

Ein kritischer Überblick über den gegenwärtigen Stand der angewandten Tieftauchphysiologie*

H. R. SCHREINER

Forschungslaboratorium der Linde Division der Union Carbide Corporation
Tonawanda (USA)

Eingegangen am 14. Juni 1968

The Current Status of Applied Deep Diving Physiology: A Critical Overview

Summary. The physical facts of submergence determine the physiological problems which limit man's ability to dive successfully to great depths. Chief among these is the hydrostatic pressure to which the deep diver is exposed, and which must be compensated by the pressure of the diving gas mixture which he is breathing. Since oxygen exerts toxic effects even at relatively low pressures, it becomes necessary to employ inert diluents such as nitrogen or helium to achieve this pressure compensation. This requirement in turn, creates additional problems which are caused by (1) the biological activity of all so-called "inert" gases (2), effects of the physical properties of compressed gas mixtures, and (3) the uptake of inert gases by the tissues of the body. These problems are closely interrelated; for example, increased gas density leads to carbon dioxide retention which in turn enhances simultaneously the narcotic effect of inert gases and their uptake by the tissues of the body.

The physiological limitations of useful human existence under water are being explored by determining the mental and work performance of divers exposed to elevated environmental pressures for extended periods of time. Since 1962 more than 90 such saturation exposures (exposures lasting at least 24 hours) have been carried out in laboratory chambers and in undersea habitats at pressures ranging up to 27 ata (1 ata = 735.6 mm Hg). Under these conditions no serious detriments to human performance have been determined to date as long as environmental parameters such as temperature, composition of breathing gas mixture, etc., remained carefully optimized.

The decompression of divers from working dives short of saturation is still associated with significant risks of decompression sickness. However, this risk is steadily being reduced by the application of increasingly sophisticated mathematical models of inert gas transport. These models provide basic guidelines for the safe decompression of deep divers. They do require, however, further verification and refinement by applied physiological investigations into the mechanism of inert gas transport and decompression sickness. The eventual goal of such studies is to give the deep diver the capability to carry out safely, and with maximum efficiency, all mental and physical tasks required of him.

The decompression of divers from working dives short of saturation is still associated with significant risks of decompression sickness. However, this risk is steadily

* Nach einem Vortrag auf dem 2. Marinemedizinisch-wissenschaftlichen Symposium in Kiel am 4. 5. 1968.

being reduced by the application of increasingly sophisticated mathematical models of inert gas transport. These models provide basic guidelines for the safe decompression of deep divers. They do require, however, further verification and refinement by applied physiological investigations into the mechanism of inert gas transport and decompression sickness. The eventual goal of such studies is to give the deep diver the capability to carry out safely, and with maximum efficiency, all mental and physical tasks required of him.

Zusammenfassung. Physikalische Faktoren beim Tauchen bestimmen die physiologischen Probleme, die das Tauchen in großen Wassertiefen begrenzen. Wesentlich ist der hydrostatische Druck, dem der Taucher ausgesetzt ist und der ausgeglichen werden muß durch den Druck des Tauchgasgemisches, das er einatmet. Da Sauerstoff schon bei verhältnismäßig niedrigem Druck toxische Erscheinungen hervorruft, wurde es notwendig, Inertgase zu verwenden, wie z. B. Stickstoff oder Helium, um diesen Druckausgleich zu erreichen. Diese Bedingung bringt jedoch zusätzliche Probleme, die hervorgerufen werden

1. durch die biologische Aktivität von allen sogenannten „Inert“-Gasen,
2. durch Effekte der physikalischen Eigenschaften von Gasdruckgemischen und
3. durch das Aufnehmen von Inertgasen durch das Körpergewebe.

Die Probleme sind untereinander verwoben, z. B. erhöhte Gasdichte führt zu Kohlendioxyd-Retention, diese aber steigert gleichzeitig den narkotischen Effekt der Inertgase und ihre Aufnahme durch das Körpergewebe. Die physiologischen Grenzen für eine menschliche Tätigkeit unter Wasser wurden zunächst durch die Arbeitsleistung von Tauchern, die für ausgedehnte Zeitabschnitte erhöhten Umgebungsdrücken ausgesetzt waren, bestimmt.

Seit 1962 wurden mehr als 90 solcher Sättigungsversuche (Versuchsdauer zuletzt 24 Std) in Laboratoriumskammern und in Unterwasserhäusern bei einem Druck bis zu 27 ata durchgeführt. Unter diesen Bedingungen konnten keine ernsthaften Schäden und keine ernsthafte Minderung der menschlichen Leistungsfähigkeit festgestellt werden, solange die Umgebungsparameter — Temperatur, Zusammensetzung des Atemgasgemisches etc. — sorgfältig optimal abgestimmt wurden.

Die Dekompression von Tauchern kurz vor Sättigung ist noch mit bedenklichen Risiken der Druckfallkrankheit verbunden. Dieses Risiko wird jedoch immer mehr reduziert durch Verwendung immer hochentwickelterer mathematischer Modelle des Inertgas-Transportes im Organismus. Diese Modelle versprechen richtliniengebende Werte für die sichere Dekompression von Tieftauchern.

Das Endziel solcher Studien ist es, dem Tieftaucher die Möglichkeit zu geben, alle ihm gestellten psychischen und physischen Aufgaben sicher und mit einem Maximum an Leistungsfähigkeit auszuführen.

„Wir befinden uns heute lediglich an der Schwelle unseres Wissens über die Meere der Welt. Die Bedeutung der Ozeane für die Landesverteidigung, die Wettervorhersage, die Erzeugung von Nahrungsmitteln und die Förderung von Bodenschätzen liegt auf der Hand. Das Meer wirklich verstehen zu wollen, ist mehr als bloße Wißbegierde: unsere Zukunft mag wohl von diesem Verständnis abhängen.“

JOHN FITZGERALD KENNEDY, März 1961

Mit diesen Worten hat Präsident KENNEDY vor 7 Jahren den damaligen Stand der Meereskunde umrissen. Mit fast identischen Worten

könnte man den gegenwärtigen Stand der angewandten Tieftauchphysiologie beschreiben. Noch nie in der Geschichte der Menschheit hat das Meer soviel für die weitere Entwicklung, ja sogar für das Überleben der Menschheit bedeutet wie heute.

Diese wirtschaftliche und militärische Bedeutung des Meeres und ganz besonders der Festlandsockel der Kontinente ist in den letzten Jahren der ganzen Welt bewußt geworden [33], was zur Folge hatte, daß heute den Problemen der Tieftauchphysiologie ein erneutes und stark erweitertes Interesse entgegengebracht wird.

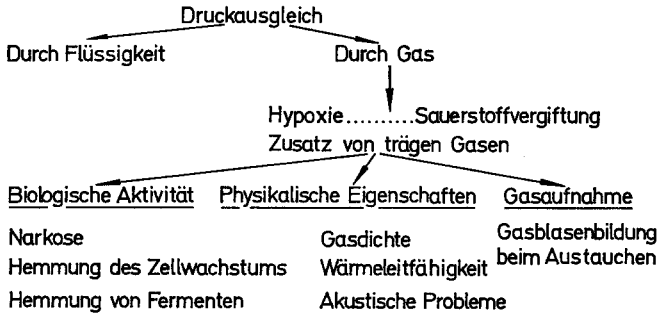
Die Probleme des Tieftauchens leiten sich aus den mit dem Eintreten des Tauchers unter eine Wassersäule erheblicher Höhe zusammenhängenden physikalischen Umständen und deren Einwirkung auf die Grenzen, die die Physiologie dem Menschen setzt, ab. Es ist die Aufgabe der Tieftauchphysiologie, sich mit diesem Problem auseinanderzusetzen, sie zu verstehen und aus diesem Verständnis Verfahren zu entwickeln, die den Taucher unter Wasser am Leben und bei großer Leistungsfähigkeit erhalten und es ihm überdies ermöglichen, ohne Schaden zur Wasseroberfläche zurückzukehren. Es ist der Zweck dieser Darstellung zu prüfen, welchen Fortschritt die Tieftauchphysiologie in der Erfüllung dieser Aufgaben zu verzeichnen hat.

Seewasser

<i>Physikalische Eigenschaften</i>	<i>Biologische Bedeutung</i>
Temperatur und Wärmeleitfähigkeit	Wärmeverlust
Lichtbrechung und Absorption	Sehvermögen
Salzgehalt und Oberflächenspannung	Schwächung der Hautstruktur
Spezifisches Gewicht	Annähernde Gewichtslosigkeit
Masse	Druck

Die für das Tauchen wichtigen physikalischen Eigenschaften des Meerwassers sind dessen Temperatur und Wärmeleitfähigkeit, Brechung und Absorption des Lichtes, Salzgehalt und Oberflächenspannung, sein spezifisches Gewicht, welches den Auftrieb von versenkten Objekten bestimmt, und schließlich seine Masse, welche den Druck, den die Meeressäule ausübt, verursacht. Die mit diesen Eigenschaften zusammenhängenden biologischen Folgen, wie erhöhter Wärmeverlust, vermindertes Sehvermögen, Schwächung der Hautstruktur und die annähernde Gewichtslosigkeit des Körpers, stellen wichtige Tauchprobleme dar: das Kernproblem des Tieftauchens jedoch leitet sich aus der Tatsache ab, daß die Lunge nicht mehr in der Lage ist, schon bei kleinen unkompenzierten Erhöhungen des Außendruckes ihrer Atmungsaufgabe nachzu-

gehen. Durch den für die Erhaltung der Atmungsfunktion erforderlichen transthorakalen Druckausgleich entsteht nämlich eine Vielzahl miteinander verwobener und nicht leicht lösbarer Probleme (Schema).



Schema

Theoretisch gesprochen, kann der durch das Tauchen verursachte Druckanstieg durch die Einführung von Flüssigkeiten oder von komprimierten Gasen in die Lunge ausgeglichen werden. Die Möglichkeit der Verwendung von in physikalischer Kochsalzlösung oder in fluorierten Kohlewasserstoffverbindungen gelöstem Sauerstoff als Atmungsmittel des Säugetiers wurde in den letzten Jahren wiederholt versuchsweise unter Beweis gestellt [36]. Es ist im Augenblick jedoch noch nicht abzusehen, ob eine Flüssigkeit einmal das Atmungsmittel des Tauchers werden wird.

Die Giftigkeit des Sauerstoffs in erhöhter Konzentration, die sich, wie wir noch ausführlicher hören werden, in Lungenschäden und Funktionsstörungen des Zentralnervensystems auswirkt, schließt seine alleinige Verwendung als Druckausgleichsmittel für tiefe Tauchgänge aus. Da die Zeit- und Druckgrenzen der Sauerstoffintoxikation ziemlich gut bekannt sind [37] (Abb. 1), läßt sich diese durch die Verwendung von Verdünnungsgasen einfach umgehen. Praktisch gesehen kann sich jedoch die Spanne zwischen dem noch nicht hypoxischen Mindestwert und dem noch nicht giftigen Höchstwert des Sauerstoffpartialdrucks bei Langzeittauchversuchen bis auf ungefähr 0,3 ata verringern (Abb. 2), was besonders bei großer Tiefe, d. h. bei hohem Totaldruck, auf die Sauerstoff-Meß- und Regelungstechnik unerhört hohe Präzisions- und Verlässlichkeitsansprüche stellt, die zumindest im Falle des frei schwimmenden Tauchers heute noch nicht befriedigt werden können.

Die Verwendung von Inertgasen in Tieftauch-Atemgemischen (Schema) bringt drei große Problemkreise mit sich:

Diese sind erstens die allgemeine biologische Wirksamkeit der sogenannten Inertgase [55], zweitens die Veränderung der physikalischen

Eigenschaften des den Taucher umgebenden Gasgemisches und drittens die Aufnahme und Speicherung von Gasen, die nicht am Stoffwechsel teilnehmen, die die Notwendigkeit des Druckausgleiches mit sich bringt.

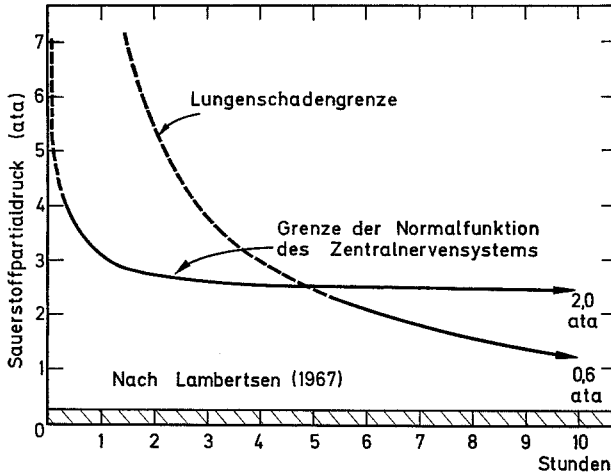


Abb. 1

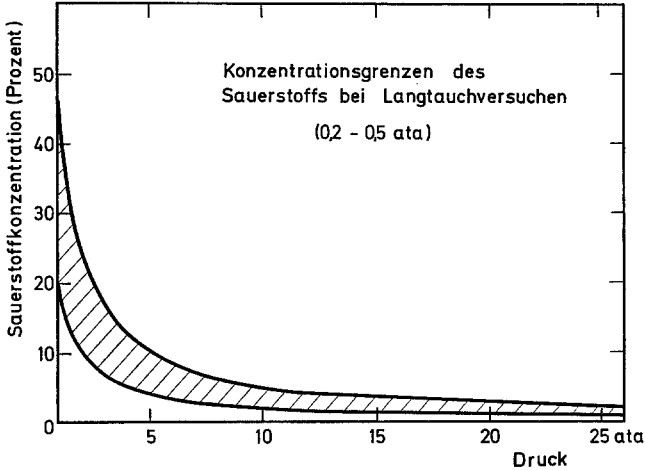


Abb. 2

Sie ist die schwierigste, da durch sie bei tiefen Tauchgängen die Gefahr der Druckfallkrankheit hervorgerufen wird [52, 47, 27].

Die bekannten narkotischen Wirkungen der Inertgase [4] sind nicht deren einzige biologische Auswirkungen. Liegen nämlich diese Gase in genügend großer Konzentration vor, dann hemmen sie zum Beispiel

ohne Ausnahme das Wachstum der Zellen in einer Gewebekultur. Die in der Abb. 3 wiedergegebenen idealisierten Versuchsergebnisse [8, 51] zeigen deutlich den unterschiedlichen Wirkungsgrad der verschiedenen

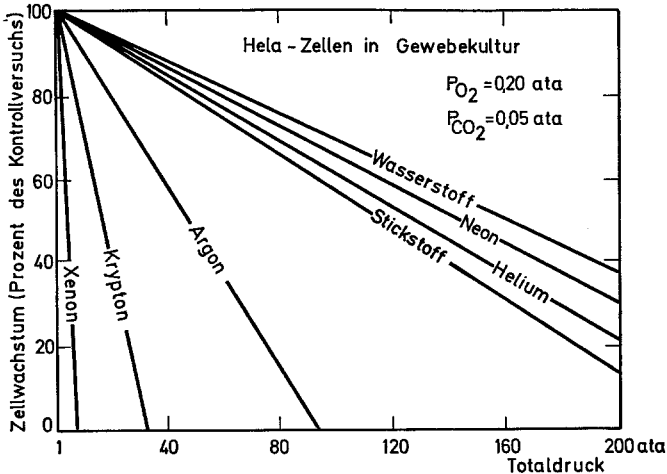


Abb. 3

geprüften Gase, der von einer minimalen Wachstumsbehinderung durch Sauerstoff, Neon, Helium und Stickstoff über Argon und Krypton bei Xenon seinen Höchstwert erreicht. Dieses Gas behindert das Wachstum der untersuchten Zellen um nicht weniger als 17% per ata Partialdruck. Der Unterschied im Wirkungsgrad der leichten Gase und der drei anderen schwereren Gase ist statistisch gesichert. Daraus ist zu schließen, daß die Beeinflussung des Zellwachstums in diesen Versuchen nicht allein durch den erhöhten Druck, sondern durch eine molekulare Einwirkung der Gase auf die Zelle zustande gekommen sein muß. Dabei kann aber eine Beteiligung einer reinen Druckkomponente im Augenblick nicht ausgeschlossen werden [6]. Da auch qualitativ ähnliche Hemmungen der Aktivität gereinigter Enzyme durch diese Gase [14] beobachtet worden sind, müssen wir erkennen, daß die sogenannten Inertgase in Wirklichkeit pharmakologische Wirkstoffe sind. Im allgemeinen ist es nicht möglich, diese Gase auf ein physiologisches System einwirken zu lassen, ohne damit auch gleichzeitig die physikalischen Eigenschaften des gasförmigen Milieus, wie zum Beispiel dessen Dichte und Wärmeleitfähigkeit, zu verändern. Eine Differenzierung zwischen physikalischer und pharmakologischer Auswirkung eines der Inertgase auf das Tier oder den Menschen ist deshalb oft sehr schwierig. Ein gutes Beispiel dafür ist der wohlbekannte erhöhte Wärmeverlust [50] und der beschleunigte Stoffwechsel, den das Helium in Warmblütlern verursacht.

Ohne detailliertes Studium der Sachlage darf man nicht ohne weiteres annehmen, daß hier ein durch die große Wärmeleitfähigkeit des Heliums hervorgerufener physikalischer Effekt vorliegt, denn es könnte sich ja auch um eine pharmakologische Auswirkung des Heliums handeln. Wenn man aber den Sauerstoffverbrauch von Ratten und Kaninchen in verschiedenen Gasgemischen und unter verschiedenem Druck bestimmt [23] (Abb. 4), und die erhaltenen Werte gegen den berechneten relativen

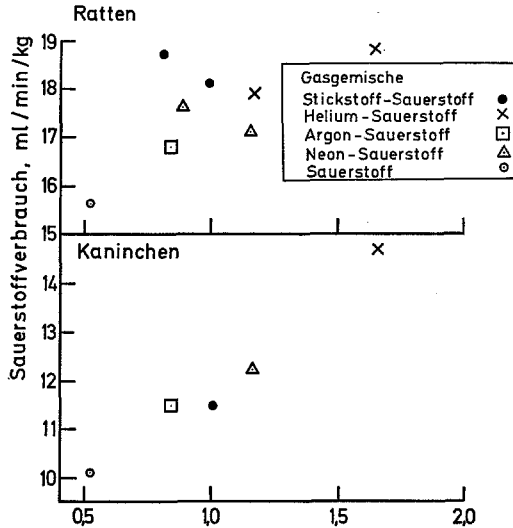


Abb. 4. Berechneter konvektiver Wärmeverlust in die Gasmasse im Vergleich zu Luft bei 1 ata

konvektiven Wärmeverlust des Tieres an seine gasförmige Umgebung aufträgt, so drängt sich der Schluß auf, daß hier kein wie in den Zellversuchen beobachteter pharmakologischer Effekt vorliegt. Ein anderes Beispiel eines rein physikalischen Effektes ist die Beeinflussung der menschlichen Stimme durch Helium oder Wasserstoff [20]. Obwohl dieses Problem auf elektronischem Wege lösbar ist [18], sind entsprechende Geräte zur Verständlichmachung der Helium- oder Wasserstoffstimme erst im Entwicklungsstadium.

Erhöhte Gasdichte [42], die Verwendung von Atemgeräten und körperliche Betätigung, besonders unter Wasser [1, 2], zeigen die Tendenz, den alveolären Kohlensäurespiegel zu heben [38]. Es ist wichtig, im groben Umriß festzuhalten, daß das Verhalten der Kohlensäurekonzentration im Körper mit einer Reihe von Tauchproblemen in innigem Zusammenhang steht (Abb. 5). So erhöht ein Anstieg der Kohlensäurekonzentration die narkotische Wirkung von Inertgasen und erwirkt gleichzeitig eine

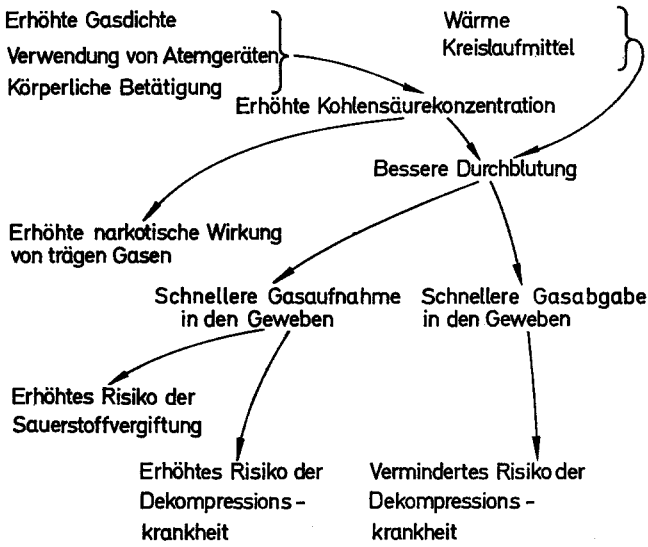


Abb. 5

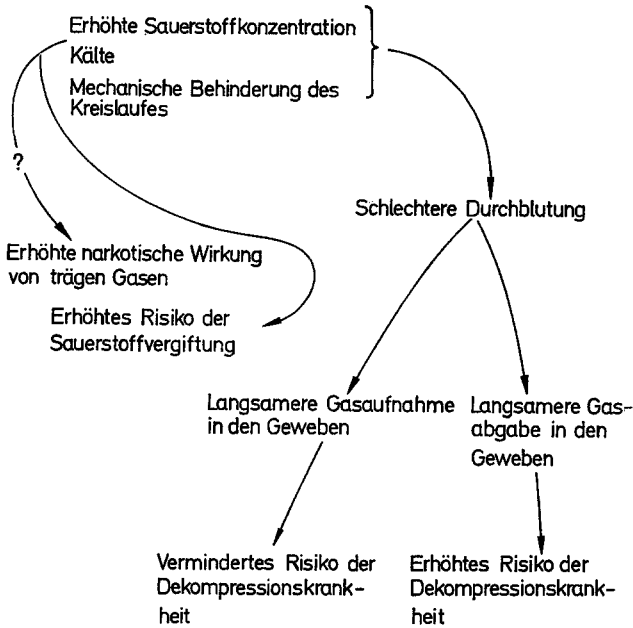


Abb. 6

verbesserte Durchblutung der Gewebe. Diese bessere Durchblutung, wie immer sie auch hervorgerufen worden sein mag, beschleunigt den Gas-transport im Gewebe. Diese Beschleunigung kann sich zum Vor- oder Nachteil des Tauchers auswirken, je nachdem, ob die Durchblutung unter dem Maximaldruck des Tauchganges oder beim Abtauchen erhöht wird. Daß durch eine verbesserte Durchblutung sich auch die Gefahr der

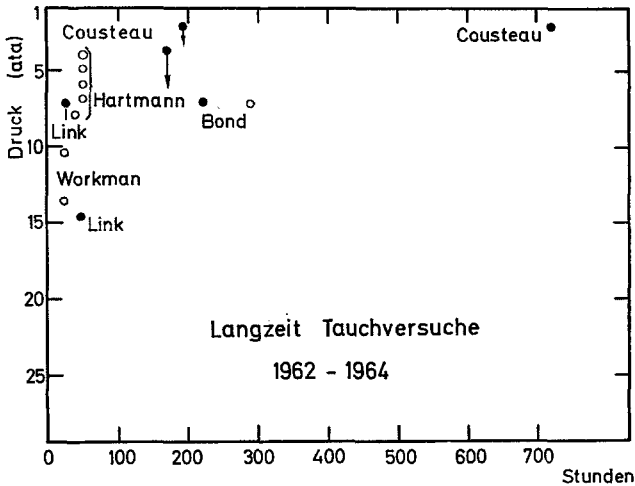


Abb. 7

Sauerstoffvergiftung erhöht [37], sei hier nur am Rande vermerkt. Bei kurzen Tieftauchgängen ist es möglich (Abb. 6), durch die Atmung von Sauerstoff unter sehr hohem Partialdruck die Aufnahme von Inertgasen in den Geweben auf ein Minimum zu reduzieren und dadurch das Risiko der Druckfallkrankheit zu vermindern, wenn man gewillt ist, die erhöhte Gefahr einer Sauerstoffvergiftung in Kauf zu nehmen. Ob ein erhöhter Sauerstoffpartialdruck die narkotische Wirkung von Inertgasen erhöht, ist nicht geklärt, eine solche Annahme entbehrt jedoch nicht jeglicher Grundlage [15]. Beim Abtauchen, wo in der Praxis Sauerstoff unter hohem Partialdruck geatmet wird, um die Entfernung des aufgenommenen Inertgases zu beschleunigen, bringt die von Sauerstoff [19], aber auch von Kälte oder mechanischen Behinderungen des Kreislaufs hervorgerufene verminderte Durchblutung der Gewebe eine gegenläufige, langsamere Gasabgabe aus den Geweben mit sich. Wenn dieser Umstand bei der Erstellung von Tauchtabelle unberücksichtigt bleibt, kann beim Austauchen das Atmen von Sauerstoff bei hohen Partialdrucken in dieser paradoxen Weise die Gefahr der Druckfallkrankheit erheblich erhöhen.

Die Untersuchung dieser mannigfaltigen Probleme des Tieftauchens hat in den letzten Jahren gute und systematische Fortschritte gemacht.

Die Grenzen der menschlichen Koexistenz mit den in der Meerestiefe herrschenden physikalischen Gegebenheiten sind in einer großen Anzahl von Langzeit-Tauchversuchen, d. h. Tauchversuchen mit einer Aufenthaltsdauer von mindestens 24 Std unter Maximaldruck, bestimmt worden. Im Jahre 1962 (Abb. 7) begannen LINK [58, 17, 41], BOND [48] und COUSTEAU [10] mit einer Reihe von sorgfältig ausgearbeiteten Druck-

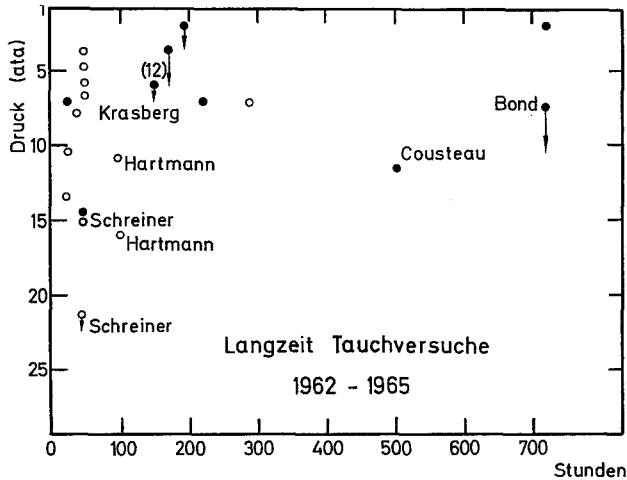


Abb. 8

kammer- (weiße Symbole) und Tiefseeversuchen (schwarze Symbole). Sowohl die Anzahl der sich mit solchen Versuchen befassenden medizinisch-wissenschaftlichen Forscher, als auch der jeweils erzielte Höchstdruck sind seit dieser Zeit systematisch gestiegen [26, 49, 32, 9, 59]. Im Jahre 1965 (Abb. 8) erreichte unsere Gruppe einen Druck von 21 ata [24] mit einem Aufenthalt von 48 Std und führte einen kurzen Vorstoß auf etwas über 22 ata aus. In diesem Jahr begann in den Vereinigten Staaten auch die kommerzielle Anwendung des Sättigungstauchens. Dies geschah erstmalig durch die Firma Westinghouse, die auf diesem Wege die Reparatur einer Dammanlage unter ungefähr 6 ata in die Wege leitete.

Im folgenden Jahr (Abb. 9) erreichte das Institut für Flugmedizin der Deutschen Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt in Bad Godesberg [25] 23 ata mit einer Aufenthaltszeit von 100 Std. In diesem Jahr begannen auch die hier nicht dargestellten Langzeit-Tauchversuche der Sowjet-Union, IKHTIANDR — 66 [3] (7 Tage unter 2 ata) und SADKO (1 Monat unter 3,5 ata) [11]. Im selben Jahr wurde in Vorbereitung einer neuen Stufe des Sea-Lab-Programmes der amerikanischen Kriegsmarine eine großangelegte Serie von Langzeit-Tauchversuchen in der Druckkammer mit Vorstößen auf größere Tiefe in Angriff genommen und im

Jahre 1967 weitergeführt (Abb. 10), wobei reiche Erfahrungen gesammelt werden konnten. Zu Beginn dieses Jahres (Abb. 11) erreichte die amerikanische Kriegsmarine den Druck von 27 ata mit einem kurzen Vorstoß

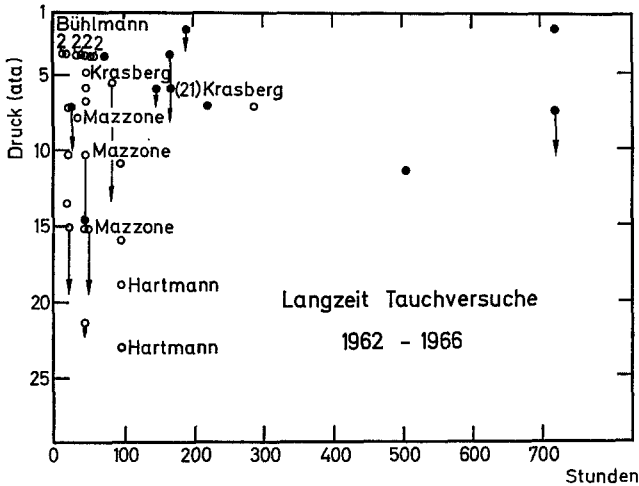


Abb. 9

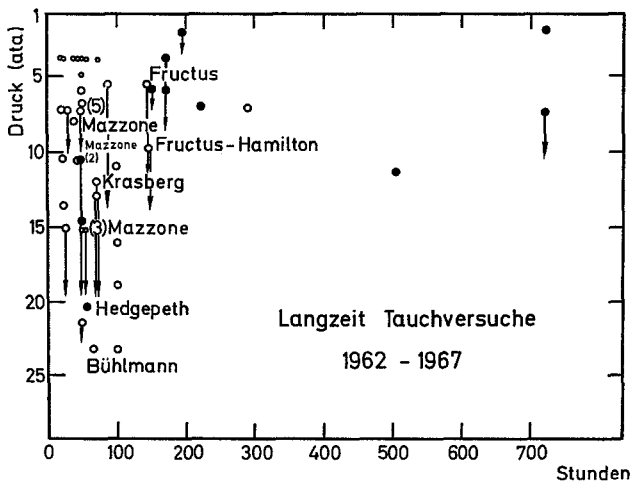


Abb. 10

auf 33 ata. Kurz darauf erreichte eine amerikanische Tauchfirma, allerdings auf weitaus kürzere Zeit, einen Höchstdruck von 26 ata mit einem kurzen Vorstoß auf 35 ata.

Ohne auf die Einzelheiten dieser Versuche eingehen zu wollen, kann gesagt werden, daß dem Aufenthalt des Menschen für die bisher unter-

suchten Zeit- und Druckwerte (maximal 48 Std bei 27 ata) (Tabelle 1) keine gesundheitlichen Grenzen gesetzt sind, solange die geatmeten Gasgemische und andere Faktoren, wie z. B. die Temperatur, innerhalb opti-

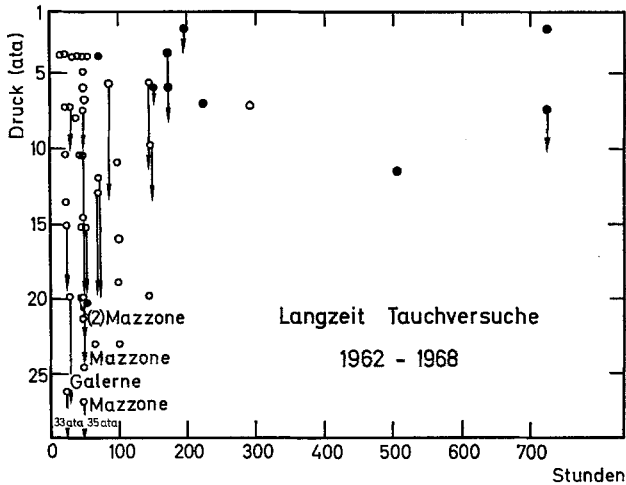


Abb. 11

Tabelle 1. *Tieftauchversuche der jüngsten Gegenwart*

Jahr	Organisation	Höchstdruck und Zeit		Bemerkungen
		(ata)	(min)	
1967	Kantonsspital Zürich	30,5	120	Stufenweises Austauchen auf 1 ata
1968	U. S. Navy	33,1	13	Vorstoß von 26,8 ata Sättigungsdruck
1968	Kantonsspital Zürich	31,0	180	Stufenweises Austauchen auf 1 ata
1968	International Underwater Contractors	35,5	5	Vorstoß von 26,0 ata Sättigungsdruck
1968	COMEX	35,5	15	Stufenweises Austauchen auf 1 ata

maler Grenzen gehalten werden. Allerdings ist unser Wissen über die der physischen und geistigen Leistungsfähigkeit des Tauchers unter Druckverhältnissen von mehr als 20 ata gesetzten Grenzen heute noch sehr lückenhaft, und wir entbehren jeglicher Kenntnis der möglichen biologischen Folgen eines wirklich langdauernden Aufenthaltes unter einem

Druck von mehr als 11 ata. Bei den bis vor kurzem nur von KELLER [34] erreichten hohen Druckbereichen, auch wenn der menschliche Körper diesen nur auf ganz kurze Zeit ausgesetzt ist wie in diesen Tieftauchversuchen der jüngsten Gegenwart, muß man mit der biologischen Bedeutung des rein hydrostatischen Druckes zu rechnen beginnen [16]. Obwohl Versuchstiere mehr als 120 ata Heliumdruck überlebt haben [45], beginnt sich in Detailuntersuchungen an Nagetieren [46] unter solchen hohen Druckverhältnissen bereits die Wirkung einer hydrostatischen Druckkomponente abzuzeichnen. Wir müssen uns daher mit der Möglichkeit abfinden, daß der herrschende Wasserdruck, gleichgültig wie er ausgeglichen wird, dem menschlichen Tauchen die endgültige Tiefengrenze setzen wird.

Die Rückkehr des Tauchers zur Oberfläche muß mit annehmbarer Geschwindigkeit, aber ohne Trauma vor sich gehen. Die einfachen Grundlagen, auf denen die Austauschschemen eines HALDANES aufgebaut waren, und die für viele Jahre in Tauchgängen bis zu ungefähr 100 m ihre Gültigkeit bewiesen haben, sind den Anforderungen des Tauchens in größere Tiefe ohne grundsätzliche Veränderungen nicht mehr gewachsen (Tabelle 2). Aus dieser Sicht ist die Entwicklung verschiedener Abwandlungen der Haldanetheorie [60, 43, 54] und die Entwicklung von

Tabelle 2. *Grundsätzliche Verschiedenheiten in der theoretischen Behandlung des Transportes von trägen Gasen und der Gasblasenbildung im Gewebe*

Begriff	Auslegung
Begrenzung der Geschwindigkeit des Gastransportes	<ol style="list-style-type: none"> 1. Durch die Durchblutung des Gewebes 2. Durch die Diffusion des trägen Gases
Theoretisches Gewebe	<ol style="list-style-type: none"> 1. Eine von vielen parallelschalteten Gaswechseinheiten 2. Ein einziges flüssiges Zweiphasensystem
Auftreten einer Gasphase im Gewebe	<ol style="list-style-type: none"> 1. Durch das Überschreiten einer metastabilen Höchstspannung des im Gewebe gelösten Gases 2. Durch die Erniedrigung des Totaldruckes auf einen Wert, der unterhalb der Spannung des im Gewebe gelösten Gases liegt

neuen Auffassungen [34, 28, 31], die alle das gleiche Ziel des schnellen und sicheren Austauschens verfolgen, zu verstehen. Die grundsätzlichen Verschiedenheiten der theoretischen Behandlung des Transportes von Inertgasen und der Gasblasenbildung im Gewebe lassen sich zusammen-

fassen in der verschiedenartigen Auslegung der Begrenzung der Geschwindigkeit des Gastransportes [30], des Begriffs des theoretischen Gewebes [56, 53, 29] und der Ursachen des Auftretens einer Gasphase im Gewebe [29, 12, 44, 7]. Die Mehrzahl der Tauchlaboratorien der Welt verwendet heute für die Ausarbeitung von Tauchtabellen eine durch die Durchblutung begrenzte, mit mehreren parallel geschalteten Gaswechseleinheiten arbeitende Berechnungsmethode [54], welche annimmt, daß Gasblasen im Körper in der Regel nur nach Überschreitungen einer metastabilen Höchstspannung des im Gewebe gelösten Gases auftreten.

Die in unserem Laboratorium dazu verwendete Symbolik ist:

π = Partialdruck des im Gewebe gelösten trägen Gases

t = Zeit

k = spezifische Zeitkonstante des Gastransportes

$t_{1/2}$ = Halbwertszeit des Gastransportes = $\frac{\ln 2}{k}$

P = Partialdruck des trägen Gases in der Lunge

c = (konstante) Geschwindigkeit der Ab- oder Zunahme des Partialdrucks P

\dot{Q} = Durchblutungsgeschwindigkeit des Gewebes (Volumen/Zeiteinheit/Volumen)

α = Gaslöslichkeit

Das Verhältnis zwischen dem alveolaren Partialdruck P eines Inertgases und dessen Partialdruck π in einem theoretischen Gewebe, welches durch eine spezifische Zeitkonstante des Gastransportes k gekennzeichnet ist, bestimmt den Verlauf des Inertgastransportes im Körper.

Gastransport-Gleichung

$$\frac{d\pi}{dt} = k (P - \pi)$$

Allgemeine Lösung

$$\pi = e^{-\int k dt} \left[\int P e^{\int k dt} dt \right] + c_1 e^{-\int k dt}$$

Spezielle Lösung für $\frac{dP}{dt} = c$:

$$\pi = P_0 + c \left(t - \frac{1}{k} \right) - \left(P_0 - \pi_0 - \frac{c}{k} \right) e^{-kt}$$

$$k = \dot{Q} \frac{\alpha \text{ Blut}}{\alpha \text{ Gewebe}}$$

Die Differentialgleichung, die diesen Gastransport beschreibt, sagt aus, daß die Geschwindigkeit der Zu- oder Abnahme der Inertgasspannung

im Gewebe zu jeder Zeit dem Partialdruckunterschied zwischen Lunge und Gewebe direkt proportional ist. Diese Gleichung kann allgemein gelöst werden. Eine spezielle und leicht zu verwendende Lösung ergibt sich für den Fall, in dem die Geschwindigkeit der Partialdruckveränderung in der Lunge durch eine Konstante beschrieben werden kann, die auch den Wert Null annehmen darf. Mit dieser Lösung ist die mathematische Voraussetzung für die Berechnung des Inertgastransportes im Körper beim linearen wie auch beim stufenweisen Austausch gegeben. Eine eingehende Untersuchung dieser mathematischen Behandlung [57] zeigt, daß die spezifische Zeitkonstante k mit dem Produkt der Durchblutungsgeschwindigkeit des Gewebes \dot{Q} und des Verteilungskoeffizienten des Inertgases zwischen Blut und Gewebe identisch ist. Dem theoretischen Gewebe kommt daher also nicht anatomische Bedeutung zu, da eine Vielzahl von Kombinationen von Durchblutungsgeschwindigkeit und Verteilungskoeffizienten (der in erster Linie vom Fettgehalt eines gegebenen Gewebes abhängt) zu dem gleichen Wert von k Anlaß geben können.

Wenn, wie es in vielen Tieftauchversuchen vorkommt, der lineare Aufstieg des Tauchers zur Wasseroberfläche lange anhält, so findet man (Gleichung),

$$P - \pi = \frac{c}{k} + \left(P_0 - \pi_0 - \frac{c}{k} \right) e^{-kt} \quad \lim_{t \rightarrow \infty} (P - \pi) = \frac{c}{k}$$

daß sich zwischen dem alveolaren und dem Gewebepartialdruck des Inertgases ein Gleichgewicht einstellt, welches durch die Geschwindigkeit der Abnahme des alveolären Partialdrucks (c) (welche bei konstantem Sauerstoffpartialdruck im Atemgemisch der Austauschgeschwindigkeit gleichkommt) und der spezifischen Zeitkonstante k bestimmt wird. In der Praxis müssen Austauschgeschwindigkeiten von nicht mehr als 1/8 ata pro Stunde, besonders gegen Ende des Austauschs, eingehalten werden, um die Gefahr der Druckfallkrankheit zu vermeiden. Man kann daher aus dieser Erfahrung gewisse Schlüsse ziehen über die bei verschiedenen Mindestwerten der Durchblutungsgeschwindigkeit und Inertgas-Verteilungskoeffizienten maximal zulässigen Gewebeübersättigung mit Helium oder Stickstoff. Aus der allgemeinen Taucherfahrung steht weiter fest, daß das Ausmaß dieser maximal zulässigen Gewebeübersättigung vom Totaldruck, der Halbwertszeit des Gewebes und der Natur des inerten Gases [5, 13, 22, 60] abhängt (Abb. 12). Da die Geschwindigkeit des sicheren Austauschs mit steigendem Wert der zulässigen Gewebeübersättigung zunimmt, ist letztere für den Taucher verständlicherweise von großer Bedeutung. Zwei vorgeschlagene Höchstgrenzen der zulässigen Gewebeübersättigung mit Stickstoff und Helium (ausgedrückt in Halb-

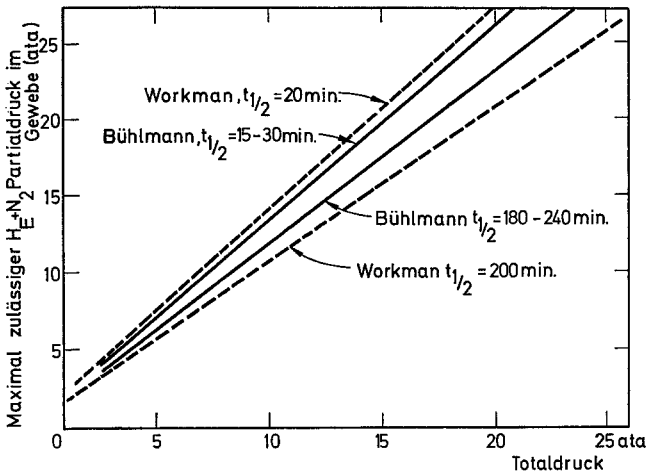


Abb. 12

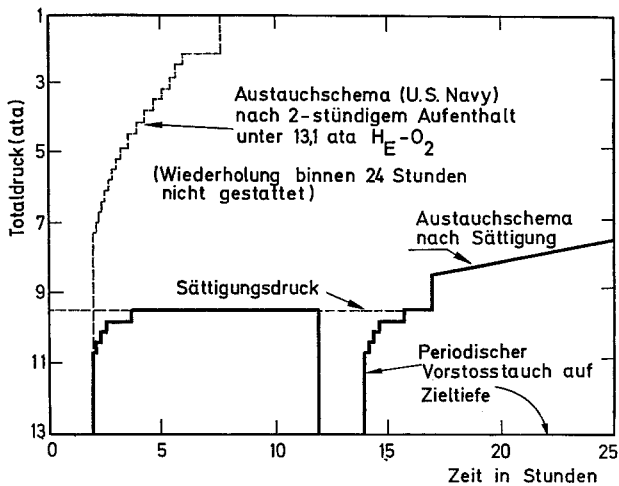


Abb. 13

wertszeiten für Helium) sind hier wiedergegeben. Die gebrochenen Linien stellen WORKMANS Vorschlag [60] dar, das andere Linienpaar gibt BUEHLMANN'S Angaben [59] wieder. Verglichen mit BUEHLMANN'S Werten erlauben WORKMANS Übersättigungsgrenzen ein schnelleres Austauschen für Gewebe mit kleinen Halbwertszeiten und verlangen ein langsames Austauschen für Gewebe mit großen Halbwertszeiten. Die vom Flugmedizinischen

Tabelle 3. *Langzeit-Tauchversuche in der Kammer und im Meer*

Jahr	Sättigungsdruck (ata)	Zeitdauer (Std.)	Gaszusammensetzung			Zahl der Taucher	Tauchversuchsinformation		Leiter	Bemerkungen	Lit.
			% O ₂	% N ₂	% He		Titel	Organisation			
1962	7,26	26	3	—	97	1	Man-In-Sea		E. A. LINK	Sea	8
1962	2,02 (→3,68)	192	21	79	—	2	Précontinent I	M. O. Monaco	J.-Y. COUSTEAU	Sea	9
1963	{ 2,06 3,82 (→6,17)	{ 720 168	{ 21 7	{ 79 —	{ — 93	{ 5 2	{ Précontinent II Genesis E	{ M. O. Monaco	{ J.-Y. COUSTEAU	{ Sea	{ 9
1964	7,2	288	4	17	79	3		U. S. Navy	G. F. BOND	Chamber	11
1964	10,4	24	5	10	85	2		U. S. Navy	R. WORKMAN	Chamber	
1964	13,5	24	4	8	88	2		U. S. Navy	R. WORKMAN	Chamber	
1964	14,5	49	4	5	91	2			E. A. LINK	Sea	7, 12
1964	7,05	222	4	17	79	4	Man-In-Sea Sealab I	U. S. Navy	G. F. BOND	Sea	3
1964	4,0	50	13	87	—	2		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1964	5,0	50	11	89	—	2		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1964	6,0	50	9	91	—	1		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1964	7,0	50	8	92	—	1		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1964	8,0	40	7	93	—	2		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1965	11,0	100	5	27	68	1		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	2
1965	15,1	48	2	4	94	2		Ocean Systems	H. R. SCHREINER	Chamber	
1965	16,0	100	3	5	92	1		DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1965	21,4 (→22,2)	48	2	4	94	2		Ocean Systems	H. R. SCHREINER	Chamber	6
1965	7,45 (→10,4)	360/720	5	17	78	28		U. S. Navy	G. F. BOND	Sea	4
1965	11,4	504	3	—	97	6	Précontinent III	M. O. Monaco	J.-Y. COUSTEAU	Sea	
1965	6,02 (→7,28)	150	7	13	80	11	Smith Mt. Dam	Westinghouse	A. R. KRASBERG	In lake: 12 saturations	60
1966	4,0	24	21	79	—	2		K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	28	21	79	—	2		K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	42	21	79	—	2		K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	42	21	79	—	2		K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	44	21	79	—	2		K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	48	21	79	—	2		K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10

1966	19,0	100	3	4	93	1	DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1966	23,0	100	2	3	95	2	DVLR	H. HARTMANN	Chamber	1
1966	4,0	72	20	—	80	2	K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	48	20	—	80	2	K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	45	20	—	80	2	K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	24	20	—	80	2	K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	10
1966	4,0	72	20	—	80	4	Capshell	A. A. BUEHLMANN	Sea	10
1966	5,68 (→13,5)	84	6	13	81	2	Westinghouse	A. R. KRASBERG	Chamber	60
1966	6,02 (→8,37)	170	6	13	81	23	Westinghouse	A. R. KRASBERG	At sea;	60
										21 saturations
1966	7,26 (→10,4)	24	4	—	96	4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1966	10,4 (→15,1)	48	3	—	97	4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1966	15,1 (→19,8)	24	2	—	98	4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1966	15,1 (→19,8)	48	2	—	98	4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1967	7,26	24	4	—	96	4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1967	7,26 (→10,4)	48	4	—	96	5 × 4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1967	10,4 (→15,1)	48	3	—	97	4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1967	15,1	48	2	—	98	2 × 4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1967	5,67 (→11,4)	144	5	15	80	2	Comex	X. FRUCTUS	Chamber	5
1967	23,0	66	3	3	94	2	K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	5
1967	15,1 (→19,8)	48	2	—	98	3 × 4	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1967	23,0	68	3	3	94	2	K. S. Zurich	A. A. BUEHLMANN	Chamber	5
1967	12,9 (→19,8)	72	3	3	94	3	Westinghouse	A. R. KRASBERG	Chamber	
1967	12,0 (→20,2)	72	3	3	94	7	Westinghouse	A. R. KRASBERG	At sea	
1967	20,3	54	2	—	98	2	Ocean Systems	C. H. HEDGEPETH	Sea	
1967	9,8 (→13,5)	144	3	15	82	2	Comex/OSI	X. FRUCTUS/ R. W. HAMILTON	Chamber	
1968	19,8	48	1,6	—	98,4	5	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	19,8	144	1,6	—	98,4	5	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	19,8 (→24,5)	48	1,6	—	98,4	5	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	19,8 (→24,5)	48	1,6	—	98,4	5	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	24,5	48	0,9	—	99,1	5	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	19,8 (→26,8)	30	0,9	—	99,1	5	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	26,8 (→33,1)	48	0,9	—	99,1	2	U. S. Navy	W. F. MAZZONE	Chamber	
1968	26,1 (→35,4)	24	—	—	—	2	IUC	A. GALERNE	Chamber	

Institut in Bad Godesberg verwendeten Werte für die höchstzulässige Übersättigung von Geweben mit großen Halbwertzeiten sind in den von BUEHLMANN vorgeschlagenen und in Langzeit-Tauchversuchen erfolgreich verwendeten Werten sehr ähnlich (Tabelle 3).

Wenn die Gewebe des Körpers mit Inertgas gesättigt sind, was nach ungefähr 24stündigem Aufenthalt in einem gegebenen Gasgemisch der Fall ist, steigt die für das sichere Austauschen erforderliche Zeit nicht weiter an (Abb. 13). Diese Art des Tauchens ist besonders dort vorteilhaft, wo unter Wasser ein großes Arbeitspensum zu verrichten ist. Obwohl das Austauschen nach Erreichen des Inertgassättigungszustandes, wie schon erwähnt, sehr langsam vor sich geht, steigt in solchen Fällen der produktive Anteil an der Gesamttauchzeit, je länger der Taucher unter Sättigungsdruck Arbeit leistet. Für kleinere und fallweise Unterwasserarbeiten ist das traditionelle stufenweise Austauschen zur Meeresoberfläche am vorteilhaftesten. In gewissen Fällen, wo die Notwendigkeit besteht, periodisch oder zumindest mit vorhersehbarer Frequenz eine gewisse Arbeitsleistung am Meeresboden zu vollbringen, ist eine Kombination des Sättigungs- und des stufenweisen Austauschens die beste Lösung, da sie wichtige Vorteile beider Tauchmethoden in sich vereinigt. Dies wird bewerkstelligt, in dem der Taucher einem gewissen Sättigungsdruck ausgesetzt ist, von dem er nach einer bestimmten Zieltiefe wiederholt vorstoßen und von dort mit einem Mindestmaß an stufenweiser Dekompression zur Sättigungstiefe zurückkehren kann. Diese Art des Tauchens ist verhältnismäßig neu [40] und kann durch die Verwendung von elektronischen Rechenanlagen für die optimale Festlegung der Sättigungstiefe, der Periodizität der Tauchgänge zur Zieltiefe, deren Dauer und Austauschschema sehr rationell durchgeführt werden. In einem kürzlich durchgeführten Versuch [22] wurden von einer Sättigungstiefe von 85 m aus in Abständen von 12 Std insgesamt 24 zweistündige Tauchvorstöße auf eine Zieltiefe von 120 m durchgeführt. Obwohl in diesen periodischen Tauchgängen in der mit Wasser gefüllten Druckkammer schwere körperliche Arbeit geleistet wurde, blieben jegliche Symptome der Druckfallkrankheit aus.

Wenn man den gegenwärtigen Stand der angewandten Tieftauchphysiologie überblickt, darf man nicht vergessen, daß sozialer, wirtschaftlicher und militärischer Fortschritt auf diesem Gebiet mehr fordert, als das bloße Überleben hoher Druckepisoden. Unser Streben muß danach gerichtet sein, dem Taucher die Möglichkeit zu geben, jegliche im Meer erforderliche geistige und körperliche Arbeit mit dem größtmöglichen Leistungsgrad und ohne Bedrohung seiner Sicherheit durchzuführen. Schließlich sind es die einmaligen geistigen und körperlichen Fähigkeiten des Menschen, die ihn die See erobern lassen.

Literatur

1. AGOSTONI, W., G. GURTNER, G. TORRI, and H. RAHN: Respiratory mechanics during submersion and negative-pressure breathing. *J. appl. Physiol.* **21**, 251—258 (1966).
2. ALBANO, G.: *Osservazioni di fisiologia del sommozzatore*. Roma: Tipografia Renato Rotolo 1967.
3. Anonymous: Seven days in an underwater home. *Sovetskaya Rossiya (USSR)* 4. 9. 1966.
4. BENNETT, P. B.: *The Aetiology of Compressed Air Intoxication and Inert Gas Narcosis*. London: Pergamon Press 1966.
5. —, and A. J. HAYWARD: Relative decompression sickness hazards in rats of neon and other inert gases. *Aerospace Med.* **39**, 301—302 (1968).
6. BRAUER, R. W., R. O. WAY, and R. PERRY: Separation of anesthetic and convulsant effects in mice breathing helium and hydrogen-containing atmospheres at 50 and 150 atm. *Fed. Proc.* **26**, 720 (1967).
7. BRESTKIN, A. P.: Relationship between the Supersaturation Coefficient of Gas-Liquid Systems and the Tension of Dissolved Gas. In: *The Effect of the Gas Medium and Pressure on Body Functions*. III. M. P. BRESTKIN, ed. Moscow-Leningrad: Inst. Evol. Physiol. im I. M. Sechenow 1964.
8. BRUEMMER, J. H., B. B. BRUNETTI, and H. R. SCHREINER: Effects of helium group gases and nitrous oxide on HeLa cells. *J. cell. comp. Physiol.* **69**, 385—392 (1967).
9. BUEHLMANN, A. A., P. FREI, and H. KELLER: Saturation and desaturation with nitrogen and helium at 4 atm. *J. appl. Physiol.* **23**, 458—462 (1967).
10. COUSTEAU, J.-Y.: At home in the sea. *National Geographic* **125**, 465—507 (1964).
11. DERYUGIN, K.: Soviet Sealab „Sadko“, *Pravda (USSR)*, 26. 10. 1966.
12. DIETER, K. H.: On a mathematical theory of decompression. *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, BME* **14**, 124—146 (1967).
13. DOEBBLER, G. F., R. G. BUCHHEIT, and H. R. SCHREINER: Effect of Helium, Neon, Nitrogen, and Argon on the Relative Susceptibility of Animals to Depth Decompression Sickness. 38th Annual Meeting, Aerospace Medical Association: Washington, 1967.
14. —, M. E. MOHLKE, J. M. McMULLAN, and H. R. SCHREINER: Inert gas interactions and effects on enzymatically active proteins. *Fed. Proc.* **26**, 650 (1967).
15. FENN, W. O.: Interactions of oxygen and inert gases in drosophila. *Resp. Physiol.* **3**, 117—129 (1967).
16. — Possible Role of Hydrostatic Pressure and Diving. In: *Proc. Third Symposium on Underwater Physiology*, C. J. LAMBERTSEN, ed. Baltimore: Williams & Wilkins 1967.
17. GODLEY, J.: The long, deep dive. *National Geographic* **123**, 718—731 (1963).
18. GOLGEN, R. M.: Improving naturalness and intelligibility of helium-oxygen speech, using vocoder techniques. *J. Acoust. Soc. Amer.* **40**, 621—627 (1966).
19. HAHNLOSER, P. B., E. DOMANIG, E. H. LANPHIER, and W. G. SCHENK, JR.: Hyperbaric oxygenation: Alterations in cardiac output and regional blood flow. *J. thorac. cardiovasc. Surg.* **52**, 223—231 (1966).

20. HAMILTON, R. W., JR.: Keeping man alive under water. *Oceanol. Intern.* **20**, 23 (1967).
21. —, and H. R. SCHREINER: Effects of Helium, Neon, Nitrogen, and Argon on the Relative Susceptibility of Animals to Altitude Decompression Sickness. 38th Annual Meeting, Aerospace Medical Association: Washington 1967.
22. —, P. FRUCTUS, and X. R. FRUCTUS: Physiological Surveillance and Performance Tests During a Seven-Day Exposure to 9.5 Atmospheres Helium-Oxygen with Exercise Excursions at 13 Atmospheres. *Proc. 24th Intern. Congr. Physiol. Sci.*, Washington 1968.
23. —, G. F. DOEBBLER, C. H. NUERMBERGER, and H. R. SCHREINER: Biological effects of possible spacecraft atmospheres: Exposure of rabbits to helium, neon, nitrogen, argon, and oxygen. *Physiologist* **9**, 197 (1966).
24. —, J. B. MACINNIS, A. D. NOBLE, and H. R. SCHREINER: Saturation Diving at 650 Feet. Technical Memorandum B-411, Ocean Systems, Inc., Tonawanda, New York, USA, 15. März 1966.
25. HARTMANN, H., u. H.-D. FUST: Langzeit-Druckkammerversuche im Bereich von 4—23 ata. *Draeger-Heft* **265**, 1—18 (1966).
26. —, K.-H. WEINER, H.-D. FUST u. R. SEIFERT: Über einen Dauerversuch von 100 Stunden bei einem Druck von 11 ata. *Int. Z. angew. Physiol.* **22**, 30—44 (1966).
27. HARVEY, E. N.: Physical Factors in Bubble Formation. In: *Decompression Sickness*, p. 90. Philadelphia-London: Saunders 1951.
28. HEMPLEMAN, H. V.: Tissue Inert Gas Exchange and Decompression Sickness. In: *Proc. Second Symp. Underwater Physiol.* Washington D. C.: National Academy of Sciences-National Research Council, Publication 1181, 1963.
29. HILLS, B. A.: Decompression sickness: A study of cavitation at the liquid-liquid interface. *Aerospace Med.* **38**, 814—817 (1967).
30. — Diffusion versus blood perfusion in limiting the rate of uptake of inert non-polar gases by skeletal rabbit muscle. *Clin. Sci.* **33**, 67—87 (1967).
31. — Thermodynamic and Kinetic Approach to Decompression Sickness. Adelaide: Libraries Board of South Australia 1966.
32. HOCK, J. R., G. F. BOND, and W. F. MAZZONE: Physiological Evaluation of Sealab II. DSSP Office Publication, U.S. Navy Nortronics Division, Northrop Corporation, Anaheim, California 1966.
33. HORNING, D. F. (Ed.): Effective Use of the Sea. Report of the Panel on Oceanography, Presidents Science Advisory Committee. Washington, D.C.: The White House 1966.
34. KELLER, H., and A. A. BUEHLMANN: Deep diving and short decompression by breathing mixed gases. *J. appl. Physiol.* **20**, 1267—1270 (1965).
35. KRASBERG, A. R.: The Evolution of Functional Saturation Diving. In: *Proc. Second Symp. Underwater Soc.*, London 1967.
36. KYLSTRA, J. A.: Survival of submerged mammals. *New Engl. J. Med.* **272**, 198—200 (1965).
37. LAMBERTSEN, C. J.: Basic Requirements for Improving Diving Depth and Decompression Tolerance. In: *Proc. Third Symposium on Underwater Physiology*, C. J. LAMBERTSEN, ed. Baltimore: Williams & Wilkins 1967.

38. LANPHER, E. H.: Interactions of Factors Limiting Performance at High Pressures. In: Proc. Third Symposium on Underwater Physiology C. J. LAMBERTSEN, ed. Baltimore: Williams & Wilkins 1967.
39. — Man in High Pressures. In: Handbook of Physiology-Section 4: Adaption to the Environment. D. B. DILL, ed. Washington, D.C.: Amer. Physiol. Soc. 1964.
40. LARSEN, R. T., and W. F. MAZZONE: Excursion Diving from Saturation Exposures at Depth. In: Proc. Third Symposium on Underwater Physiology, C. J. LAMBERTSEN, ed. Baltimore: Williams & Wilkins 1967.
41. LINK, E. A.: Outpost under the ocean. *National Geographic* **127**, 530—533 (1965).
42. LORD, G. P., G. F. BOND, and K. E. SCHAEFER: Breathing under high ambient pressure. *J. appl. Physiol.* **21**, 1833—1838 (1966).
43. LUNDGREN, C. E. G.: Experimental decompression sickness in goats in relation to predicted tissue gas supersaturation. *Försvarsmedicin* **3**, Suppl. **3** (1967).
44. MACKAY, R. S.: Simulation Studies of the Physiological State Under High Pressure. In: Proc. Sixth Intern. Conf. Med. Electron. Biol. Eng. Tokyo 1965.
45. MACINNIS, J. B., J. G. DICKSON, and C. J. LAMBERTSEN: Exposure of mice to helium-oxygen atmosphere at pressure to 122 atmospheres. *J. appl. Physiol.* **22**, 694—698 (1967).
46. MILLER, K. W., W. D. M. PATON, W. B. STREETT, and E. B. SMITH: Animals at very high pressures of helium and neon. *Science* **157**, 97—98 (1967).
47. MÜLLER, K. G., u. S. RUFF: Gasblasenbildung im Organismus beim Druckfall. *Int. Z. angew. Physiol.* **23**, 251—292 (1965).
48. O'NEAL, H. A., G. F. BOND, R. E. LANPHEAR, and T. ODUM: An Experimental Eleven-Day Undersea Saturation Dive at 193 Feet. Report ACR-108, Office of Naval Research, Washington, D.C. 1965.
49. PAULI, D. C., and G. P. CLAPPER (Eds.): An Experimental 45-Day Undersea Saturation Dive at 205 Feet. Report ACR-124, Office of Naval Research, Washington, D.C. 1967.
50. RAYMOND, L. W.: Physiologic mechanisms of maintaining thermal balance in high-pressure environments. *J. Hydronautics* **1**, 102—107 (1967).
51. ROBINSON, E. K., B. B. BRUNETTI, J. H. BRÜEMMER, and H. R. SCHREINER: Inert gas effects on growth of mammalian cells in tissue culture. *Fed. Proc.* **27**, 706 (1968).
52. RUFF, S., u. K. G. MÜLLER: Theorie der Druckfallbeschwerden und ihre Anwendung auf Tauchtabellen. *Int. Z. angew. Physiol.* **23**, 251—292 (1966).
53. — Theoretische Untersuchungen zur Entstehung von Gasembolien und Gasblasen im Gewebe. *Anaesthesist* **15**, 317—319 (1966).
54. SCHREINER, H. R., and P. L. KELLEY: Computation Methods for Decompression from Deep Dives. In: Proceedings Third Symposium on Underwater Physiology, C. J. LAMBERTSEN, ed. Baltimore: Williams & Wilkins 1967.
55. — General biological effects of the helium-xenon series of elements. *Fed. Proc.* (in press).
56. — Mathematical approaches to decompression. *Int. J. Biometeorology* **11**, 301—310 (1967).

57. — Safe ascent after deep dives. *Rev. Subaquat Physiol. Hyperbar. Med.* (Paris) (in press).
58. STENUIT, R. P.: The deepest days. *National Geographic* **127**, 534—547 (1965).
59. WALDVOGEL, W., and A. A. BUEHLMANN: Man's reaction to long-lasting overpressure exposure. Examination of the saturated organism at a helium pressure of 21—22 atm. *Helv. med. Acta* **34**, 130—150 (1968).
60. WORKMAN, R. D.: Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives. Research Report 6—65. Washington: U.S. Navy Experimental Diving Unit 1965.

Dr. H. R. SCHREINER
Union Carbide Corporation
Forschungslaboratorium der Linde Division
Tonawanda, New York, USA
P. O. Box 44, Tonawanda,
New York 14150/USA