch einen Blood-Shift sein, ist dann aber pathologisch und potentiell lebensbedrohlich (siehe Text).