

Übersicht

Die Gasblase im Organismus wird als die bestimmende Größe für die Konstruktion von beschwerdelosen Dekompressionen erkannt. Auf dieser Grundlage und unter Berücksichtigung des empirischen Materials wird ein Satz von erlaubten Gasspannungen im Gewebe vorgeschlagen. Hieraus lassen sich für beliebige Tauchgänge in Helium-Stickstoff-Gemischen Dekompressionsschemata berechnen. Eine Formel für das Blasenwachstum im Organismus bei einer Dekompression wird entwickelt und zur Diskussion der erlaubten Gasspannungen herangezogen. Im Anhang werden Tauchversuche des Instituts und die Tauchtabellen des "U.S. Diving Manuals" analysiert.

Experimental and Theoretical Investigation of the Decompression Problem

Summary

The bubble in the organism is recognized as the governing quantity for the construction of safe decompressions. On this basis and using the empirical material a set of allowed gas tensions in the tissue is proposed. From this decompression schedules for arbitrary dives in helium-nitrogen mixtures can be calculated. An expression for the bubble growth in the organism during a decompression is developed and applied to the discussion of the allowed gas tensions proposed here. In the appendix dives of the institute and the decompression schedules of the "U.S. Diving Manual" are analysed.

1. Einleitung	7
2. Haldanesches Prinzip	9
3. Prinzip der beschwerdelosen Gasblase	14
4. Vorschlag zur Vereinheitlichung der erlaubten Gasspannungen	15
5. Berechnung der Gasblase	18
5.1 Grundlagen	20
5.1.1 Gasblasen als Ursachen der Druckfallbeschwerden	20
5.1.2 Druckbilanz der Gasblase	21
5.1.3 Gaskeime	21
5.1.4 Gastransport im Organismus	22
5.1.5 Gastransport in eine Blase	24
5.1.6 Modell für die Gasblase	26
5.2 Grundgleichung für das Blasenwachstum	26
5.2.1 Herleitung	26
5.2.2 Diskussion	30
6. Zusammenfassung	30
7. Schrifttum	33

A. Anhang

A 1. Unser Vorschlag für Ausschleusungstabellen für das Arbeiten unter Druckluft	35
A 2. Analyse der im Institut für Flugmedizin der DFVLR ausgeführten Dekompressionsversuche	39
A 2.1 Erläuterung	39
A 2.1.1 Überschrift	39
A 2.1.2 Beschreibung der Gaszusammensetzung	40
A 2.1.3 Kurzprotokoll	41
A 2.1.4 Daten der einzelnen Versuche	41
A 2.2 Versuchsdaten	43
A 3. Analyse der Tauchtabellen des U.S. Navy Diving Manuals 1970	81
A 3.1 Erläuterung	81
A 3.2 Versuchsdaten	81

1. Einleitung

Im Institut für Flugmedizin wurde bald nach der Wiederaufnahme der Arbeiten im Jahre 1952 die Untersuchung des Druckfallproblems in das Forschungsprogramm aufgenommen. Wegen seiner medizinischen Erfahrungen bei Caissonarbeiten wurde nämlich ein Mitarbeiter des Instituts, O. WÜNSCHE, von staatlichen Stellen und von der Bauindustrie zur Beratung bei neuen Caissonbaustellen herangezogen. Im Jahre 1963 leitete ein Team des Instituts (H. HARTMANN, H.D. FUST, K.H. WEINER) [1] in Lengenfeld die Bergung von drei verschütteten Grubenarbeitern, die 196 Stunden in einer Luftblase eingeschlossen waren. Durch diesen Vorfall und durch das Fehlen jeglicher Anhaltspunkte für die Dekompression nach HARTMANN [2] veranlaßt, sich der Ausschleusung nach solchen langen Überdruckaufenthalten anzunehmen. Er führte eine Reihe von aufsehenerregenden Sättigungsstauchversuchen in Stickstoff-Sauerstoff- bzw. Helium-Sauerstoff-Atmosphären durch (s. Tabelle 1). Die Dekompressionsschemata dieser Versuche sind zum großen Teil noch nicht veröffentlicht.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden von K.G. MÜLLER und S. RUFF [3, 4, 5] theoretische Arbeiten begonnen, deren Ziel es war, zu einem beliebigen Aufenthalt bei erhöhtem Druck ein gefahrloses Dekompressionsschema zu berechnen. Hierbei entstanden ein Vorschlag für die Ausschleusungstabellen der "Verordnung für das Arbeiten unter Druckluft" und eine Reihe von Dekompressionsschemata für spezielle eigene Versuche. In diesem Forschungsbericht sollen die Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Untersuchungen des Druckfallproblems im Institut für Flugmedizin der DFVLR zusammenfassend dargestellt werden.

2. Haldanesches Prinzip

Jeder Organismus enthält gelöstes Gas, dessen Menge und Zusammensetzung von der umgebenden Atmosphäre bestimmt ist. Wird in dieser Atmosphäre der Druck erhöht, wie z.B. beim Tauchen, so löst sich zusätzlich Gas im Organismus. Eine sich anschließende Dekompression muß so langsam ablaufen, daß diese zusätzlich gelöste Gasmenge keine Beschwerden hervorruft.

Die Frage nach einer solchen beschwerdelosen Dekompression trat zuerst beim Tauchen auf. Zunächst sammelte man Erfahrungen mit einer gleichmäßigen, d.h. linearen Dekompression. Zur Verbesserung dieses Verfahrens führte HALDANE [6] ein theoretisches Prinzip ein. Er nahm an, daß während der Dekompression die Gasspannung P_{tis} im Gewebe höchstens den doppelten Betrag des Druckes P_{ex} der umgebenden Atmosphäre ausmachen darf: +)

$$(1) \quad \bar{P}_{tis} \leq 2 P_{ex} .$$

Bei Luftatmung beträgt die Stickstoffspannung P_{tis} im Gewebe 79% der Gesamtgasspannung P_{tis} , und wir können die Gleichung (1) umschreiben:

$$(2) \quad P_{tis} \leq 1,58 P_{ex} .$$

Im Organismus unterschied HALDANE eine Reihe von Geweben, deren Gasspannungen sich mit unterschiedlicher Halbwertszeit t_H auf die jeweilige Spannung im Atemgas einstellen. Aus diesen Überlegungen ließen sich Tauchtabellen herleiten, die im Gegensatz zur ursprünglichen linearen Dekompression eine fortlaufend langsamere Dekompression zeigten.

+) Bei diesen Überlegungen wurde vorausgesetzt, daß ein aus verschiedenen Komponenten zusammengesetztes Atemgas wie ein einheitliches Gas in das Gewebe transportiert wird. Die unter dieser Voraussetzung berechnete Gesamtgasspannung im Gewebe bezeichnen wir mit $\bar{P}_{tis}$. Die tatsächliche Gesamtgasspannung P_{tis} im Gewebe ist kleiner als $\bar{P}_{tis}$, da die Sauerstoffspannung im Gewebe immer niedriger ist als im Atemgas.

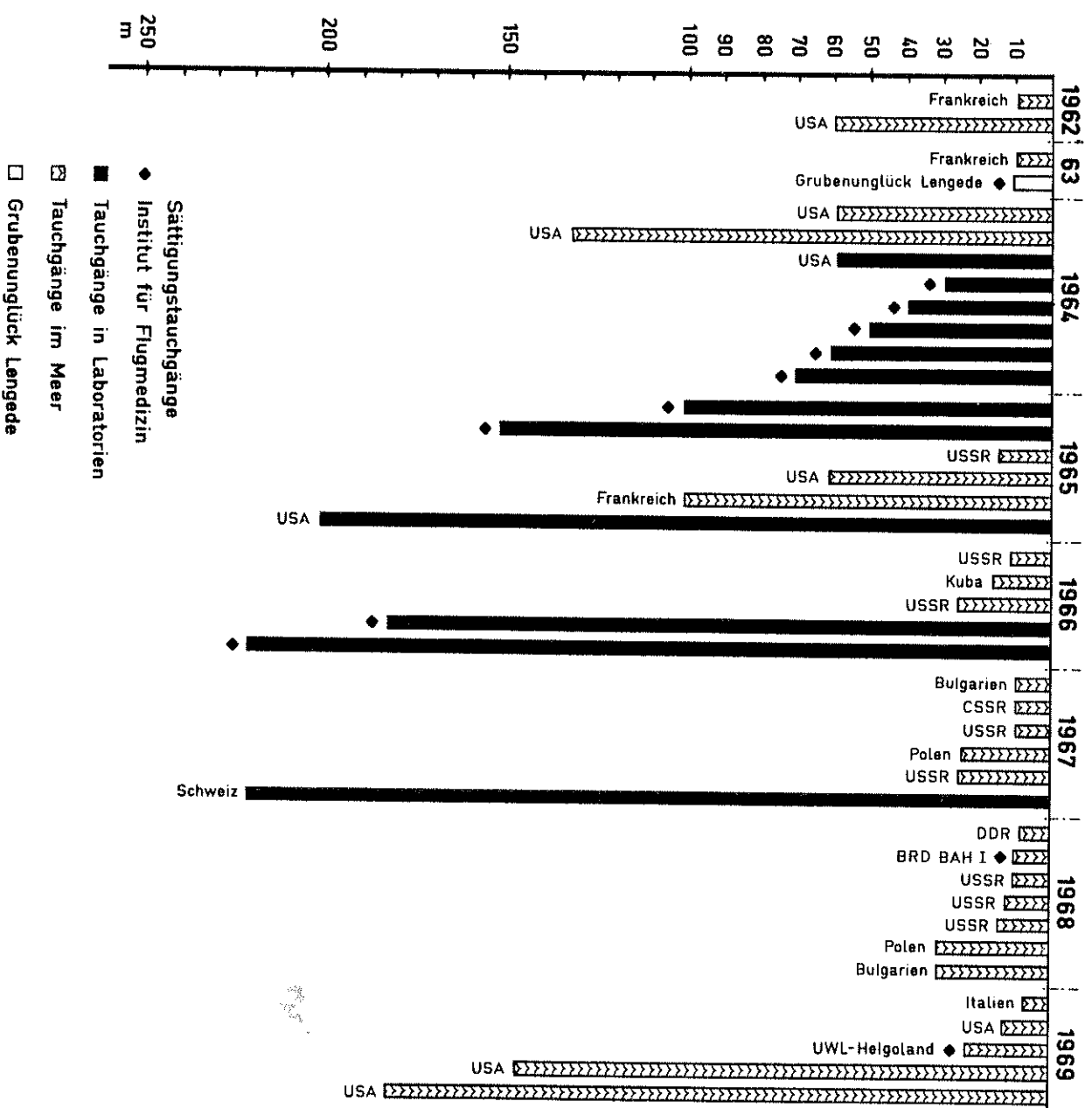


Tabelle 1 Übersicht über die experimentellen Sättigungstauchversuche des Instituts für Flugmedizin im Vergleich zu solchen ausländischen Experimenten.

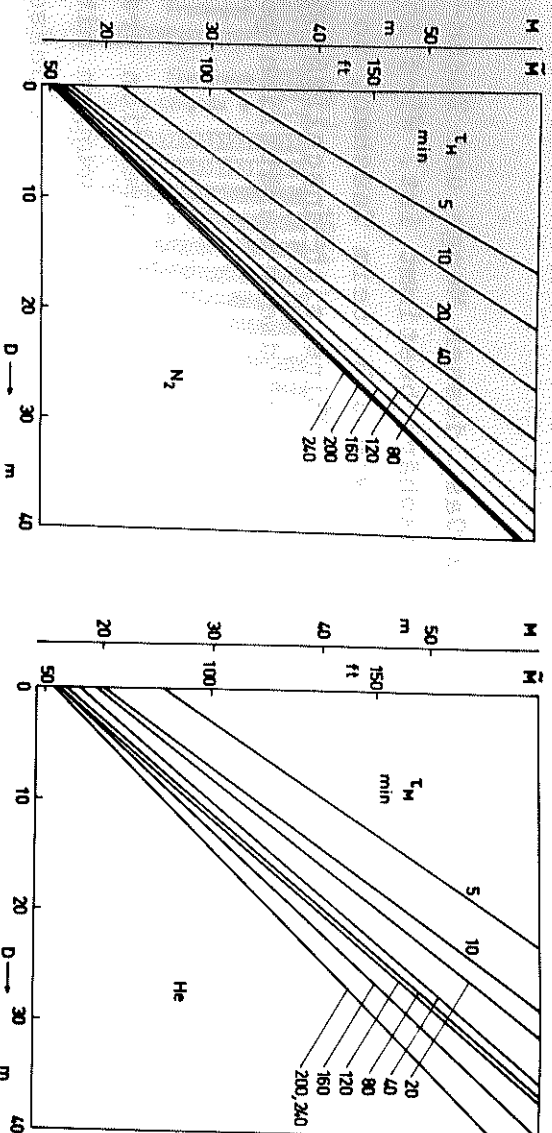


Bild 1,2
Erlaubte Spannungen M in Geweben verschiedener Halbwertszeit T_H für Stickstoff und Helium in Abhängigkeit von der Tauchtiefe D nach WORKMAN [8]. Bei den M -Werten ist die Spannungsdifferenz des Inertgases von 30 Torr = 0,39 m zwischen Atemgas und Gewebe vernachlässigt.

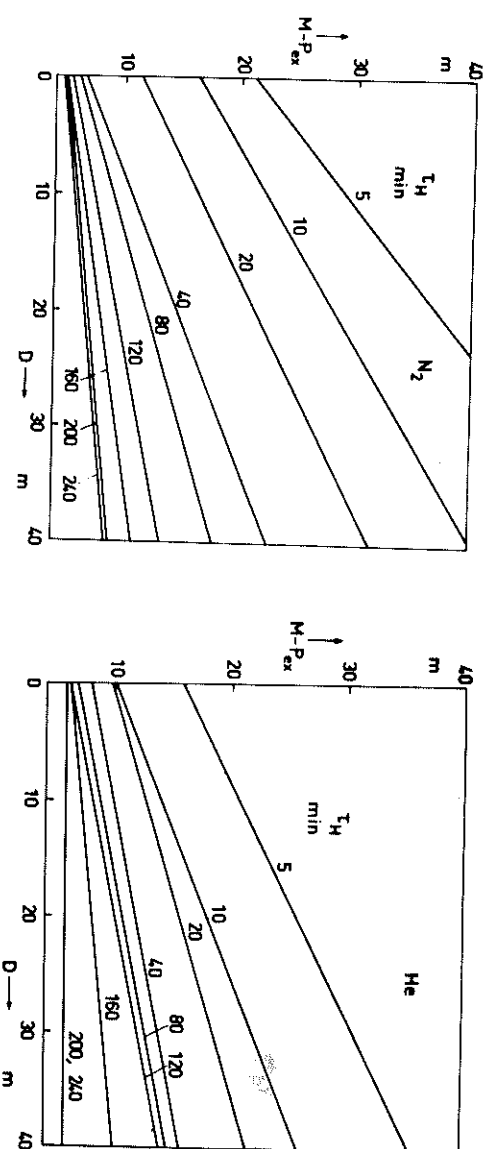


Bild 3,4
Erlaubte Überspannungen $M-P_{ex}$ in Geweben verschiedener Halbwertszeit T_H für Stickstoff und Helium in Abhängigkeit von der Tauchtiefe D nach WORKMAN [8].

Mit wachsender praktischer Erfahrung beim Tauchen erwies sich, daß bei Beachtung des Haldaneschen Prinzips in bestimmten Bereichen Beschwerden, in anderen Bereichen zu lange Dekompressionszeiten auftraten. Zur Verbesserung vergrößerte man das ursprünglich konstante Spannungsverhältnis von 2 : 1 bei kurzen Halbwertszeiten und mäßigen Tauchtiefen und verringerte es bei größeren Tauchtiefen. Man erhielt so obere Grenzwerte M der Gasspannungen als Funktion der Halbwertszeit T_H und des äußeren Druckes P_{ex} :

$$(3) \quad P_{tis} \leq M(T_H, P_{ex}).$$

Häufig gibt man auch M als Funktion des Spannungsverhältnisses

$$(4) \quad r = \bar{P}_{tis} / P_{ex}$$

und der Halbwertszeit T_H an. Die Werte für M wurden experimentell für die einzelnen Inertgase, wie z.B. Stickstoff und Helium, bestimmt. Aus den erlaubten Spannungen M läßt sich eine erlaubte Überspannung ($M-P_{ex}$) ableiten.

Die erlaubten Spannungen dieses erweiterten Haldaneschen Prinzips von Gl.(3) wurden fortlaufend korrigiert. Kürzere und längere Halbwertszeiten kamen hinzu, die alten Spannungswerte wurden abgeändert. Man erhielt schließlich für einen bestimmten Bereich von Isopressionszeiten und Tauchtiefen zuverlässige Werte der erlaubten Spannungen.

In den Bildern 1 bis 4 haben wir die erlaubten Spannungen bzw. Überspannungen aufgetragen, die in der Experimental Diving Unit der US-Navy von DES GRANGES [7] zur Aufstellung des Diving Manuals verwendet und später von WORKMAN [8] weiter entwickelt wurden. Bei einer vorgegebenen Halbwertszeit T_H ergibt sich für die erlaubte Gasspannung M als Funktion der Tauchtiefe D eine Gerade:

$$(5) \quad M(T_H, D) = M_0(T_H) + \Delta M(T_H) \cdot D/10,$$

die durch die beiden Größen

Gasspannung M_0 bei der Tauchtiefe 0,

Anstieg ΔM der Geraden: Zuwachs je 10 m Zuwachs von D

charakterisiert wird. Die in Bild 1 und 2 gezeigten Spannungswerte lassen sich also vereinfacht in einer Tabelle der M-Werte und ΔM -Werte zusammenfassen (s. Tabelle 2).

T_H [min]	M_0 [m]	N_2		He	
		$\tilde{M}_0$ [ft]	ΔM [m/10 m]	$\tilde{M}_0$ [ft]	ΔM [m/10 m]
5	31,1	104	18	86	15
10	26,3	88	16	74	14
20	21,4	72	15	66	13
40	16,6	56	14	60	12
80	16,0	54	13	56	12
120	15,4	52	12	54	12
160	15,0	51	11,5	54	11
200	15,0	51	11	53	10
240	14,7	50	11	53	10

Tabelle 2 Erlaubte Spannungen der Gase N_2 , He im Gewebe (Gl.5) nach WORKMAN [8]. Bei den M_0 -Werten wurde die Spannungsdifferenz des Inertgases von 30 Torr = 0,39 m zwischen Atemgas und Gewebe vernachlässigt.

Bei einer Dekompression im Tauchversuch mit anschließender Rekompensation kann man wesentlich höhere Spannungswerte als die in Bild 1 und 2 zulassen. Diese Tatsache ist von Bedeutung bei der Berechnung von sogenannten oberflächendekompressionen. Bei diesem Verfahren wird der Taucher beschleunigt zur Oberfläche gebracht, in einer Überdruckkammer rekomprimiert und anschließend langsam dekomprimiert. Vor der Aufnahme in die Überdruckkammer hält er sich eine kurze Zeit bei Normaldruck auf. Hier sind also erlaubte Grenzwerte bei Normaldruck in Abhängigkeit von der Aufenthaltsdauer interessant.

Ein Problem entsteht, wenn man versucht, das erweiterte Haldane'sche Prinzip auf Tauchvorgänge mit wechselnden Atemgasen anzuwenden. Ein vorgegebenes Gewebe wird für die einzelnen Atemgase unterschiedliche Halbwertszeiten besitzen. SCHREINER [9] hat für eine Reihe von Gasen die Halbwertszeiten für verschiedene Gewebe zusammengefaßt, wobei die Gewebe durch die Durchblutung und den Fettgehalt charakterisiert werden (s. Tabelle 3).

Compartment	Durchblutung [cm ³ /min cm ³]	Fettgehalt [%]	Halbwertszeiten [min]			
			N_2	He	Ne	Ar
1	0,3	30	5	3	3	5
2	0,3	70	9	3	4	9
3	0,3	100	12	4	5	12
4	0,1	0	7	7	7	7
5	0,1	30	15	8	9	16
6	0,1	70	27	10	12	28
7	0,1	100	35	12	15	37
8	0,03	0	23	23	23	23
9	0,03	30	52	28	31	53
10	0,03	70	89	34	41	93
11	0,03	100	118	39	49	122
12	0,0085	0	81	81	81	81
13	0,0085	30	182	99	108	187
14	0,0085	70	315	122	145	327
15	0,0085	100	416	139	171	432

Tabelle 3 Halbwertszeiten der einzelnen Compartments für die Gase N_2 , He, Ne, Ar nach SCHREINER [9].

Insgesamt berücksichtigt er 15 verschiedene Gewebe, die er als "Compartments" bezeichnet. Bei Kenntnis der Halbwertszeiten lassen sich die Gasspannungen der einzelnen Gase und die Gesamtgasspannung berechnen. Man weiß aber ohne weiteres nicht, woran man jetzt entweder die einzelnen Gasspannungen oder aber die Gesamtgasspannung messen soll. In praktischen Fällen verglich man die sich ergebende Gesamtgasspannung mit der erlaubten Spannung der überwiegenden Komponente.

Bei modernen Tauchtäuchversuchen über lange Zeiten bis in den Zustand der Sättigung des Gewebes kehrte man wieder zur linearen Dekompression zurück. Bei einer solchen linearen Dekompression bildet sich nach Ablauf von einigen Halbwertszeiten in den einzelnen Geweben eine zeitlich konstante Überspannung ($p_{tis} - p_{ex}$) aus, die der Halbwertszeit und der Dekompressionsgeschwindigkeit proportional ist. Die zulässige Dekompressionsgeschwindigkeit wurde empirisch ermittelt oder unter Annahme einer bestimmten erlaubten Überspannung errechnet.

In dem ursprünglichen Haldaneschen Prinzip von Gl. (1) ließen sich alle Dekompressionen aus einem Zahlenwert, nämlich dem erlaubten Spannungsverhältnis, herleiten. Das erweiterte Haldanesche Prinzip arbeitet mit einer ganzen Tabelle von erlaubten Gasspannungen, die von Gasart, Halbwertszeit, Tauchtiefe und gegebenenfalls auch noch von der Aufenthaltsdauer abhängen. Damit wurde das ursprünglich einfache Haldanesche Prinzip zu einem komplizierten Rechenschema verändert.

3. Prinzip der beschwerdelosen Gasblase

Aus klinischen und experimentellen Untersuchungen ist bekannt, daß Gasblasen im Organismus die Druckfallbeschwerden verursachen. Wir kommen so zu dem physiologisch begründbaren Prinzip, daß bei der Dekompression durch Gasblasen keine Beschwerden hervorgerufen werden dürfen. Dies ist einmal der Fall, wenn überhaupt keine Gasblasen auftreten. Nehmen wir an, daß zum Auftreten von Gasblasen eine bestimmte Überspannung notwendig ist, die noch von der Halbwertszeit und der Tauchtiefe abhängt, so gilt hierfür wiederum das erweiterte Haldanesche Prinzip von Gl. (3).

Wir können aber auch eine weniger beschränkende Forderung stellen, nämlich, daß die Gasblasen zwar auftreten, aber keine Beschwerden hervorrufen dürfen.

Aus der Praxis liegen Anhaltspunkte dafür vor, daß bei bestimmten Tauchvorgängen beschwerdelose Gasblasen auftreten. Es gibt Situationen, bei denen eine geringfügige Druckerhöhung zu Beschwerden führt, die bei einer entsprechenden Druckerhöhung wieder zum Verschwinden gebracht werden können. Diese Beschwerden sind gut zu erklären mit Gasblasen, die bei der Druckerhöhung eine bestimmte, kritische Größe überschreiten und bei der Druckerhöhung wieder auf eine beschwerdelose Größe zurückgehen. Man kann diesen Vorgang nur schwierig damit erklären, daß sich momentan Gasblasen bilden, die dann bei der geringen Druckerhöhung wieder zusammenfallen.

Die beiden Forderungen, daß überhaupt keine Gasblasen auftreten bzw. nur beschwerdelose Gasblasen auftreten, haben unterschiedliche Anwendungsbereiche. Bei beschwerdelosen Tauchvorgängen mit sehr langen Dekompressionszeiten dürfen sich praktisch überhaupt keine Gasblasen bilden, da sie sich sonst wegen der sehr langen Dekompressionszeiten zu beachtlicher Größe entwickeln würden. Bei beschwerdelosen Tauchvorgängen mit kurzen Dekompressionszeiten wird sich eine einmal gebildete Blase nicht soweit entwickeln, daß sie Beschwerden hervorruft. Wir erwarten also, daß ein Dekompressionsschema bei kurzen Zeiten einen wesentlich anderen Charakter besitzt als bei langen Zeiten. Einen Hinweis auf diesen Effekt gibt der Unterschied zwischen den Dekompressionsschemata der Tauchtabellen mit fortlaufend langsamerer Dekompression und den linearen Dekompressionen bei extrem langen Tauchvorgängen (Sättigung).

4. Vorschlag zur Vereinheitlichung der erlaubten Gasspannungen

Im Bereich der beim Tauchen üblichen Werte für Zeiten und Tauchtiefe liegen sichere Werte für die erlaubten Gasspannungen M im Gewebe vor (s. Bild 1 und 2). Bei der Extrapolation dieser Werte auf den Bereich des Sättigungstauchens in großen Tiefen

entstehen unzulässig hohe Werte. Wir wollen versuchen, auf der Grundlage der bisherigen Überlegungen einheitliche Gasspannungswerte vorzuschlagen, die sowohl im Bereich des üblichen Tauchens als auch beim Sättigungstauchen anwendbar sind.

Wir haben im vorigen Abschnitt gesehen, daß das Prinzip der beschwerdelosen Gasblase in Anwendung auf lange Halbwertszeiten verlangt, daß die kritische Überspannung zur Bildung einer Gasblase nicht erreicht werden darf. Diese Überspannung ist eine Gewebeeigenschaft und hängt nicht von der Durchblutung des Gewebes und damit von der Halbwertszeit ab. Die nach dem Haldane'schen Prinzip entwickelten zulässigen Überspannungen bei langen Halbwertszeiten müssen wir also interpretieren als die kritischen Überspannungen zur Entstehung der Gasblase. Tatsächlich sind auch die Überspannungen von WORKMAN bei den langen Halbwertszeiten unabhängig von der Halbwertszeit (s. Bild 3 und 4). Die erwartete Unabhängigkeit vom äußeren Druck zeigt sich nur für Helium (Bild 4). Bei Stickstoff steigen die Überspannungen schwach mit der Tauchtiefe an (Bild 3). Dieser lineare Anstieg ist jedoch sicherlich nicht bis zu beliebigen Tauchtiefen zulässig, wie er sich bei einer Extrapolation der Daten von WORKMAN ergeben würde. Für unseren Vorschlag wählen wir daher im Bereich der langen Halbwertszeiten eine feste Überspannung, unabhängig von Gasart, Tauchtiefe und Halbwertszeit.

Diese Überlegungen gelten für den Bereich der langen Halbwertszeiten. In dem Bereich der kurzen Halbwertszeiten müssen wir die erlaubten Überspannungen des Haldaneschen Prinzips folgendermaßen interpretieren: Die kritischen Überspannungswerte zur Bildung einer Gasblase werden überschritten, es bildet sich eine Gasblase, die sich später aber wieder abbaut. Ihre maximale Größe liegt aber noch im Bereich der Beschwerdefreiheit. Da bei einer fortlaufend langsameren Dekompression in den Geweben mit kürzer Halbwertszeit die Überspannungen auch nur sehr kurze Zeit vorliegen, können hier beachtlich hohe Überspannungen zugelassen werden. Ähnlich wie bei den langen Halbwertszeiten können wir auch hier nicht den von WORKMAN vorgeschlagenen linearen Anstieg der Überspannung mit der Tauchtiefe bis zu beliebiger

Tauchtiefe zulassen. In unserem Vorschlag steigen daher die Überspannungen nur für niedrigere Tauchtiefen linear an; anschließend wird dieser Anstieg in einem bestimmten Bereich der Tauchtiefe zwischen D_a und D_b auf Null abgebaut. Anstelle von Gl.(5) tritt dann die Gleichung

$$\begin{aligned} (6) \quad &= M_o(\tau_H) + \Delta M(\tau_H) \cdot D/10 && \text{für } D \leq D_a(\tau_H), \\ M(\tau_H, D) = &M_o(\tau_H) + \Delta M(\tau_H) \cdot D/10 - && \text{für } D_a(\tau_H) \leq D \leq D_b(\tau_H), \\ &-(\Delta M(\tau_H) - 10)(D - D_a(\tau_H)) / (20 \cdot (D_b(\tau_H) - D_a(\tau_H))) \\ &= M(\tau_H, D_b(\tau_H)) + D - D_b(\tau_H) && \text{für } D_b(\tau_H) \leq D. \end{aligned}$$

Dies führt zu den Werten der Tabelle 4 für Stickstoff, die den von uns berechneten Ausschlussungstabellen für das Arbeiten unter Druckluft zugrunde liegt (s. Anhang 1).

τ_H [min]	M_o [m]	$\tilde{M}_o$ [ft]	ΔM [m/10 m]	D_a [m]	D_b [m]
5	31,1	104	18	15	20
10	26,3	88	16	15	22
20	21,4	72	15	15	24
40	16,6	56	14	15	25
80	16,0	54	13	15	25
120	15,5	52,5	11	15	25
160	15,5	52,5	10	-	-
200	15,5	52,5	10	-	-
240	15,5	52,5	10	-	-
360	15,5	52,5	10	-	-
480	15,5	52,5	10	-	-
600	15,5	52,5	10	-	-

Tabelle 4 Erlaubte N_2 -Spannung M im Gewebe Gl.(6) nach unserem Vorschlag. Bei den $\tilde{M}_o$ -Werten wurde die N_2 -Spannungsdifferenz von 30 Torr = 0,39 m zwischen Atemgas und Gewebe vernachlässigt. (Bei $\Delta M = 10$ m/10 m erübrigt sich die Angabe von D_a und D_b).

Bei Einführung der Compartments von SCHREINER haben wir die Möglichkeit, diese Überlegungen auch auf Gemischatmung anzuwenden. Als erstes rechnen wir die M_O - und ΔM -Werte von WORKMAN durch Interpolation auf die Compartments von SCHREINER um (s. Bild 5 und 6 und Tabelle 5). Auf dieser Grundlage erhielten wir unter Berücksichtigung der Überlegungen, die zu unserem Vorschlag der Tabelle 4 führten, und durch Analyse des empirischen Materials über Dekompressionen (s. Anhang 2 und 3) einen für beliebige Stickstoff-Heliumgemische einheitlichen Vorschlag für erlaubte Gesamtgasspannungen (s. Tabelle 6).

Wir haben die Halbwertszeit eines Compartments als nicht veränderliche Größe betrachtet. Tatsächlich treten jedoch beim Tauchen aus verschiedenen Gründen, z.B. O_2 -Atmung, Arbeit etc., Ereignisse auf, die die Durchblutung und damit die Halbwertszeiten ändern. Man könnte jetzt in einem weiteren Schritt versuchen, diese Veränderungen der Halbwertszeiten bei der Berechnung der Gasspannungen zu berücksichtigen. Andererseits stellen jedoch die erlaubten Gasspannungen nur empirische Werte zur Verhinderung der die Druckfallbeschwerden erzeugenden Gasblasen dar. Wir werden daher unsere weiteren Bemühungen auf die Berechnung der Gasblasen konzentrieren.

5. Berechnung der Gasblase

Das Prinzip der beschwerdelosen Gasblase fordert, daß bei einer Dekompression im Organismus nur Gasblasen bis zu einer bestimmten, beschwerdelosen Größe wachsen können. Könnte man die Größe der Gasblase in Abhängigkeit von der Dekompression in den einzelnen Teilen des Organismus berechnen, so ließen sich optimale Tauchtabellen konstruieren. Diese Berechnung ist jetzt jedoch noch nicht möglich, da die in die Theorie eingehenden Parameter noch nicht genügend bekannt sind. Im folgenden werden die Grundlagen der Berechnung einer Gasblase geschildert, und zwar einmal im Hinblick auf eine zukünftige Konstruktion optimaler Tauchtabellen, zum anderen um darzulegen, wie die einzelnen Gewebeeigenschaften die Größe der Gasblase bestimmen. Gerade dieser Einfluß der einzelnen Parameter gibt eine Möglichkeit, die vorgeschlagenen Gasspannungswerte kritisch zu diskutieren.

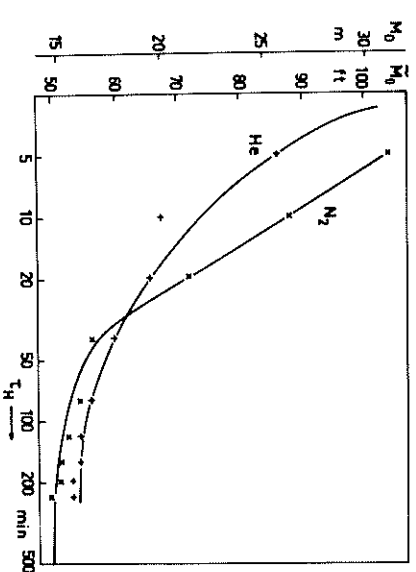


Bild 5
Umrechnung der M_O -Werte der Gleichung 5 nach WORKMAN [8] auf die Compartments von SCHREINER [9]; bei den M_O -Werten ist die Spannungsdifferenz des Inertgases von 30 Torr = 0,39 m zwischen Atemgas und Gewebe vernachlässigt.

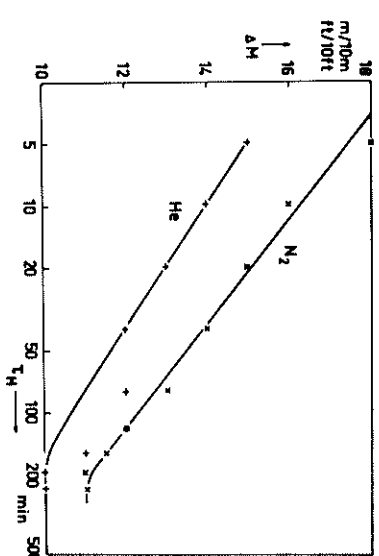


Bild 6
Umrechnung der ΔM -Werte der Gleichung 5 nach WORKMAN [8] auf die Compartments von SCHREINER [9].

Compartment	T_H [min]	N_2		ΔM [m/10 m]	T_H [min]	He		ΔM [m/10 m]
		M_O [m]	M_O [m]			M_O [m]	M_O [m]	
1	5	31,1	17,5	3	3	30,4	15,9	
2	9	26,9	16,4		3	30,4	15,9	
3	12	24,7	15,9		4	27,3	15,4	
4	7	28,7	16,9		7	23,7	14,5	
5	15	23,1	15,7		8	23,1	14,3	
6	27	18,7	14,5		10	22,0	14,0	
7	35	17,5	14,1		12	21,3	13,6	
8	23	19,9	14,8		23	19,1	12,8	
9	52	16,3	13,4		28	18,7	12,5	
10	89	15,5	12,5		34	18,1	12,2	
11	118	15,2	12,0		39	17,8	12,0	
12	81	15,5	12,6		81	16,6	11,0	
13	182	14,9	11,3		99	16,3	10,7	
14	315	14,7	11,0		122	16,0	10,4	
15	416	14,7	11,0		139	16,0	10,2	

Tabelle 5 Erlaubte Spannungen M der Gase N_2 , He (Gl.5), umgerechnet aus den Daten von WORKMAN [8] (s. Tabelle 2) auf die Compartments von SCHREINER [9] (s. Tabelle 3).

Compartment	T_H [min] N_2	He	M_o [m]	ΔM [m/10 m]	D_a [m]	D_b [m]
1	5	3	31,1	16,0	15	20
2	9	3	28,4	15,8	15	21
3	12	4	26,9	15,4	15	22
4	7	7	25,4	15,0	15	23
5	15	8	22,4	14,6	15	24
6	27	10	20,8	14,3	15	25
7	35	12	19,3	13,8	15	25
8	23	23	19,3	13,2	15	25
9	52	28	16,3	12,5	15	25
10	89	34	15,7	12,0	15	25
11	118	39	15,7	12,0	15	25
12	81	81	15,7	11,5	15	25
13	182	99	15,5	10,0	-	-
14	315	122	15,5	10,0	-	-
15	416	139	15,5	10,0	-	-
16	600	200	15,5	10,0	-	-

Tabelle 6 Erlaubte Gesamtspannungen M von beliebigen N_2 -He-Gemischen (Gl.6) für die Compartments 1 - 16. (Bei $\Delta M = 10 \text{ m/10 m}$ erübrigt sich die Angabe von D_a und D_b).

5.1 Grundlagen

Die Prinzipien unserer Theorie haben wir in unserer Arbeit [5] dargestellt. Im Hinblick auf die spätere Berechnung wollen wir sie noch einmal kurz aufzählen und, soweit erforderlich, ergänzen. Hierbei bringen wir diejenigen Ausführungen in Kleindruck, die zwar für die Berechnung notwendig, aber für das Verständnis entbehrlich sind.

5.1.1 Gasblasen als Ursachen der Druckfallbeschwerden

Gasblasen, die in den Arterien und im Gewebe entstehen, können Bends hervorrufen. Sie können aber auch im Bereich des Zentralnervensystems schmerzlose Störungen verursachen. Gasblasen, die in den Venen entstehen, werden in die Lungen verschleppt und lösen dort Chokes aus. Alle diese Wirkungen der Gasblasen können

von den Betroffenen unmittelbar registriert werden. Die Beschwerden sind meist reversibel und verschwinden dann nach entsprechend langer Zeit und entsprechender Behandlung. Hinzu können irreversible, d.h. bleibende Veränderungen im Organismus kommen, wie z.B. Knochennekrosen mit anschließender Verkalkung, die noch nach Jahrzehnten nachweisbar sind. Unsere Untersuchung befaßt sich mit den Gasblasen im Gewebe und so mit den Entstehungsursachen der Bends.

5.1.2 Druckbilanz der Gasblase

Auf eine Gasblase im Gewebe wirken der äußere Druck des Atemgases, der hydrostatische Druck ^{+) im Organismus, der elastische Druck des Gewebes und die Oberflächenspannung. Die Gasblasen besitzen eine ungefähr kugelförmige Gestalt. Für eine Gasblase gilt die stationäre Druckbilanz, nach der die Gesamtgasspannung in der Blase gleich ist der Summe der auf die Blase wirkenden Druckanteile.}

5.1.3 Gaskeime

Es gibt noch eine zweite, submikroskopische Existenzform der Blase, den sogenannten Gaskeim. Der Gaskeim haftet an Wänden oder in Ecken; die Oberflächenspannung wird dadurch vermindert und kann unter Umständen zu einem Zug auf die Gasblase führen. Für die Bildung von Gaskeimen im Organismus wurden verschiedene Prozesse vorgeschlagen. Nach HARVEY [10] müssen wir im Gewebe mit Gaskeimen rechnen. Unter Normalbedingungen liegt die Gesamtgasspannung im Gewebe etwas unter dem Druck des Atemgases, ein vorhandener Gaskeim wird im allgemeinen langsam abgebaut. Bei einer bestimmten Überspannung im umgebenden Gewebe bildet sich aus dem Gaskeim eine gewöhnliche, ungefähr kugelförmige Gasblase. Umgekehrt wird sich eine Gasblase unterhalb eines bestimmten Volumens zu einem Gaskeim zurückbilden.

^{+) Dieser hydrostatische Druck erfährt nur Anteile innerhalb des Organismus. Der Druck der auf dem Taucher lastenden Wassersäule ist schon im Druck des Atemgases berücksichtigt.}

In unserer Arbeit [5] unterscheiden wir ein Modellgewebe mit Gaskeimen, die sich bei einer bestimmten Überspannung momentan zu Gasblasen entwickeln. Tatsächlich wird man eine von der Gewebsart abhängige Wahrscheinlichkeit dafür angeben können, daß in einem bestimmten Gewebsvolumen eine Gasblase existiert oder in einer bestimmten Zeiteinheit neu gebildet wird. Unser Modell erfaßt also alle Gewebe mit einer großen Wahrscheinlichkeit für die Existenz von Gaskeimen und vernachlässigt alle Gewebe mit einer geringen Wahrscheinlichkeit dafür.

5.1.4 Gastransport im Organismus

Die Spannungen der Gase O_2 und CO_2 im Organismus stellen sich unmittelbar auf die Spannungen im Atemgas und auf die Belastung ein. Die Spannungen der Inertgase (N_2 , He usw.) in den Alveolen (alv) stellen sich ebenfalls unmittelbar auf die Atemgasspannung und die Belastung ein.

Wir wollen die letzte Annahme überprüfen. Sehen wir uns zuerst die Einstellung der neuen Spannungswerte in der Lunge an, wobei wir die Einstellung im Gewebe vernachlässigen. Hierbei wollen wir nicht im einzelnen den Übergang zu den neuen Werten berechnen, sondern nur Anfangs- und Endsituation betrachten. Unmittelbar nach einer Drucker-niedrigung haben wir noch dieselbe Gaszusammensetzung in den Alveolen wie vorher, nur mit dem neuen Gesamtdruck. Nach Ablauf von einigen Zeitkonstanten der Lunge in der Größenordnung von 1 min werden sich in den Alveolen die neuen Spannungswerte mit einer veränderten Gaszusammensetzung eingestellt haben. Dabei ändert sich die Gaszusammensetzung, da der Verbrauch an O_2 , die Abgabe von CO_2 und die H_2O -Spannung konstant bleiben und sich nicht proportional zum äußeren Druck ändern. Unmittelbar nach einem plötzlichen Drucksturz liegen zwar noch nicht die neuen Spannungen in der Lunge vor, jedoch sind die Abweichungen hiervon vernachlässigbar.

Es ist noch zu untersuchen, inwieweit die Einstellung der neuen Spannungen im Gewebe die Einstellung der Spannung in der Lunge stört. Aus Arbeit [3] wissen wir, daß die Lunge bei einer Spannungsdifferenz von 760 mm Hg eine Gasmenge von ungefähr $5\ 000\ \text{cm}^3_{\text{NTP}}/\text{min}$ fördert,

wobei der Kreislauf bei der gleichen treibenden Spannungsdifferenz nur ungefähr 1,4% dieser Menge transportiert. Umgekehrt können wir auch sagen, wenn die gleiche Menge transportiert wird, so liegt über der Lunge nur 1,4% der Spannungsdifferenz von der über dem Kreislauf. Diesen geringen Wert können wir vernachlässigen. Wird z.B. ein Überschuß von 4 atm aus dem Gewebe abtransportiert, so liegt über der Lunge 1,4% dieses Wertes, das sind ungefähr 40 mm Hg.

Für den Transport Gewebe - Außenraum eines Inertgases nehmen wir ein kontinuierliches Spektrum von einzelnen Geweben mit unterschiedlichen Halbwertszeiten T_H zwischen Null und Unendlich an. Diese einzelnen Gewebe sind natürlich mit unterschiedlichen Volumina vertreten. Wir spalten daher die gesamte Kapazität C_{tis} des Gewebes für die Speicherung von gelöstem Gas auf in die Beiträge $c(T_H)$ der einzelnen Gewebe. Eine Summation über die einzelnen Beiträge muß natürlich wieder die gesamte Speicherkapazität ergeben:

$$(7) \quad C_{tis} = \int_0^\infty c(T_H) dT_H.$$

Wir wenden diese Überlegung an auf die Elimination einer Gasart aus dem Gewebe. Hierbei nehmen die Spannungen p_{tis} in den einzelnen Geweben von einem gemeinsamen Anfangswert $p_{tis}(t_0)$ mit der Zeit t unterschiedlich schnell auf Null ab:

$$(8) \quad p_{tis}(t) = p_{tis}(t_0) \cdot 2^{-(t-t_0)/T_H}.$$

Die einzelnen Gewebe geben Gas ab. Insgesamt wird je Zeiteinheit die Gasmenge i eliminiert:

$$(9) \quad i = - \int_0^\infty \frac{dp_{tis}}{dt} dT_H = \ln 2 \int_0^\infty c(T_H) \frac{p_{tis}}{T_H} dT_H.$$

Diese abtransportierte Gasmenge i in Abhängigkeit von der Zeit t läßt sich experimentell ermitteln und daraus mit Hilfe der Umkehrung von Gl.(9) die auf die Halbwertszeit bezogene Speicherkapazität $c(T_H)$ bestimmen.

Für unsere Anwendung nehmen wir für den Transport Gewebe - Atemgas eines Inertgases einige repräsentative Gewebe (Compartments) mit unterschiedlichen Halbwertszeiten an.

Bei einer beliebigen zeitlichen Änderung der Alveolardruckspannung p_{alv} einer Gasart berechnet sich die Gewebsspannung p_{ex} als Funktion der Zeit zu (s. Gl. (18) der Arbeit [5]).

$$(10) \quad p_{tis}(t) = 2^{-((t-t_0)/\tau_H)} \frac{\ln 2}{\tau_H} \int_{t_0}^t + ((\bar{t}-t_0)/\tau_H) p_{alv}(\bar{t}) d\bar{t} + p_{tis}(t_0) 2^{-((t-t_0)/\tau_H)}$$

$p_{tis}(t_0)$: Gewebsspannung zu Beginn (Zeitpunkt t_0) der betrachteten Zeitspanne.

5.1.5 Gastransport in eine Blase

In einer Blase (b_l) liegen die Gasspannungen von O_2 , CO_2 und H_2O des umgebenden Gewebes vor, die wir mit ihren Normalwerten ansetzen.

Wir können den Strom i_{b_l} aus dem Gewebe in die Blase hinein aus der Spannungsdifferenz ($p_{tis} - p_{b_l}$) und einem radiusabhängigen Widerstand R berechnen:

$$(11) \quad i_{b_l} = \frac{p_{tis} - p_{b_l}}{R}$$

Die Blase selbst besitzt eine Speicherkapazität:

$$(12) \quad C_{b_l} = \frac{4 \pi r_{b_l}^3}{3 \mathcal{R} T} = \frac{V_{b_l}}{\mathcal{R} T},$$

$\mathcal{R}$: Gaskonstante,
 T : absolute Temperatur.

Die Größen V_{b_l} , r_{b_l} bedeuten Volumen und Radius der Blase.

Ein Gasstrom in die Blase hinein führt zu einer Spannungsänderung dp_{b_l}/dt oder zu einer Volumen- bzw. Kapazitätsänderung dC_{b_l}/dt :

$$(13) \quad i_{b_l} = C_{b_l} \frac{dp_{b_l}}{dt} + p_{b_l} \frac{dC_{b_l}}{dt}.$$

Abhängig von der Art des dominierenden Transportmechanismus gilt für den Widerstand R eine unterschiedliche Gesetzmäßigkeit. Ist der Gasedurchtritt durch die Oberfläche der Blase der dominierende Mechanismus, so wird R umgekehrt proportional zur Oberfläche A_{b_l}

$$(14) \quad 1/R = \text{const} \cdot 4 \pi r_{b_l}^2 = \text{const} \cdot A_{b_l},$$

wobei die Konstante von der Beschaffenheit des Gewebes und von der

Gasart bestimmt wird und mit der Permeabilität der Oberfläche wächst.

Bei der Diffusion in der Umgebung der Blase als dominierendem Mechanismus müssen wir unterscheiden, ob die Diffusionsschicht bis ins Unendliche reicht oder eine konstante Dicke d besitzt. Im ersten Fall haben wir

$$(15) \quad 1/R = D_{tis} k_{tis} 4 \pi r_{b_l}^2 / d,$$

im zweiten Fall

$$(16) \quad 1/R = D_{tis} k_{tis} 4 \pi r_{b_l},$$

D_{tis} : Diffusionskoeffizient,
 k_{tis} : Löslichkeitskoeffizient.

Besuchen wir vorerst nur die Abhängigkeit des Widerstandes R vom Radius, so liefern die Gleichungen (14) bis (16) die beiden unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten

$$(17a) \quad 1/R = \text{const} \cdot r_{b_l},$$

$$(17b) \quad 1/R = \text{const} \cdot A_{b_l}.$$

Die beiden Gleichungen beschreiben die von uns verwendeten Modelle für den Transport Gewebe - Blase. Die Proportionalitätskonstante hängt noch von Gas- und Gewebseigenschaften ab. Für eine konstante Diffusionsschicht und damit für Gl. (17b) spricht, daß das engmaschige Kapillarnetz für einen Spannungsausgleich in der Umgebung der Blase sorgt und damit die Diffusionsschicht auf eine dünne Grenzschicht reduziert. Dagegen kann man jedoch angeben, daß die Kapillaren in der Umgebung der Blase zusammengedrückt werden. Dieser zusammengedrückte Bereich wächst mit dem Radius. Als einfachste Annahme kann man die Schichtdicke proportional zum Radius annehmen. Das gleiche Ergebnis bringt auch eine Theorie der stationären Diffusion aus dem Unendlichen in die Blase hinein.

Die Entleerung des Gewebes in die Blase hinein soll vernachlässigbar sein beim Transport Gewebe - Alveole. Dies ist natürlich nicht der Fall, wenn Gaskeime das Gewebe dicht durchsetzen und bei einer Erniedrigung der Spannung des Atemgases die gesamte überschüssige Gasmenge aufnehmen.

men. Es dürfen nur vereinzelt Gaskeime vorhanden sein, die sich weder gegenseitig noch den Abtransport aus dem Gewebe beeinflussen.

Ein Gewebe besitzt eine bestimmte Empfindlichkeit, die wir durch die maximale Größe einer beschwerdelosen Gasblase kennzeichnen.

5.1.6 Modell für die Gasblase

Die unter 5.1.1 bis 5.1.5 aufgeführten Punkte definieren unser Modell für die Berechnung von Gasblasen. Bei der Anwendung auf einen Einzelfall müssen wir beachten, daß die physiologischen Daten individuelle Streuungen zeigen können. Insbesondere können das Auftreten von Gaskeimen, der Übergang Gaskeim - Gasblase und die Empfindlichkeit des Gewebes noch individuellen Schwankungen unterworfen sein. In unserem Modell verwenden wir für alle oben angegebenen Eigenschaften Mittelwerte.

Die maximale Größe einer beschwerdelosen Gasblase läßt sich aus einer Analyse der sicheren Tauchtabellen gewinnen. Die so berechneten Werte enthalten noch einen Sicherheitsfaktor. Bei einem Überschreiten dieser berechneten Gasblasengröße sind mit zunehmender Wahrscheinlichkeit Beschwerden zu erwarten, die im Einzelfall früher oder später auftreten.

5.2 Grundgleichung für das Blasenwachstum

5.2.1 Herleitung

In der Arbeit [5] haben wir eine Gleichung für die Bildung von Gasblasen hergeleitet, die wir auf einen einstufigen Drucksturz anwendeten. Wir wollen diese Gleichung für eine beliebige kontinuierliche oder mehrstufige Dekompression umschreiben.

Wiederum setzen wir voraus, daß das Atemgas aus einem Inertgas X und aus Sauerstoff bestehe. Wir drücken die zeitabhängigen Spannungen dieser beiden Gase durch den Druck P_{ex} des Atemgases aus

$$(18) \quad P_{ex} = (1 - \epsilon) P_{ex},$$

$$(19) \quad P_{exO_2} = \epsilon P_{ex}.$$

Hierbei bedeutet ϵ den Sauerstoffanteil des Atemgases.

Wie in der Arbeit [5] verwenden wir folgende Werte für die einzelnen Gasspannungen. Das Gas X besitzt über der Lunge eine Spannungsdifferenz von 30 mm Hg:

$$(20) \quad P_{ex} - P_{alv} = 30 \text{ mm Hg}.$$

Die Gase O_2 , CO_2 und H_2O tragen in der Blase mit 130 mm Hg zur Gesamtgasspannung bei. Der elastische Druck des Gewebes, die Oberflächenspannung und der hydrostatische Druck (s. Fußnote S. 21) wirken mit 50 mm Hg auf die Blase.

Mit diesen Daten vereinfacht sich die Druckbilanz der Blase zu

$$(21) \quad P_{bl} = P_{ex} + 50 \text{ mm Hg}$$

$$P_{bl} + 130 \text{ mm Hg} = P_{ex} + 50 \text{ mm Hg}$$

$$P_{bl} = P_{ex} - 80 \text{ mm Hg}$$

P_{bl} : Gesamtgasspannung in der Blase,
 P_{bl} : Spannung des Gases X in der Blase.

Der einfacheren Schreibweise wegen werden wir in den folgenden Gleichungen anstelle des Druckes P_{ex} des Atemgases die um 80 mm Hg niedrigere Spannung P_{bl} des Gases X in der Blase verwenden. Eine Kombination der Gleichungen (18) bis (21) ergibt

$$(22) \quad P_{alv} = (1 - \epsilon) P_{bl} + 50 \text{ mm Hg} - \epsilon \cdot 80 \text{ mm Hg}.$$

Aus dieser Spannung des Gases X in der Alveole können wir mit Hilfe von Gl. (10) die Spannung im Gewebe berechnen zu

$$(23) \quad P_{tis}(t) = 2 \frac{-(t - t_0)/T_H}{T_H} \ln 2 \int_0^t \frac{(\bar{P} - t_0)/T_H}{2} \times \\ \times [(1 - \epsilon) P_{bl} + 50 \text{ mm Hg} - \epsilon \cdot 80 \text{ mm Hg}] d\bar{t} + \\ + P_{tis}(t_0) 2 \frac{-(t - t_0)/T_H}{T_H}.$$

Aus den Gleichungen (11)-(13), (15), (16) finden wir eine Differentialgleichung für das Wachstum der Oberfläche A_{bl} bzw. des Radius r_{bl} der Blase

$$(24a) \quad \frac{dA_{bl}}{dt} = \beta_a \frac{P_{tis} - P_{bl}}{P_{bl}} - \frac{2}{3} \frac{A_{bl}}{P_{bl}} \frac{dP_{bl}}{dt},$$

$$(24b) \quad \frac{dr_{bl}}{dt} = \beta_b \frac{P_{tis} - P_{bl}}{P_{bl}} - \frac{1}{3} \frac{r_{bl}}{P_{bl}} \frac{dP_{bl}}{dt}$$

mit

$$(25a) \quad \beta_a = 8 \pi D_{tis} k_{tis} \mathcal{R} T,$$

$$(25b) \quad \beta_b = D_{tis} k_{tis} \mathcal{R} T / d.$$

Damit stellt sich also die Situation folgendermaßen dar. Ein beliebiger Druckverlauf des Atemgases sei durch P_{ex} oder aber P_{bl} als Funktion der Zeit und durch einen zeitabhängigen Sauerstoffanteil ϵ vorgegeben. Mit Hilfe von Gl.(23) können wir dann in jedem Zeitpunkt für jedes Gewebe die Gasspannung P_{tis} des Gases X berechnen. Damit gehen wir dann in Gl.(24) für das Blasenwachstum ein.

In Gl.(24) haben wir zwei Beiträge zum Blasenwachstum. Der erste Summand auf der rechten Seite beschreibt den Transport in die Blase hinein, wodurch sich die Menge des Gases X in der Blase erhöht. Der zweite Summand beschreibt die Vergrößerung der Blase bei einer Erniedrigung des Druckes des Atemgases, wobei die Menge des Gases in der Blase konstant bleibt.

Unter Normalbedingungen und bei einer langsamen Dekompression ist die rechte Seite von Gl.(24) negativ, eine vorhandene Blase wird abgebaut, eine Blasenbildung ist nicht möglich. Erst bei einer genügend schnellen Dekompression wird die rechte Seite der Gleichung (24) positiv und bei Überschreitung einer genügend großen Überspannung ($P_{tis} - P_{bl}$) bildet sich dann eine Gasblase aus, deren Anfangsgröße wir vernachlässigen. Die als Differenz der Gesamtspannungen ausgedrückte Überspannung ($P_{tis} - P_{bl}$) ist aber gleich der in Gl.(24) auftretenden Differenz ($P_{tis} - P_{bl}$) der Spannungen des Gases X.

Zur weiteren Auswertung der Gleichung (24) wollen wir zuerst den Beitrag des zweiten Summanden allein untersuchen. Bei Vernachlässigung des ersten Summanden können wir die Gleichung integrieren und erhalten

$$(26a) \quad A_{bl} \sim P_{bl}^{-2/3}$$

$$(26b) \quad r_{bl} \sim P_{bl}^{-1/3}.$$

Dieses ist aber genau die Aussage des idealen Gasgesetzes

$$(27) \quad V_{bl} P_{bl} = \text{const}$$

für eine konstante Menge des Gases X in der Blase.

Zur Berücksichtigung auch des ersten Summanden in Gl.(24) machen wir den Lösungsansatz:

$$(28a) \quad A_{bl} = P_{bl}^{-2/3} g_a(t),$$

$$(28b) \quad r_{bl} = P_{bl}^{-1/3} g_b(t)$$

und erhalten für die noch unbekannte Funktion g die Differentialgleichung

$$(29a) \quad \frac{dg_a}{dt} = \beta_a \frac{P_{tis} - P_{bl}}{P_{bl}^{1/3}}$$

$$(29b) \quad \frac{dg_b}{dt} = \beta_b \frac{P_{tis} - P_{bl}}{P_{bl}^{2/3}}.$$

Eine Integration vom Anfang t_0 der Blasenbildung liefert die Funktion g . Sie beschreibt die Oberfläche bzw. den Radius der auf den Normaldruck $P_{bl} = 1$ umgerechneten Gasblase und ist damit bei konstanter Temperatur allein eine Funktion der Gasmenge. Bei einer plötzlichen Änderung des Druckes des Atemgases und damit der Gasspannung P_{bl} bleibt die Größe g konstant. Erst ein Transport in die Blase hinein ändert die Gasmenge und damit die Größe g . Mit Gl.(28) finden wir dann aus g die Grundgleichung für das Wachstum der Blase.

$$(30a) \quad A_{bl}(t) = \frac{8 \pi D_{tis} k_{tis} \mathcal{R} T}{P_{bl}^{2/3}} \int_{t_0}^t \frac{P_{tis} - P_{bl}}{P_{bl}^{1/3}} d\bar{t},$$

$$(30b) \quad r_{bl}(t) = \frac{D_{tis} k_{tis} \mathcal{R} T}{d P_{bl}^{1/3}} \int_{t_0}^t \frac{P_{tis} - P_{bl}}{P_{bl}^{2/3}} d\bar{t}.$$

Die anfängliche Größe der Gasblase zum Zeitpunkt t_0 konnte vernachlässigt werden.

5.2.2 Diskussion

Wir wollen jetzt die einzelnen Beiträge diskutieren, die nach Gl.(30) zum Wachstum der Blase beitragen. Im Integral tritt im Zähler die treibende Spannung $(p_{tis}-p_{bl})$, die wir praktisch gleich der Überspannung $(p_{tis}-P_{ex})$ sehen können (s. Gl.(21)):

$$(31) \quad (p_{tis}-p_{bl}) \approx (p_{tis}-P_{ex}) .$$

Durch die Integration wird summiert über diese Überspannung, dividiert durch eine Potenz der Spannung p_{bl} bzw. des äußeren Druckes P_{ex} .

Multiplizieren wir dieses Integral mit β (s. Gl.(25)), so erhalten wir bis einen konstanten Faktor die Gasmenge in der Blase. Betrachten wir zunächst das Produkt $D_{tis} \cdot k_{tis}$ in der Größe β für die beiden Gase Helium und Stickstoff. Helium besitzt den größeren Diffusionskoeffizienten D_{tis} und die kleinere Löslichkeit k_{tis} . Da das Produkt dieser beiden Koeffizienten in der Formel für die Blasengröße auftritt, werden gleiche Spannungen zu ungefähr gleicher Blasengröße führen. Wir können daher bei Stickstoff-Helium-Gemischen beide Gase im Gewebe wie ein einheitliches Gas betrachten, das mit der Gesamtüberspannung $(p_{tis}-p_{bl})$ anstelle von $(p_{tis}-p_{bl})$ in Gl.(24) in die Blase transportiert wird. Der Druckfaktor vor dem Integral rechnet die Gasmenge in eine Blasengröße um, hierdurch wird z.B. der Einfluß einer Rekompensation auf schon gebildete Blasen verständlich.

6. Zusammenfassung

HALDANE [6] begründete eine empirische Methode zur Berechnung von beschwerdelosen Dekompressions-Schemata. Hiernach vergleicht man in den einzelnen Geweben, charakterisiert durch ihre Halbwertszeiten, die vorliegenden Gasspannungen mit bestimmten erlaubten Werten. Wir wissen jedoch, daß nicht die Gasspannungen an sich, sondern Gasblasen im Organismus die Druckfalbeschwerden hervorrufen. Vom Standpunkt der Gasblasenbildung lassen sich aus

dem empirischen Material folgende Schlüsse ziehen. Bei Dekompressionen nach kurzzeitigen Tauchgängen bilden sich im Organismus vorübergehende beschwerdelose Gasblasen, die in kurzer Zeit wieder abgebaut werden. Bei Dekompressionen nach langem Aufenthalt werden die zur Gasblasenbildung erforderlichen Überspannungen nicht erreicht.

Auf dieser Grundlage haben wir einen Satz von zulässigen Gesamtgasspannungen entwickelt. Hieraus lassen sich für beliebige Tauchgänge in He/O₂-Gemischen beschwerdelose Dekompressionen ableiten. Im Gegensatz zu dem Vorschlag von WORKMAN [8] wachsen in unserem Vorschlag die erlaubten Überspannungen mit zunehmender Tiefe nur bis zu einer bestimmten Grenze. Wie SCHREINER [9] haben wir das Sättigungsverhalten des Gewebes durch die Einführung von Compartments erfaßt, wobei wir für Stickstoff ein zusätzliches 600-Minuten-Gewebe eingeführt haben. Auf diesem Wege haben wir einen unvollständigen Gasaustausch Gewebe-Kapillaren berücksichtigt, wie er durch eine Vermaschung der Kapillaren zustande kommt. Durch Einführung der Compartments ist die Berechnung der Gasspannungen im Gewebe unabhängig geworden vom speziellen Transportmechanismus Außenraum-Gewebe.

Die Grundgleichungen für das Wachstum einer Gasblase werden hergeleitet. Es ergibt sich angenähert, daß in einem Helium-Stickstoff-Gemisch die Gesamtgasspannung das Blasenwachstum bestimmt. Hierdurch wird die Verwendung der Gesamtgasspannung im Gewebe als kontrollierende Größe in unserem Vorschlag bestätigt.

Wir haben die Halbwertszeit eines Compartments als zeitliche konstante Größe betrachtet. Änderungen des Kreislaufs, wie z.B. durch den Tag/Nachtrhythmus, durch Sauerstoffatmung oder andere Faktoren wurden vernachlässigt. In einer detaillierteren Theorie könnten diese Einflüsse durch Einführung zeitabhängiger Halbwertszeiten berücksichtigt werden.

Als Erweiterung unserer Arbeit müßte man versuchen, über das Blasenwachstum Dekompressions-Schemata für kurze Tauchgänge zu berechnen. Dies könnte eine Bestätigung der von uns geforderten Existenz beschwerdeloser Gasblasen bringen. Ein weiteres, noch

offenes Problem ist bei langen Tauchgängen die Druckabhängigkeit der zur Blasenbildung notwendigen Überspannung. Aus Sicherheitsgründen wurde in unserem Vorschlag diese Überspannung konstant angenommen, wie es die Tabelle 6 für lange Halbwertszeiten zeigt.

Herrn Dr.med. A. LOW und Herrn Dr.med. H. OSER danken wir für die Zusammenstellung der von uns analysierten Tauchgänge.

Die Rechnungen wurden auf der IBM 7090/1410 der Gesellschaft für Mathematik und Datenverarbeitung e.V., Birlinghoven, ausgeführt. Wir bedanken uns für die Überlassung von Rechenzeit.

Prof. Dr.med.habil. Siegfried RUFF
53 Bonn-Bad Godesberg, Kölner Str. 70

Prof. Dr.rer.nat. Karl Gerhard MÜLLER
Physikalisches Institut der Universität Bonn
53 Bonn, Wegelerstr. 10

7. Schrifttum

- [1] FUST, H.D.
HARTMANN, H.
Lengede war Neuland für Arzt und Ingenieur.
VDI-Nachrichten 16 (1964).
- [2] HARTMANN, H.
FUST, H.D.
Langzeit-Druckkammer-Versuche im Bereich von 4-23 ata.
Dräger-Heft Nr.265 (1966), S.2-18.
- [3] MÜLLER, K.G.
RUFF, S.
Beschreibung und Berechnung physiologischer Transportvorgänge.
Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 20 (1964), S.337-355.
- [4] MÜLLER, K.G.
RUFF, S.
Gasblasenbildung im Organismus beim Druckfall.
Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 20 (1965), S.521-544.
- [5] RUFF, S.
MÜLLER, K.G.
Theorie der Druckfalbeschwerden und ihre Anwendung auf Tauchtabeln.
Int. Z. angew. Physiol. einschl. Arbeitsphysiol. 23 (1966), S.251-292.
- [6] HALDANE, J.S.
PRIESTLEY, J.G.
Respiration, S.327-361, New Haven: Yale University Press 1935.
- [7] DES GRANGES, M.
Standard Air Decompression Table.
U.S. Navy Experimental Diving Unit, Research Report 5-57 (1956).
- [8] WORKMAN, R.D.
Calculation of Decompression Schedules for Nitrogen-Oxygen and Helium-Oxygen Dives.
U.S. Navy Experimental Diving Unit Research Report 6-65 (1965).
- [9] SCHREINER, H.R.
Advances in Decompression Research.
1968 Puget Sound Symposium on physiological Problems of Man-in-the-Sea Seattle, Washington, U.S.A. (1968).

Physical Factors in Bubble Formation.
in: Decompression sickness, P. 90.
Philadelphia, London, Saunders
1951.

A N H A N G 1
Unser Vorschlag für Ausschleusstabellen für das Arbeiten unter
Druckluft

Tiefe [m]	Iso- pres- sions- zeit [min]	Zeit bis zur ersten Stufe [min]	Aufenthaltszeiten auf den Stufen [min]				Dekom- pressions- zeit [min]
			12 m	9 m	6 m	3 m	
10	540	4 (4)				3 (14)	4 (4)
11	480	3 (4)				24 (17)	6 (4)
12	480	3 (3)				43 (29)	27 (17)
13	480	4 (4)				59 (46)	47 (33)
14	480	4 (4)				69 (55)	63 (50)
15	420	4 (4)				84 (69)	73 (59)
16	420	4 (5)			4	90 (75)	92 (74)
17	420	4 (4)			21 (17)	90 (75)	115 (96)
18	360	4 (4)			26 (22)	86 (71)	116 (97)
19	360	5 (5)			40 (36)	91 (76)	136 (117)
20	360	5 (5)			54 (50)	95 (80)	154 (135)
21	360	5 (5)			67 (63)	101 (83)	173 (151)
22	360	5 (5)		11 (14)	74 (65)	107 (90)	197 (174)
23	360	5 (5)		25 (28)	79 (65)	111 (97)	220 (195)
24	240	5 (5)		4 (4)	60 (56)	85 (70)	154 (135)
25	240	6 (6)		10 (10)	66 (62)	92 (77)	185 (167)
26	240	6 (6)		17 (19)	70 (65)	95 (80)	200 (182)
27	240	7 (7)		27 (31)	72 (65)	100 (83)	217 (197)
28	240	7 (7)		38 (42)	72 (65)	105 (87)	234 (211)
29	240	7 (7)		49 (53)	73 (64)	107 (92)	251 (227)
30	240	6 (6)	4 (4)	57 (60)	77 (65)	107 (92)	251 (227)

Tabelle 7 Lange Isopressionszeiten, Dekompression in Druckluft;
die eingeklammerten Werte wurden berechnet mit
 $M_0(t_H) = 16 \text{ m}$ für $t_H = 80 - 600$.

Tiefe [m]	Iso- pressions- zeit [min]	Zeit bis zur ersten Stufe [min]	Aufenthaltszeiten auf den Stufen [min]				Dekom- pressions- zeit [min]
			12 m	9 m	6 m	3 m	
10	540	4					4
11	480	3				1	4
12	480	3				9	12
13	480	4				17	21
14	480	4				24	28
15	420	4				28	32
16	420	4			2	35	39
17	420	4			8	35	47
18	360	4			10	35	47
19	360	5			15	35	55
20	360	5			21	36	62
21	360	5			26	38	69
22	360	5		4	28	39	76
23	360	5		9	28	41	83
24	240	5		2	22	33	62
25	240	6		4	25	33	68
26	240	6		7	26	34	73
27	240	6		10	28	34	78
28	240	7		14	28	36	85
29	240	7		18	28	37	90
30	240	6	2	20	28	38	94

Tabelle 8 Lange Isopressionszeiten, Dekompression ab 9 m in Sauerstoff.

Tiefe [m]	Iso- pressions- zeit [min]	Zeit bis zur ersten Stufe [min]	Aufenthaltszeiten auf den Stufen [min]				Dekom- pressions- zeit [min]
			12 m	9 m	6 m	3 m	
10	120	4					4
11	120	4					4
12	120	4					4
13	120	5				4	5
14	120	4				9	8
15	120	4				14	13
16	120	5				18	19
17	120	5				22	23
18	120	5				26	27
19	120	6				28	32
20	120	5			2	33	35
21	120	5			6	37	44
22	120	6			10	41	53
23	120	6			13	44	60
24	120	6			17	47	67
25	120	7			20	50	74
26	120	7		4	23	53	80
27	120	6		7	24	59	87
28	120	7		10	25	63	96
29	120	7		13	28	67	105
30	120	7					115

Tabelle 9 Kurze Isopressionszeiten, Dekompression in Druckluft.

