

Tauchclub Innsbruck



TAUCHPHYSIK & PHYSIOLOGIE

Foto: DAN RO-RT 2010

Letzte Änderung 2017 H. Zauchner



TAUCHPHYSIK & PHYSIOLOGIE

Die vorliegende Arbeit ist für Taucher gedacht, die schon ausgebildet sind. Es werden daher auch Gebiete behandelt, welche den Taucher berühren, aber nicht unbedingt zur Anhebung der Tauchsicherheit notwendig sind. Einzelne Teilgebiete sind mit Hilfe des „Lehrbuchs der Physik“ [1] bearbeitet und ergänzt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass verschiedene Lehrinhalte, die bis jetzt ungeprüft von einem Tauchbuch ins nächste übertragen worden sind, doch etwas genauer unter die Lupe genommen werden mussten.

Die Dekompression ist für unsere Gesundheit von größter Bedeutung, deshalb soll noch einmal auf die Grundlagen des ZHL-Systems von Bühlmann [2] [3] [16] und auf die Entwicklung von Mikrobläschen eingegangen werden [15]. Damit der Überblick vollständiger wird, wurden aus dem Skriptum „BREVET *+**“ (EN 14153-2) einzelne Punkte wiederholt.

Die Sicherheitsorganisation **DAN** (Divers Alert Network) hat bereits Anfang 2000 die Doppelaufzeichnungen von 1418 Tauchgängen ausgewertet [4]. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass Mikrobläschen durch einen „blasenarmen Aufstieg“ vermieden werden können. Weiterführende Untersuchungen (siehe Titelseite des Skriptums) haben diese Erkenntnisse bestätigt. Erst wenn ein Taucher verstanden hat, warum er einen „tiefen Sicherheitsstopp“ einhalten soll, wird er auch die Anzeigen seines Tauchcomputers kritischer beurteilen können.

Um die mühsame Tauchgangsplanung zu vereinfachen, wurde der Luftverbrauch durch den „Druckverbrauch“ ergänzt und der „ZH-L16 NITROXPLANER“ entwickelt, welcher die ursprünglichen Diagramme ersetzt. Die Planung kommt ohne umständliche Berechnungen aus. Man liest die „Dauer der Luftversorgung“ = „voraussichtliche Grundzeit“ ab und bestimmt den Flaschendruck, mit dem man den Aufstieg beginnen muss. Ein Taucher kann auch ohne luftintegrierten Computer ablesen, wie lange seine Luft noch reicht.

Für den interessierten Taucher wurden Fragen mit Antworten ausgearbeitet, damit er überprüfen kann, wie weit er die wesentlichen Inhalte verstanden hat.

Alle in diesem Skriptum enthaltenen Angaben und Zusammenhänge sind nach bestem Wissen erarbeitet und sorgfältig geprüft worden. Die Angaben beziehen sich auf die angegebenen Quellen, für welche der Autor keine Verpflichtung oder Garantie übernehmen kann. Jeder Leser kann die Angaben selbst nachprüfen.

Die Tauchgangsplanung mit Tabelle dauert 1 min, getaucht wird mit Computer.

Impressum:

Autor: Ing. Helmut Zauchner CMAS M TNX AUT 10/04
Leiter der CMAS Arbeitsgruppe „Altitude Diving“

Letzte Änderung: Sept 2017



Inhaltsverzeichnis

1.	Vorwort	7
2.	Physikalische Grundlagen	8
2.1.	Eigenschaften des Wassers	8
2.2.	Auftrieb im Wasser (Gesetz von Archimedes)	10
2.3.	Sehen unter Wasser	11
2.3.1.	Lichtbrechung für den Taucher [1]	12
2.3.2.	Die Perspektive	13
2.3.1.	Totalreflexion an der Wasseroberfläche	14
2.3.2.	Farbsehen unter Wasser [1]	15
2.3.3.	Das Wasser absorbiert Licht	16
2.4.	Hören unter Wasser	16
2.5.	Wärmeübertragung / Abkühlung	17
2.6.	Die physikalischen Einheiten m, kg und Sekunde [1]	18
2.7.	Eigenschaften der Luft	19
3.	Gasgesetze	20
3.1.	Das Gasgesetz für das ideale Gas [1]	20
3.2.	Gesetz von Boyle-Mariotte (engl.: Boyle's Law) [17]	21
3.3.	Gesetz von Amontons (erste Form des Charles'/Gay-Lussac's Law) [17]	22
3.4.	Gesetz von Gay-Lussac (zweite Form des Charles'/Gay-Lussac's Law) [17]	23
3.5.	Gesetz von Van der Waals	23
3.6.	Gesetz von Dalton [1]	24
3.7.	Gesetz von Henry	25
3.8.	Alle Gasgesetze wirken gleichzeitig	26
4.	Gewebe/Kompartimente	27
4.1.	Aufladung und Entladung von Kompartimenten	27
4.1.1.	Beispiel für „Entsättigung“ und Halbwertszeit	29
4.1.2.	Beispiel für die „Aufsättigung“	29
4.2.	Gewebekoeffizienten von Bühlmann	31
5.	Gastheorien	32
5.1.	Theorie der gelösten Gase (Gasdiffusion)	32
5.2.	Theorie und Modell der Mikrobläschen	35
5.3.	Der tolerierte Umgebungsdruck von Bühlmann	38
6.	Austauschvorschriften	39
7.	Einflüsse welche die Dekozeit verändern	40
7.1.	Druckänderungen während eines Tauchgangs	42
7.2.	Aufstiegsgeschwindigkeit	43
7.3.	Sicherheitsstopps	45
7.4.	Aufstiegsmodell	45
7.4.1.	Relative Aufstiegsgeschwindigkeit	45
7.4.2.	Vorteile des Aufstiegsverfahrens	46
7.5.	Nullzeiten	48
7.6.	Nullzeittauchgänge	48
7.7.	Wiederholungstauchgänge	49
7.8.	Tauchgänge im Bergsee	51
7.9.	Höhenbereiche von Tabellen	53
7.10.	Der Rechts - Links - Shunt [16]	54



8.	Tauchcomputer.....	55
8.1.	Wichtige Begriffe.....	57
8.2.	Der Tiefenzuschlag mit ZH-L16.....	61
8.3.	Tauchgangsplanung mit dem Luftverbrauch.....	64
8.4.	Bestimmung des Atem-Minuten-Volumens.....	65
8.5.	Druckverbrauch und AMV.....	65
8.6.	Der Druck für den blasenarmen Aufstieg.....	66
8.7.	Planung mit Tabelle.....	67
8.8.	Der „TAUCHGANGSPLANER“.....	68
8.9.	Anwendung unter Wasser.....	70
8.10.	Tauchen mit Nitrox.....	70
9.	Fragen und Antworten.....	71
10.	Angabe der verwendeten Quellen.....	76
11.	Anhang.....	77

In der Tauchliteratur gibt es viele Widersprüche und viele Fragen bleiben unbeantwortet. Auf der einen Seite gibt es seit vielen Jahren luftintegrierte Computer, auf der anderen Seite wird den Tauchern das Wissen über diese unentbehrlichen Helfer vorenthalten. Obwohl weltweit eine stetige Weiterentwicklung zu erkennen ist, hat unsere Tauchphysik und Physiologie damit nicht Schritt gehalten. Unsere Lehrinhalte müssen sich mit dem Stand der Technik weiterentwickeln.

Dieses Skriptum soll helfen Widersprüche auszuräumen. Es wurde auf der Grundlage von allgemein nachvollziehbaren Recherchen mit Angabe der verwendeten Quellen erarbeitet.

Einzelne Abschnitte enthalten kurze Wiederholungen, damit der Inhalt besser abgerundet wird, wenn man den Abschnitt nachliest.

Sollte ein Leser Fragen zum Inhalt des Skriptums haben oder ergänzende Ideen einbringen wollen, so bitte ich um Nachricht an die Kontaktadresse:

helmut.zauchner@tauchclubinnsbruck.at

Ein herzliches DANKE geht an Franz Siegele, der verschiedene Inhalte kritisch hinterfragt und Korrekturen angeregt hat. Vielleicht gibt es noch mehr kritische Leser?



1. Vorwort

Die Ergebnisse der Untersuchungen von **DAN = Divers Alert Network** [4] und die Veröffentlichungen der Europäischen Gesellschaft für Unterwasser- und Baromedizin EUBS [12] haben die Erkenntnisse über das Aufstiegsverhalten grundlegend verändert.

Die Blasenbildung kann durch einen „blasenarmen Aufstieg“ vermieden werden, indem man den ersten Sicherheitsstopp so tief legt, dass sich Bläschen zurückbilden können, tief genug, dass Inertgas in Lösung bleibt und „abgeatmet“ wird, ohne in die „freie Gasphase“ (Bläschen) überzugehen.

Die „Grundzeit“ [10], wurde als „**Dauer der Luftversorgung**“ neu definiert. Das ist jene Zeit, in der die Aufladung der kritischen Leitgewebe erfolgt, also die Zeit vom Verlassen der Oberfläche bis zum Erreichen des „tiefen Sicherheitsstopps“.

Es ergibt sich daraus ein „standardisierter, blasenarmer Aufstieg“.

Anstelle des Luftverbrauchs tritt der „**Druckverbrauch**“, den jeder Taucher von seinem Finimeter ablesen kann. Vom „NITROXPLANER“ liest man den Druck ab, mit dem Taucher beim „tiefen Sicherheitsstopp“ eintreffen und den Aufstieg zur Oberfläche beginnen sollen. Damit entfallen alle mühsamen Berechnungen und die Möglichkeit von Rechenfehlern. Es fragt sich, wie sinnvoll Berechnungen für Sporttaucher überhaupt sind, denn die Dekompression rechnet ja auch niemand nach.

Die Veröffentlichungen über die Rechenmodelle ZH-L12 [2] [3] und ZH-L16 B [16] von Bühlmann zeigen den **linearen Zusammenhang** von Gewebedruck und dem „Tolerierten Umgebungsdruck“. Für unsere Seen über Meeresniveau wurde daher aus dem Gewebemodell **ZH-L16** der lineare **Tiefenzuschlag** [8] abgeleitet.

Während der „Zeitzuschlag“ den Wiederholungstauchgang ermöglicht, stellt der „ZH-L16 Tiefenzuschlag“ die Dekompression im Bergsee sicher.

Das System der Tiefenzuschläge wird durch einen Abzugssystem für Nitrox [9] erweitert. Für den Taucher ergibt sich ein verändertes Aufstiegsverhalten mit „abgestuften Aufstiegs-geschwindigkeiten“. Mit dem ZH-L16 NITROXPLANER als „**Planungstabelle**“ vereinfacht sich die Tauchgangsplanung. Der veränderte, etwas konservativere „**blasenarme Aufstieg nach DAN**“ kann natürlich auch mit Tauchcomputern angewendet werden.

Immer mehr Computerhersteller bauen den tiefen Stopp in ihre Dekompressionsalgorithmen ein und helfen damit die Anzahl von „unverdienten Dekounfällen“ zu verringern.

Ing. Helmut Zauchner

2. Physikalische Grundlagen

2.1. Eigenschaften des Wassers

Wenn Wasser unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgekühlt wird, bildet sich Eis und es geht in den **festen Zustand** über. Die Wassermoleküle sind starr angeordnet, schwingen aber aufgrund ihrer Temperatur unregelmäßig um eine „Ruhelage“, wie eine Kugel, welche auf ein gespanntes Gummiband aufgefädelt und angestoßen wird. Während sich die meisten Flüssigkeiten beim Erstarren zusammenziehen, dehnt sich das Eis 10 % aus und es schwimmt. (90 % einer Eisscholle sind unter Wasser).

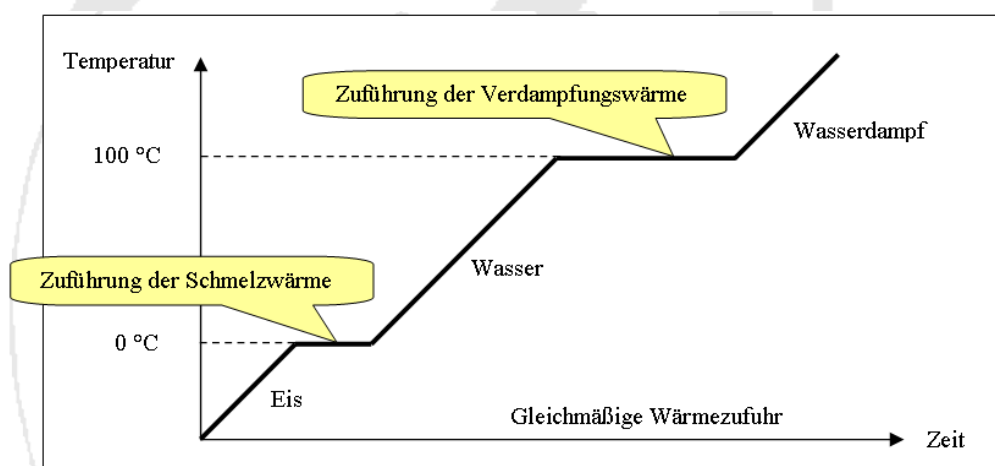
Negative Temperaturen eignen sich schlecht um die Zufuhr von Energie zu beschreiben. Wenn man Eis erwärmt, steigt die Temperatur z.B. von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oder sollte man etwa sagen, sie steigt auf die halbe Temperatur?

Mit der Erwärmung beginnt die Bewegungsenergie der Moleküle zu steigen. Man verwendet daher die „Absolute Temperatur“ die vom absoluten Nullpunkt aus steigt. $0\text{ Kelvin} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$27\text{ }^{\circ}\text{C}$ sommerliche Raumtemperatur ($27\text{ Kelvin} + 273\text{ Kelvin} = 300\text{ Kelvin}$) ist bereits eine relativ hohe absolute Temperatur, wenn man bedenkt, dass Eisen bei der dreifachen Temperatur anfängt zu glühen und bei der vierfachen Temperatur bereits rot glüht. Die absolute Temperatur ist ein Maß dafür, wieviel Wärmeenergie in einem Körper in Form von Wärmeschwingungen gespeichert ist.

Wird Eis erwärmt, so bleibt seine Temperatur beim Schmelzpunkt $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ stehen, bis das gesamte Eis geschmolzen ist. Erst wenn genügend Energie in Form der sog. Schmelzwärme zugefügt worden ist, ist das Wasser in den „**flüssigen Zustand**“ übergegangen. Die Bewegungsenergie seiner Moleküle ist so stark geworden, dass die starre Bindung nicht mehr aufrechterhalten werden kann.

Mit steigender Temperatur zieht sich das Wasser anfangs noch zusammen und erreicht bei $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$ seine größte Dichte von 1 kg/dm^3 (Anomalie des Wassers). Es sinkt im See auf den Grund ab. Der See friert von oben zu und das warme Wasser bildet im Sommer eine „Sprungschicht“, wenn es auf dem kalten Wasser schwimmt (Temperatursprung).



Wird weiterhin Wärmeenergie zugeführt, so steigt die Bewegungsenergie der Wassermoleküle und somit die „Geschwindigkeit“ mit der sie ihre **Wärmeschwingungen** ausführen [1]. Die



„Wasserteilchen“ werden immer lebendiger. Sie stoßen sich gegenseitig so stark ab, dass sie durch die Wasseroberfläche in die Luft gestoßen werden.

Führt man weiterhin Energie zu, so steigt die Temperatur bis zum Siedepunkt. Das Wasser beginnt Blasen zu bilden und Dampf entweicht aus der Flüssigkeit in die umgebende Luft. Das Wasser geht in den **gasförmigen Zustand (Gasphase)** über. Beim Normaldruck (auf Meeresniveau) beträgt der Siedepunkt 100 °C. Erst wenn das gesamte Wasser verdampft ist, steigt die Temperatur des Wasserdampfs weiter.

Wasser kann auch bei niedrigen Temperaturen verdunsten. Wenn ein Wassermolekül schnell genug ist und die Wasseroberfläche verlässt, nimmt es seine Bewegungsenergie mit. Somit wird dem Wasser Energie (Verdampfungswärme) entzogen - ein stabilisierender Faktor, damit die Wasseroberfläche nicht zu warm wird. (Schwitzen kühlt ab). Wasser kann daher gleichzeitig in den 3 sog. „Aggregatzuständen“ fest, flüssig und gasförmig vorkommen.

Aufgrund der relativ hohen Temperatur sind alle Moleküle in Bewegung. Wassermoleküle werden in die Luft gestoßen, Gasmoleküle werden vom Luftdruck ins Wasser gepresst (Gasdifffusion in beide Richtungen). Luft wird im Wasser „physikalisch gelöst“. An der Trennfläche zwischen Luft und Wasser entsteht ein **temperaturabhängiges Gleichgewicht der Gasdrücke von Luft und Wasser**. Die Gaskonzentration sagt aus, wieviel Milligramm Gas pro Liter Wasser gelöst wurden. Wenn Wasser von 0°C auf 30°C erwärmt wird, kann es nur mehr die halbe Gasmenge in Lösung halten.

Durch den Verdunstungsprozess wird Wasserdampf erzeugt. Je höher die Temperatur der Luft, umso mehr Wasser kann in die gasförmige Phase übergehen (Luftfeuchtigkeit). Sinkt die Temperatur, so kondensiert der Dampf wieder, weil die Gasteilchen ihre Bewegungsenergie verlieren. Bei 37 °C Körpertemperatur beträgt der Druck des gesättigten Wasserdampfs in der Lunge des Tauchers konstant 0.063 bar. Das heißt, dass etwa 6 % der Gasmenge in der Lunge des Tauchers aus Wasserdampf besteht.

Je höher die Temperatur und je geringer der Luftdruck, desto leichter perlt gelöste Luft aus dem Wasser aus. Umgekehrt lösen sich Luft und andere Gase umso leichter im Wasser, **je höher der Druck und je tiefer die Temperatur** ist. Wasser löst auch feste Stoffe wie z.B. Salz. In Oberflächennähe ist das Meerwasser am wärmsten. Seine Dichte ist am geringsten, aber immer noch durchschnittlich 2 ½ % größer als die Dichte von Süßwasser.

„Ruhendes“ Wasser leitet die Wärme gleich schlecht wie eine Ziegelmauer [1], kann aber große Wärmemengen speichern und transportieren (Golfstrom).

Das Wasser wird von der Erde angezogen. An allen Punkten einer Wasseroberfläche wirkt die gleiche Anziehungskraft und somit der gleiche Druck. Der „hydrostatische Druck“ sorgt dafür, dass die Wasseroberfläche eine waagrechte Ebene bildet. Wasser lässt sich fast nicht zusammendrücken. Weil sich seine Dichte mit zunehmender Tiefe praktisch nicht verändert, nimmt der Druck mit der Höhe der Wassersäule gleichförmig zu. Die Zunahme beträgt im Meer ziemlich genau **1 bar pro 10 m Tiefe**.

2.2. Auftrieb im Wasser (Gesetz von Archimedes)

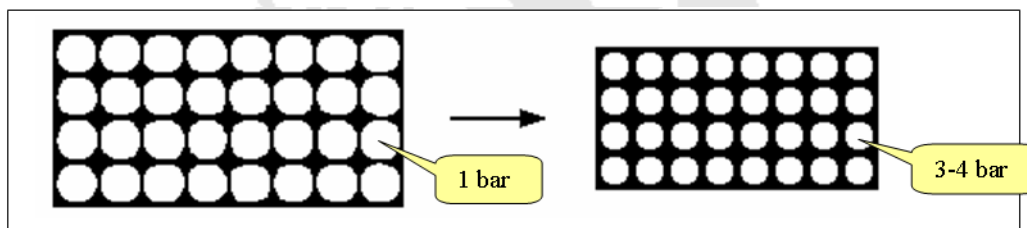
Will man einen Rettungsring unter Wasser drücken, so spürt man sofort die **Auftriebskraft**. Das Gewicht des schwimmenden Rettungsringes und die Auftriebskraft halten sich die Waage.

Der Rettungsring taucht nur so weit ins Wasser, bis die von ihm verdrängte Wassermenge gleich viel wiegt wie er selbst.

Hebt man den Rettungsring geringfügig an, so spürt man sofort wieder einen Teil seines Gewichtes, denn die Auftriebskraft ist gleich dem Gewicht der verdrängten Flüssigkeit [1].

Gewicht und Auftrieb sind gegeneinander gerichtete Kräfte. Die Luftbläschen im Neoprenanzug des Tauchers erzeugen Auftrieb, den ein Taucher mit Bleigewichten am Gurt oder im Jacket ausgleichen muss. Die Luftbläschen werden in der Tiefe zusammengedrückt und der Auftrieb wird verringert.

- **Je nach „Steifigkeit“ des Neoprenanzugs werden die eingeschlossenen Bläschen unterschiedlich weit zusammengedrückt:**



Wenn die Luft in der Flasche verbraucht ist, wird „der Taucher“ einige kg leichter und sein „Auftrieb“ wird größer. Am Ende eines Tauchganges soll der Taucher in 3 m Tiefe schweben können. Er muss laufend „**tarieren**“, indem er Luft in kleinen Stößen ins Jacket einbläst oder ablässt und dadurch sein „spezifisches Gewicht“ an das umgebende Wasser angleicht.

Sinkt der Taucher, so drückt der steigende Umgebungsdruck sein Jacket zusammen. Er verliert Auftrieb und sinkt noch weiter ab. Steigt der Taucher auf, so dehnt sich sein Jacket aus. Er bekommt zusätzlichen Auftrieb und sein Aufstieg wird immer schneller. Rettung in letzter Not kann der „Schnellstopp“ sein. Die Verwendung von Jackets muss daher erlernt und geübt werden. **Der Schnellstopp ist in erster Linie eine Rettungseinrichtung.**

- **Bleibedarf für Gerätetaucher:**

Der Taucher muss für einen 5 bis 7 mm Anzug etwa 6 bis 9 kg Blei mitnehmen, damit er mit voller Lunge und leerem Jacket so weit ins Wasser eintaucht, dass er durch seine Maske gerade noch die Trennlinie zwischen Wasser und Luft sehen kann. **Um absteigen zu können muss der Taucher ausatmen.** Im Meer braucht er bei gleicher Ausrüstung **2-3 kg mehr Blei** entsprechend der größeren Dichte des Meerwassers („Check Dive“ zum Ausprobieren).

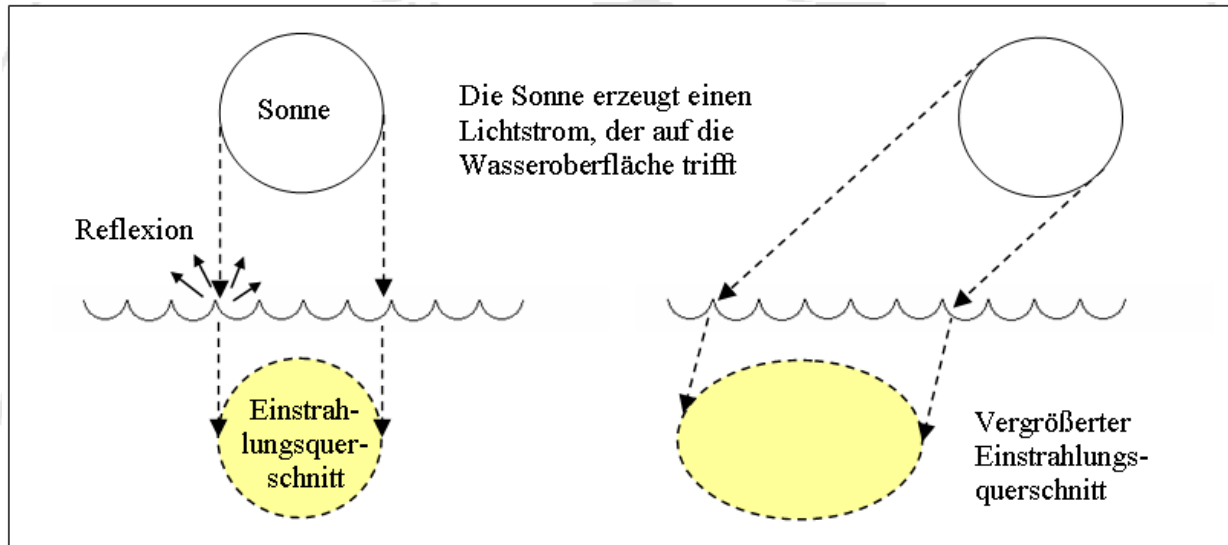
- **Bleibedarf für Freitaucher:**

Für einen 3 mm Anzug ist etwa die halbe Bleimenge ausreichend. Der Taucher muss ruhig auf der Wasseroberfläche liegen und gut „durchatmen“ können. Beim Abtauchen werden Brustkorb und Neoprenanzug zusammengedrückt, so dass der Taucher immer „schwerer“ wird und endlich in 10-15 m Tiefe schweben können soll.

2.3. Sehen unter Wasser

Bei Sonnenhöchststand wird ein Teil des Lichtes von der „rauen“ Wasseroberfläche diffus reflektiert [1] (in alle Richtungen gespiegelt), der andere Teil fällt beinahe senkrecht ins Wasser. Die Lichteinstrahlung ist am größten und die Sicht am besten.

Wenn Sonnenlicht schräg ins Wasser fällt, wird der gleiche Lichtanteil von der Oberfläche reflektiert. Der verbleibende Teil dringt ins Wasser ein und wird in Richtung Grund umgelenkt (gebrochen). Die diffuse Reflexion wird durch den Sonnenstand nicht beeinflusst.



Man kann sich ein weites Rohr vorstellen, welches das Licht der Sonne auffängt. Das Rohr wird so gehalten, dass das gesamte Licht auf die Wasseroberfläche trifft:

Je tiefer die Sonne steht, desto größer wird der gedachte „Einstrahlungsquerschnitt“ desto geringer wird die **Beleuchtungsstärke** (Helligkeit), denn sie nimmt ab, wenn der **Lichtstrom** auf eine größere **Fläche** verteilt wird [1].

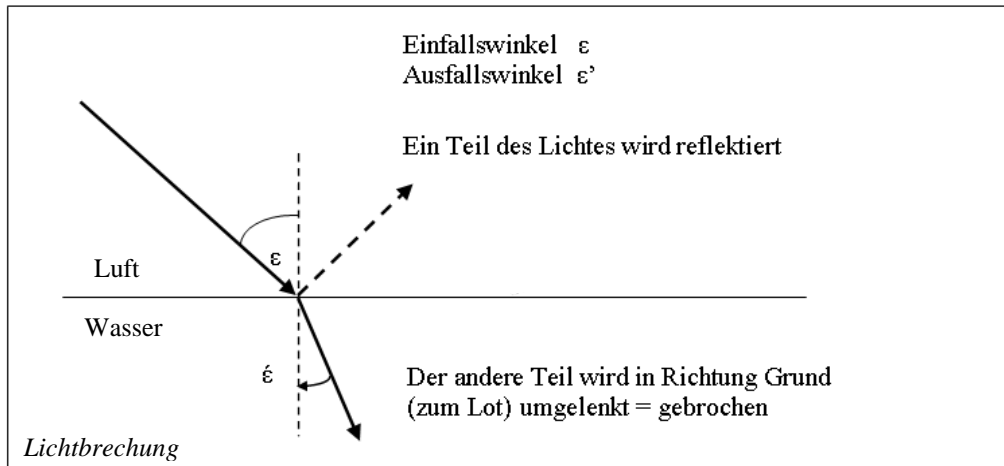
Bei schrägem Sonneneinfall (aber auch im Licht starker Tauchlampen) wird die Sicht zusätzlich vermindert weil **Schwebeteilchen** angestrahlt werden und das Licht zurück werfen (Blendung).

Abhilfe:

Fotografen ersetzen das fehlende Licht durch einen Blitz. Wenn die Schwebeteilchen mitfotografiert werden bringt der Blitz keine Verbesserung. Kommt der Blitz von der Seite, so werden die Schwebeteilchen nicht von vorne beleuchtet und stören nicht so stark.

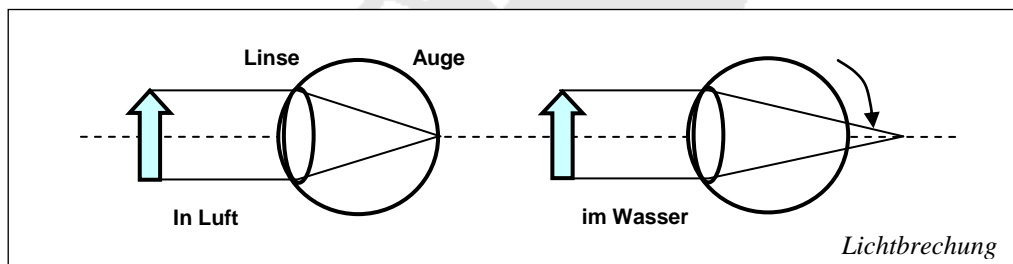
Man verwendet gewöhnlich stark gebündeltes Licht, denn die Beleuchtungsstärke nimmt zu, wenn der Lichtstrom auf eine kleinere Fläche fokussiert wird. Wenn man die Lampe seitlich vom Körper weg hält, schaut man nicht direkt durch den Lichtkegel (ähnlich einem Nebelscheinwerfer) und die Blendung wird etwas geringer.

2.3.1. Lichtbrechung für den Taucher [1]



Das Licht wird (zum Lot) gebrochen, wenn es von einem dünneren Medium (Luft) in ein dichteres Medium (Wasser) übergeht, oder wie z.B. von der Luft ins Auge.

Bei einem normalsichtigen Auge ist die Lichtbrechung durch die Linse gerade so groß, dass auf der Netzhaut ein scharfes Bild entsteht (linkes Bild).



Zwischen Wasser und Auge ist der Dichteunterschied wesentlich kleiner. Das Licht wird weniger weit gebrochen (umgelenkt), das scharfe Bild entsteht hinter der Netzhaut, wie bei einem weitsichtigen Auge (rechtes Bild). Wir sehen unscharf und fühlen uns blind. Sobald wir eine luftgefüllte Maske verwenden, sehen wir wieder scharf.

Geschwindigkeit des Lichts in der Luft: $c_{Luft} = 300\,000 \text{ km/sec}$ (Vakuum)

Geschwindigkeit des Lichts im Wasser: $c_{Wasser} = 225\,000 \text{ km/sec}$

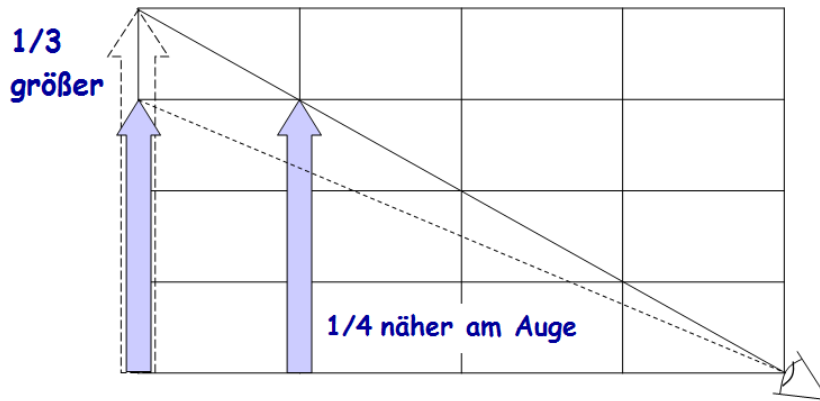
- Die „Brechungsahl“ bezieht sich auf Luft $n_{Luft} \approx 1$. Für Wasser ergibt sich:

$$n_{Wasser} = \frac{c_{Luft}}{c_{Wasser}} = \frac{300\,000 \text{ km/sec}}{225\,000 \text{ km/sec}} = \frac{4}{3} = 1.33$$

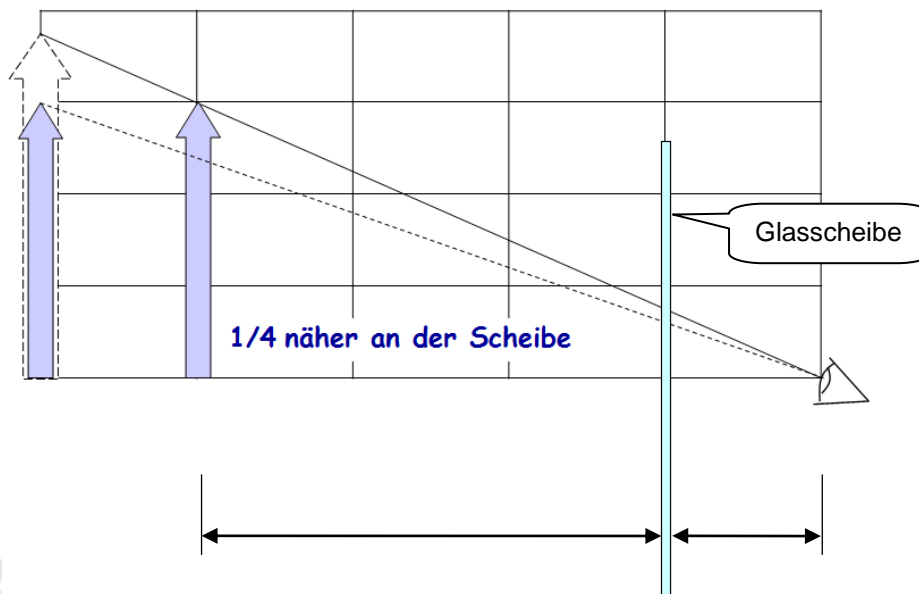
Die Geschwindigkeit des Lichts ist im Wasser $\frac{1}{4}$ langsamer als in der Luft [1]. Die Strecke, die das Licht im gleichen Zeitabschnitt unter Wasser zurücklegt ist somit $\frac{1}{4}$ kürzer als in der Luft.

2.3.2. Die Perspektive

Wenn ein Gegenstand $\frac{1}{4}$ **näher** ans Auge herangerückt wird, so erscheint er genau $\frac{1}{3}$ **größer**.



Diese Erscheinung tritt ganz ohne Wasser auf. Der Beobachter hat mit 2 Augen ein „räumliches Sehen“ und hat **nicht** den Eindruck, dass der Gegenstand nun $\frac{1}{3}$ größer sei.

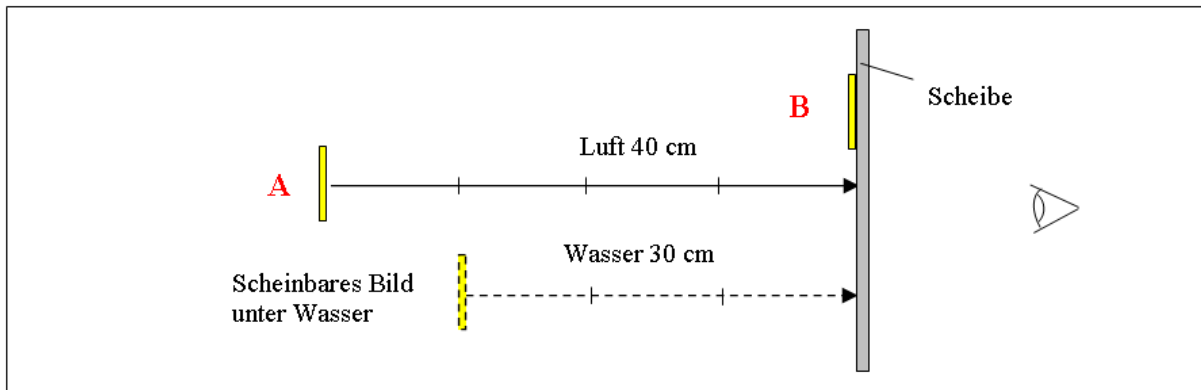


Wenn man durch eine Glasscheibe schaut, sieht man genau genommen das Bild auf der Scheibe. Nun wird der Gegenstand $\frac{1}{4}$ **näher an die Scheibe** herangerückt. Die „Vergrößerung“ hängt nun nicht nur vom Abstand **Gegenstand – Scheibe** sondern auch vom Abstand **Scheibe - Auge** ab. Je größer der Abstand zwischen Auge und Scheibe, umso kleiner sieht man den Gegenstand.

Was passiert, wenn sich der betrachtete Gegenstand in einem Aquarium befindet und die Lichtbrechung dazu kommt?



Das Licht braucht für eine Strecke von 30 cm im Wasser (Aquarium) genau so lang, wie für 40 cm durch die Luft.



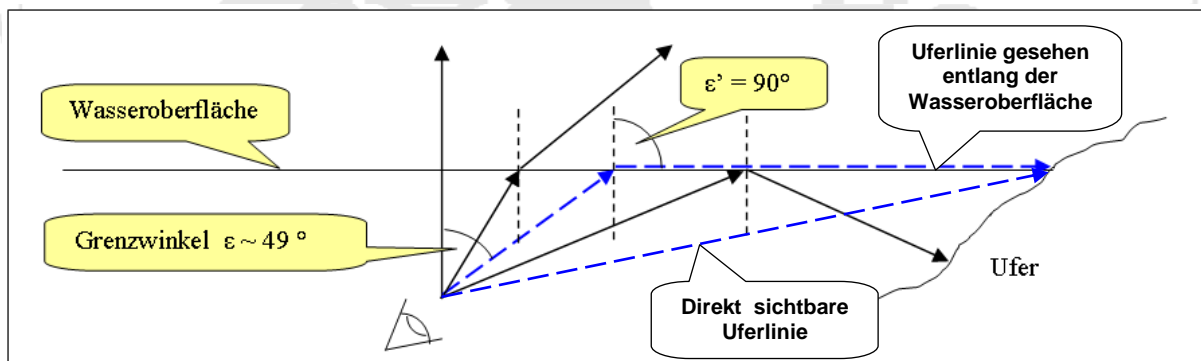
Ein 40 cm entfernter Stab (A) im Aquarium erscheint somit durch das Wasser gesehen **¼ näher an der Glasscheibe** (30 cm) und daher größer. Befindet sich der Stab direkt an der Glasscheibe (B), so findet „keine Vergrößerung“ statt, weil ja „keine Wasserstrecke“ mehr zwischen dem Stab und der Scheibe liegt.

Durch die **Perspektive** erscheint der Stab jedoch größer und erst recht, wenn man mit dem Auge näher an die Scheibe heran kommt. Der Abstand zwischen Auge und Aquarium- oder Maskenscheibe ist somit für die subjektiv empfundene „Vergrößerung“ ausschlaggebend.



Wenn man durchs Wasser gesehen den Eindruck hat, der Stab sei 30 cm weit weg, so ist er **in Wirklichkeit ⅓ weiter entfernt** (40 cm). Tauchanfänger erwischen daher bei Strömung oft die Bootsleiter nicht, weil sie die veränderte Entfernung noch nicht abschätzen können.

2.3.1. Totalreflexion an der Wasseroberfläche



Bei spiegelglatter Oberfläche sieht der Taucher über sich ein „Loch“, durch welches er hindurchschauen kann. Außerhalb des Lochs spiegelt sich der Grund. Der Rand des Lochs wird durch den Grenzwinkel bestimmt. Durch die Lichtbrechung im Grenzwinkel kann ein Taucher (wie ein Fisch) beinahe „an der Wasseroberfläche entlang sehen“.

Brechungsgesetz:
$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \varepsilon'} = \frac{c}{c'}$$

.....für Interessierte

$$\sin \varepsilon = \frac{c}{c'} \sin \varepsilon' = \frac{225\,000 \text{ km/sec}}{300\,000 \text{ km/sec}} \sin (90^\circ) = 0.75$$

$$\varepsilon \approx 49^\circ = \text{Grenzwinkel [1]}$$

Und so macht sich die Totalreflexion bemerkbar:



2.3.2. Farbsehen unter Wasser [1]

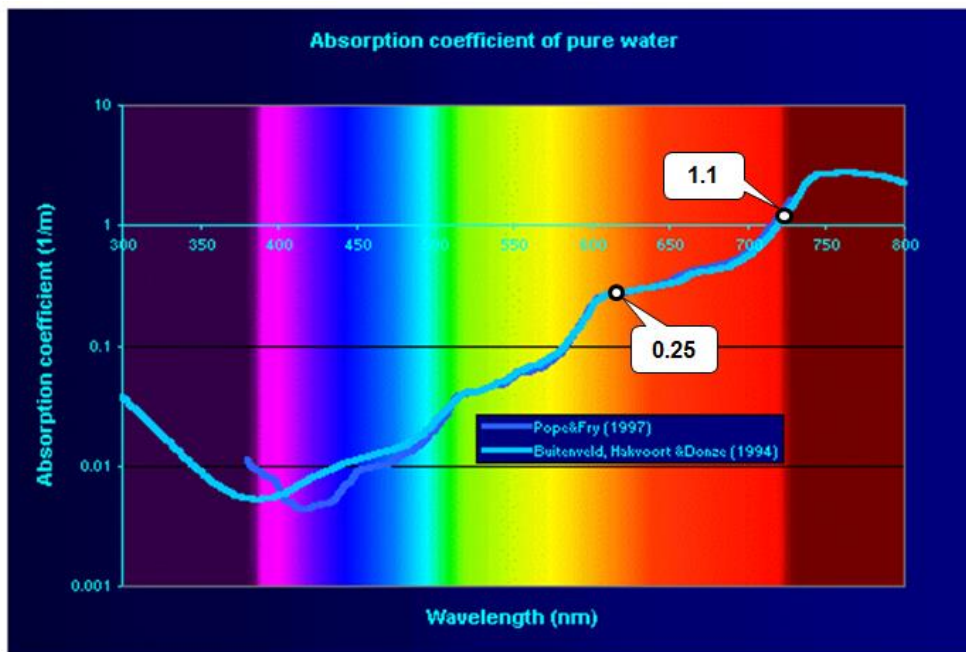
Die Netzhaut des Auges trägt lichtempfindliche Zellen und zwar die farbempfindlichen „Zapfen“ und die hell-dunkel-empfindlichen „Stäbchen“. In der Zone des schärfsten Sehens (Netzhautgrube) sind nur Zapfen. Gegen den Rand der Netzhaut nehmen die schwarz-weiß-empfindlichen Stäbchen zu. Am Netzhautrand befinden sich nur mehr Stäbchen. Während die Zapfen zum Sehen der Farben eine große Helligkeit brauchen, kommen die Stäbchen mit sehr geringer Helligkeit aus. **In der Dämmerung sind daher keine Farben mehr erkennbar** und das Bild wird unscharf. Die Pupille steuert als „Blende“ den einfallenden Lichtstrom, so dass das Auge sehr große Helligkeitsunterschiede verarbeiten kann.

Im trüben Wasser wird das Licht von den Schwebeteilchen sehr schnell verschluckt. Auch im klaren Wasser und bei blauem Himmel geht durch die Reflexion an der Oberfläche so viel Licht verloren, dass in der Tiefe keine Farben mehr erkennbar sind. Weißes Scheinwerferlicht bewirkt im klaren Wasser, dass die natürlichen Farben wieder hervortreten. Im starken Kunstlicht (Nachttauchgang) sind die Farben bei klarem Wasser **auch in großer Entfernung** erkennbar. Eine „Spanische Tänzerin“ erscheint auch in 10 m Entfernung bei Verwendung von starken Halogenlampen herrlich rot.

Für Fotografen: Damit kein Farbanteil verloren geht, müssen UW-Fotografen Halogen- oder Gashochdrucklampen mit tageslichtähnlichem weißem Licht oder Blitzgeräte verwenden.

2.3.3. Das Wasser absorbiert Licht

Der Abschwächungskoeffizient wurde abhängig von der Wellenlänge gemessen. Kurzwelliges Licht (nahe an UV liegendes Blau) wird vom Wasser am wenigsten absorbiert. Der blaue Himmel liefert so viel blaues Licht, dass **im klaren Meer** in der Tiefe alles blau aussieht. Langwelliges Licht (an Infrarot grenzendes **dunkles Rot**) verschwindet in verhältnismäßig geringer Tiefe, weil die Strahlungsenergie in Wärme umgewandelt wird.



'Fundamentals of Optics'
Jenkins & White.
ISBN
0-07-085346-0.

Der Abschwächungskoeffizient von „ROT“ reicht von etwa 0.25 für Hellrot bis 1.1 für Dunkelrot (logarithmischer Maßstab).

In einer Entfernung von 5 m bleiben von hellem Rot etwa 29 % übrig
Vom dunkelsten Rot ist in 5 m Entfernung nur mehr 0.4 % zu erkennen

Das **dunkle Rot** des venösen Blutes aus einer Verletzung sieht daher grün aus, weil nur mehr die Farben Grün, sowie Blau und Gelb übrig bleiben. Blau und Gelb mischen sich zu Grün (subtraktive Farbmischung [1]). **Helles Rot** ist hingegen auch noch in mittleren Tiefen als Rot gut erkennbar und somit als Signalfarbe geeignet. Der Schlauch des Reservereglers wird daher oft mit einem hellroten bis orangefarbenen Spiralband umwickelt.

2.4. Hören unter Wasser

Kommt ein Schallreiz **in der Luft** von oben oder von vorne, so ist die **Schallintensität an beiden Ohren gleich** (Amplitude). Es gibt auch **keinen zeitlichen Unterschied** (Phase) und trotzdem erkennt man, ob der Schall von oben oder von vorne kommt. Ein Teil der Schallübertragung zum Innenohr erfolgt nicht über den winzigen Gehörgang, sondern durch die große Kopfoberfläche, so dass ein **räumliches Richtungsempfinden** entstehen kann. Die Ausformung der Ohrmuschel trägt in der Luft zum Richtungshören bei. Die Dämpfung des Schalls ist **im Wasser** viel geringer als in der Luft und die Geschwindigkeit ist wesentlich größer. Der Dichteunterschied zwischen Kopf und Wasser ist so gering, dass der Schall (wie bei Ultraschallmessungen) ungehindert und fast gleichzeitig durch die Kopfoberfläche und die Innenohren läuft. Alles wird lauter empfunden und das Richtungsempfinden wird gestört.

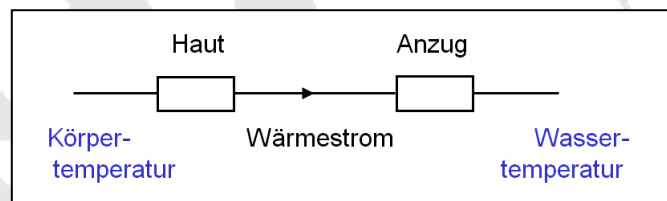
Die „Ortung“ einer Schallquelle oder eines Gegenstandes (**Ortung = Ortsbestimmung durch Richtung UND Entfernung**) ist unter Wasser grundsätzlich nur mit geeigneten Messgeräten (Sonar) möglich.

Schallereignisse an der Oberfläche kann man unter Wasser nicht hören, weil die Schallwellen von der Wasseroberfläche (großer Dichteunterschied) reflektiert werden. Unter Wasser kann man sich nur schwer bemerkbar machen (Schlag auf die Tauchflasche). Der Partner muss **UM SICH** und vor allem **ÜBER SICH** schauen, weil er ja die Richtung, aus der der Schall kommt, nicht erkennen kann.

2.5. Wärmeübertragung / Abkühlung

Je höher die Temperatur eines „Körpers“ ist, desto größer sind die **Wärmeschwingungen** seiner Moleküle. Die Wärmeenergie wird weitergegeben, indem ein schwingendes Molekül ein anderes anstößt [1]. Dabei wird das Molekül abgebremst und kühlt sich ab. Die Bewegung der Wärmeenergie geht somit immer von der höheren zur niederen Temperatur. Die Wärme hat genau so wie das Licht auch die Eigenschaften einer Strahlung (Infrarot).

Der Wärmewiderstand:



Die Abkühlung wird umso geringer, je größer der **Wärmewiderstand** zwischen dem menschlichen Körper und dem Wasser ist. Wird die Luft im Trockentauchanzug beim Abstieg komprimiert, so vermindert sich der durchschnittliche Abstand der Gasteilchen voneinander und damit auch die isolierende Wirkung. Der größte Wärmewiderstand wird durch Trockentauchanzüge mit Argonfüllung erreicht.

Die Abkühlung des Körpers hat viele Ursachen:

Über Wasser:

- Strahlung (abgestrahlte Wärmeenergie)
- Verdunstung (Entzug der Verdunstungswärme)
- Luftströmung (Wind transportiert Wärme)

Unter Wasser:

- Wärmeleitung (wobei der Anzug den „Wärmewiderstand“ erhöht)
- Konvektion (Wärmeströmung) angewärmtes Wasser steigt auf und kaltes strömt nach Strömungen und Bewegung im Wasser erhöhen den Wärmeverlust

Die expandierende kalte Atemluft kühlt den Taucher erheblich ab. Je größer der Druck der Atemluft in der Tiefe, desto mehr Luft muss bei jedem Atemzug aufgewärmt und angefeuchtet werden, umso größer ist die Abkühlung des Tauchers. Der Wärmeverlust durch die Atmung macht an der Oberfläche bereits 10 % des gesamten Wärmeverlusts aus und steigt mit zunehmender Tiefe immer weiter an [17]. Kreislaufgeräte erzeugen keine Abkühlung, weil der Anteil des expandierenden Sauerstoffs vernachlässigbar ist und bereits angewärmte und angefeuchtete Luft geatmet wird. Im Verhältnis zu seiner Oberfläche gibt der gut durchblutete Kopf am meisten Wärme an die Umgebung ab (Kopfhaut).



Wasser und Luft sind schlechte Wärmeleiter [1]. Sobald der menschliche Körper den umgebenden „Wasserfilm“ im Nasstauchanzug aufgewärmt hat, vermindert sich die Wärmeableitung, weil die **Temperaturdifferenz zwischen Haut und Wasserfilm** kleiner geworden ist.

Nasstauchanzüge unterbinden weitgehend die Konvektion

Trockentauchanzüge isolieren durch das im Unterzieher eingeschlossene Gas

2.6. Die physikalischen Einheiten m, kg und Sekunde [1]

Das **Gewicht** wird von der Erdanziehung erzeugt. Das Gewicht ist eine zum Erdmittelpunkt gerichtete Kraft. Je größer die Entfernung vom Erdmittelpunkt, desto geringer wird die Kraft und damit das Gewicht eines Körpers. Man verwendet daher in der Physik anstatt des Gewichtes den „ortsunabhängigen“ Begriff der **Masse mit der Einheit kg**.

Um eine **Masse** von 1 kg in der **Zeit** von 1 s auf eine **Geschwindigkeit** von 1 m/s **beschleunigen** zu können braucht man die **Kraft** von 1 N (Newton).

$$\text{Kraft} = \text{Masse} \times \text{Beschleunigung} \quad [1] \quad 1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \times 1 \text{ m/s}^2$$

Die Erdanziehungskraft ist in „mittlerer“ geografischer Breite auf Meeresebene 9,81-mal so groß und beschleunigt die Masse (im freien Fall, wenn die Luft nicht bremst) in 1 sec auf eine Geschwindigkeit von 9,81 m/sec [1]. Eine Masse von 1 kg hat daher auf Meeresebene ein Gewicht (= Gewichtskraft) von 9,81 N. Die „Kraft“ 1 N wird somit von der Masse $1 \text{ kg} / 9,81 = 0,102 \text{ kg}$ erzeugt.

Verteilt man 1 kg **Masse** gleichmäßig auf einer waagrechten **Fläche** von 1 m^2 , so entsteht ein **Druck** von $9,81 \text{ N/m}^2 = 9,81 \text{ Pa}$ (Pascal).

$$\text{Druck} = \text{Kraft} / \text{Flächeneinheit} \quad [1] \quad 1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Taucher verwenden das leichter verständliche „bar“ als Einheit des Druckes.

$$1 \text{ bar wird von } 1,02 \text{ kg/cm}^2 \text{ erzeugt} \quad (1 \text{ bar} = 100\,000 \text{ Pa})$$

Eine 10 m hohe „Wassersäule“ **im Meer** (1000 gedachte Wasserwürfel mit einer Grundfläche von 1 cm^2) hat eine Masse von ca 1,02 kg. $1,02 \text{ kg} / 1 \text{ cm}^2 = 1,02 \text{ kg/cm}^2$. Im Meer beträgt daher die Druckzunahme in 10 m Tiefe sehr genau **1 bar = 10 msw** (meter sea water = amerikanische Druckeinheit für Taucher). Im Süßwasser ist die Druckzunahme ca 2 % weniger, weil die Dichte geringer ist.

Der für die Dekompression wichtige **Umgebungsdruck**, der auf den Taucher einwirkt, setzt sich zusammen aus dem auf der Meeresoberfläche lastenden **Luftdruck** und dem tiefenabhängigen **Wasserdruck**. In 20 m Tiefe beträgt der Umgebungsdruck beispielsweise:

$$p_a = \text{Luftdruck} + \text{Wasserdruck} = \text{Luftdruck} + \frac{\text{Tiefe in Metern}}{10 \text{ m/bar}} = 1 \text{ bar} + \frac{20}{10} \text{ bar} = 3 \text{ bar}$$

2.7. Eigenschaften der Luft

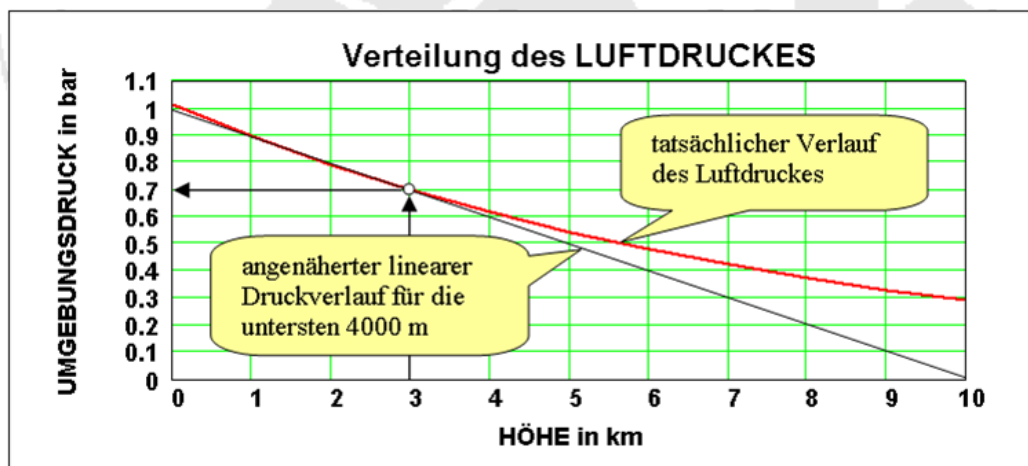
Der Anteil des Wasserdampfs in der atmosphärischen Luft ist extrem temperaturabhängig, schwankt sehr stark und erzeugt die Wettererscheinungen. Je höher die Temperatur, desto mehr Wasserdampf kann die Luft aufnehmen. Hauptbestandteile der **trockenen Luft** sind Sauerstoff (21 %) und „inerte Gase“ (79 %) wie Stickstoff und Argon die bei der Atmung keine chemischen Bindungen eingehen. Der „mittlere“ CO₂ Anteil ist seit der Industrialisierung um $\frac{1}{3}$ von 0,03 auf 0,04 % gestiegen.

In der Lunge des Tauchers befindet sich nicht nur Luft, sondern auch bei 37 °C „gesättigter“ **Wasserdampf** mit einem konstanten Druck von 0,063 bar [2] [3], entsprechend einem Anteil von 6,3 % an der Atemluft.

An der Wasseroberfläche werden daher die Anteile von Sauerstoff und Stickstoff in der Lunge des Tauchers immerhin um 6 % vermindert.

Luft lässt sich leicht zusammendrücken und füllt beliebig geformte Behälter gleichmäßig aus (aber auch Maske, Mittelohr, Stirnhöhlen und sogar den Magen, wenn jemand Luft geschluckt hat). Druckunterschiede in Körperhöhlen verursachen so lange Schmerzen, bis der Druck wieder ausgeglichen ist.

Alle Luftteilchen liegen übereinander und umgeben die Erde bis in eine Höhe von über 100 km mit einem kugelförmigen Mantel abnehmender Dichte. Die Teilchen erzeugen auf Meeresniveau den **Normaldruck** $p_0 = 1,013 \text{ bar}$. Der Luftdruck und die Lufttemperatur nehmen nach oben hin immer weiter ab. In den untersten 4000 m wird der Luftdruck pro **1000 m** Höhenzunahme um etwa **10 %** vermindert. Die Druckänderung erfolgt gleichmäßig (annähernd linear).



In 3000 m Höhe beträgt daher der Luftdruck ziemlich genau $1 \text{ bar} - 30 \% = 0,7 \text{ bar}$

$$\text{Gerechnet: } p_{\text{berg}} \approx p_0 \cdot e^{\frac{-H}{8000}} \approx 1,013 \text{ bar} \cdot e^{\frac{-3000}{8000}} = 0,696 \text{ bar} \approx 0,7 \text{ bar}$$

Anmerkung für Bergseetaucher:

Der Umgebungsdruck von 1 bar, für welchen Dekotabellen berechnet werden, herrscht somit nicht mehr an der Wasseroberfläche, sondern **3 m unter Wasser**.

3. Gasgesetze

Die relativ hohe Temperatur der Luft (300 Kelvin) bewirkt, dass sich die Gasteilchen kräftig bewegen und „gegenseitig abstoßen“, so dass sie sich in der Tauchflasche gleichmäßig verteilen und auf die „Innenfläche“ überall die gleiche Kraft ausüben (Druck). Wenn eine Tauchflasche gefüllt wird, wird sie durch die **zugeführte Kompressionsarbeit** erwärmt (auch eine Fahrradpumpe wird durch die Pumparbeit warm). Die „innere Energie“ des Gases wird erhöht, weil der mittlere räumliche Abstand der Gasteilchen zueinander gegen die abstoßenden Kräfte vermindert wird. **Druck, Volumen und Temperatur** werden verändert.

Wird die Flasche abgekühlt, geht ein Teil der zugeführten Energie wieder verloren. Die verminderte Bewegungsenergie der Gasteilchen bewirkt, dass der Druck sinkt. Dreht man nun das Ventil auf, strömt das Gas aus und vergrößert wieder sein Volumen. Dieser Vorgang erfordert **Ausdehnungsarbeit gegen die umgebende Luft** [1], welche nur aus der inneren Energie des Gases kommen kann. Dem Gas wird Energie entzogen. Es kühlt sich ab, wie bei einem Kompressorkühlschrank (Joule-Thomson Effekt). Das Flaschenventil vereist.

Ein Beispiel für das Zusammenwirken der Gasgesetze finden wir bei einem nicht gewarteten Lungenautomat. Der Druck im Regler sinkt, das Luftvolumen wird größer. **Die Ausdehnungsarbeit verbraucht die Bewegungsenergie der Gasteilchen**. Die Temperatur sinkt und der verschmutzte Automat vereist.



3.1. Das Gasgesetz für das ideale Gas [1]

Das Gesetz heißt im deutschen Sprachraum „**thermische Zustandsgleichung**“. Es ist ein zusammengesetztes Gasgesetz und beschreibt das Zusammenwirken der „Zustände“ von Druck, Volumen und Temperatur **für eine bestimmte (gleich bleibende) Gasmenge**.

Das Gesetz gilt für ein gedachtes „ideales Gas“ in dem keine zwischenmolekularen Kräfte wirken und daher **keine Erwärmung durch die Kompressionsarbeit** erfolgen kann. Wenn Druck und Temperatur weit genug vom Verflüssigungspunkt eines Gases entfernt sind (niederer Druck, hohe Temperatur), kann es als „ideal“ angesehen werden.

$$\frac{p_1 \times V_1}{T_1} = \frac{p_2 \times V_2}{T_2} = \text{konstant} \quad [1]$$

p_1 , V_1 und T_1 sind Druck, Volumen und Temperatur VOR einer Zustandsänderung.
 p_2 , V_2 und T_2 sind Druck, Volumen und Temperatur NACH der Zustandsänderung.

Will man das Zusammenwirken von zwei Größen untersuchen, so muss die dritte Größe konstant gehalten werden, damit sich ihr Einfluss aufhebt. Wenn beispielsweise T_1 und T_2 durch die Zustandsänderung nicht verändert wurden (konstant bleiben), beeinflussen sie das Rechenergebnis nicht. Man kann sie streichen oder einfach weglassen und bezeichnet das als „Kürzen“. Es ergeben sich wieder die ursprünglichen Gasgesetze.

3.2. Gesetz von Boyle-Mariotte (engl.: Boyle's Law) [17]

Für den Taucher ist in erster Linie der Zusammenhang zwischen Druck und Volumen einer bestimmten Gasmenge wichtig, wenn die **Temperatur konstant** bleibt (isotherm).

$T_1 = T_2 = \text{konstant}$ sie heben sich gegenseitig auf

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 \quad \dots T_1 = T_2 = k \quad [1]$$

- **Beispiel 1:** Beim Füllen einer Tauchflasche werden 2000 l (auf 1 bar entspannte) Luft in eine 10 Liter Flasche gepresst:

Druck vor der Zustandsänderung $p_1 = 1 \text{ bar}$
Volumen vor der Zustandsänderung $V_1 = 2000 \text{ l}$
Volumen nach der Zustandsänderung $V_2 = 10 \text{ l}$

Die sog. Luftmenge wird durch die Änderung von Druck oder Volumen **nicht verändert**.

$$p_1 \times V_1 = p_2 \times V_2 = \text{konstant}$$

Vor der Zustandsänderung $1 \text{ bar} \times 2000 \text{ l}$

Nach der Zustandsänderung $200 \text{ bar} \times 10 \text{ l}$

Die Flasche wird durch den Füllvorgang warm. Sobald sie abgekühlt ist wird ein Druck von

$$p_2 = \frac{V_1}{V_2} \times p_1 = \frac{2000 \text{ l}}{10 \text{ l}} \times 1 \text{ bar} = 200 \text{ bar} \text{ gemessen.}$$

- **Beispiel 2:** Beim Aufstieg aus 10 m Tiefe zur Meeresoberfläche (auf halben Druck) dehnt sich die Luftmenge in der Lunge (konstante Temperatur) auf das doppelte Volumen aus und muss „ausgeatmet“ werden, weil sonst ein Lungenriss droht:

Vor der Änderung in 10 m Tiefe ist $p_1 = 2 \text{ bar}$
und $V_1 = 6 \text{ l}$
Nach der Änderung an der Oberfläche ist $p_2 = 1 \text{ bar}$

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} \times V_1 = \frac{2 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} \times 6 \text{ l} = 12 \text{ l}$$

Je geringer der Druck, desto größer wird das Volumen der betrachteten Gasmenge

Während des Aufstiegs darf die Luft nicht angehalten werden, weil sie sich ausdehnt. Der Aufstieg zur Wasseroberfläche muss langsam erfolgen, damit der Druckausgleich auch in den feinsten Verästelungen der Lunge erfolgen kann. Kleinste Schleimpfropfen können die eingeschlossene Luft festhalten und den Druckausgleich erschweren („**Airtrapping**“). Wenn der Druckausgleich in der Lunge „erzwungen“ wird, bahnt sich die eingeschlossene Luft einen Weg durch die Alveolen (AGE = Arterielle Gasembolie).

Anmerkung: Aus diesem Grund erscheinen ein **Sicherheitsstopp von 3-6 min in 3-6 m Tiefe** in der Nullzeit **ODER Dekostopps von 3-6 min in 3-6 m Tiefe** **UND** die Verminderung der Aufstiegsgeschwindigkeit in Oberflächennähe besonders wichtig.

- **Beispiel 3:** In 30 m Tiefe ist der Luftverbrauch viermal so groß wie an der Oberfläche

Der Druck in 30 m Tiefe beträgt $p_1 = 4 \text{ bar}$
und der Verbrauch von Druckluft beträgt pro Minute $V_1 = 20 \text{ l}$
Nach der Änderung an der Meeresoberfläche ist $p_2 = 1 \text{ bar}$

Der Verbrauch von „entspannter“ Luft beträgt pro Minute:

$$V_2 = \frac{p_1}{p_2} \times V_1 = \frac{4 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} \times 20 \text{ l} = 80 \text{ l}$$

Je größer der Umgebungsdruck, desto größer ist der Luftverbrauch

3.3. Gesetz von Amontons (erste Form des Charles'/Gay-Lussac's Law) [17]

Es beschreibt den Zusammenhang von Druck und absoluter Temperatur bei **konstantem Volumen** (isochor). Man erhält die absolute Temperatur in Kelvin, wenn man – wie bereits erwähnt – zur gemessenen Temperatur 273 °C hinzuzählt.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad \dots V_1 = V_2 = k \quad [1]$$

- **Beispiel:** Wenn die Tauchflasche in der Sonne liegt, erzeugt die Erhöhung der „absoluten“ Temperatur um 10 % auch eine Erhöhung des Druckes um 10 %.

Vor der Änderung $p_1 = 200 \text{ bar}$,
 $T_1 = 27 \text{ °C}$, ($273 \text{ K} + 27 \text{ K} = 300 \text{ K}$)
Nach der Änderung: $T_2 = 57 \text{ °C}$, ($273 \text{ K} + 57 \text{ K} = 330 \text{ K}$) ... + 10 %
$$p_2 = p_1 \times \frac{T_2}{T_1} = 200 \text{ bar} \times \frac{330 \text{ K}}{300 \text{ K}} = 220 \text{ bar}$$

Je höher die (absolute) Temperatur, desto größer wird der Druck.
Wenn die absolute Temperatur um 10 % steigt, steigt auch der Druck um 10 %.

Wenn die Pressluftflasche ins kalte Wasser des Bergsees getaucht wird, sinkt der Druck. Keine Angst – die in der Flasche eingeschlossene Luftmenge kann durch die Druckänderung nicht vermindert werden. **Das Gasgesetz gilt ja ausdrücklich nur für eine gleichbleibende Gasmenge** [1] (vergleiche Abschnitt 3.1).

Anmerkung: Manche Taucher berechnen beispielsweise 2347 Liter „Luftvorrat“ und vergessen dabei, dass die Luft in der Tauchflasche 10 °C hat und in der Lunge auf 37 °C aufgewärmt wird. Auch wenn sie noch so viele Stellen vom Taschenrechner ablesen, machen sie einen Fehler von 10 % der durch die Seehöhe noch vergrößert wird.

3.4. Gesetz von Gay-Lussac (zweite Form des Charles'/Gay-Lussac's Law) [17]

Bleibt der **Druck konstant** (isobar), so vergrößert sich bei Erwärmung das **Volumen** einer Gasmenge und vermindert dadurch die **Dichte**. Das Gesetz ist eher für Ballonfahrer interessant, weil das überschüssige Gas entweicht und der Ballon leichter wird. Das Gasgesetz hat aber auch geringe Auswirkungen auf Taucher:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \dots p_1 = p_2 = k \quad [1]$$

- **Beispiel:**

Wenn der Luftdruck konstant ist, erzeugt eine Temperaturerhöhung von 0 auf 20°C eine Vergrößerung des Volumens (der betrachteten Gasmenge) und somit eine Verminderung der Luftdichte ($\rho = \text{Rho}$) von $\rho_1 = 1,293 \text{ kg/m}^3$ auf $\rho_2 = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

$$T_1 = 0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$$

$$T_2 = 20^\circ\text{C} = 273 \text{ K} + 20 \text{ K}$$

$$\rho_1 = 1,293 \text{ kg/m}^3 \text{ (bei } 0^\circ\text{C und } 1,013 \text{ bar Normaldruck)}$$

Je größer das Volumen der erwärmten Gasmenge wird, desto geringer wird die Dichte.

$$T_1 / T_2 = \rho_2 / \rho_1 \text{ und}$$

$$\rho_2 = \frac{T_1}{T_2} \times \rho_1 = \frac{273 \text{ K}}{273 \text{ K} + 20 \text{ K}} \times 1,293 \text{ kg/m}^3 \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$$

- Die Luft in einer 10 Liter Flasche mit 200 bar wiegt **bei 20° C:**
 $2 \text{ m}^3 \times 1,2 \text{ kg/m}^3 \approx 2,4 \text{ kg}$.
- Die Luft in einer 10 Liter Flasche mit 200 bar wiegt **bei 0° C:**
 $2 \text{ m}^3 \times 1,293 \text{ kg/m}^3 \approx 2,6 \text{ kg}$.

Genau genommen müssten Taucher die Temperatur angeben, wenn sie von einer „Luftmenge“ sprechen. **Für den Taucher ist die Luftmenge ausschlaggebend, die er bei 37 °C Lungentemperatur mit einem Atemzug (oder pro Minute) ein- oder ausatmet.**

Anmerkung: Die Gasgesetze für ideale Gase werden von deutschsprachigen Tauchern oft verwirrend bezeichnet, weil sie **englischsprachige Quellen** [17] **bevorzugen**. Beim englischen „Charles'/Gay-Lussac's Law“ lassen sie gerne den „Charles“ weg und dafür nehmen sie zu „Boyle's Law“ den „Mariotte“ dazu. Das Gesetz von Amontons wird daher von Tauchern oft als Gesetz von Gay-Lussac bezeichnet.

3.5. Gesetz von Van der Waals

Reale Gase lassen sich nicht beliebig zusammenpressen, weil sich die Masse der Gasteilchen bemerkbar macht. Erhöht man den Druck in einer Flasche von 150 auf 300 bar, so steigt die Luftmenge nur auf 90 % des nach Boyle-Mariotte berechneten Wertes. Es muss mit einer kürzeren Grundzeit gerechnet werden.

3.6. Gesetz von Dalton [1]

Der Gesamtdruck eines Gemisches aus Gasen und Dämpfen besteht aus der Summe der einzelnen Teildrücke (Partialdrücke) aller Gase und Dämpfe.

79 % der **trockenen Luft** besteht aus Inertgas, 21 % aus Sauerstoff. Die Partialdrücke der einzelnen Gase verhalten sich wie ihr prozentueller Anteil. Bei einem Luftdruck von 1 bar beträgt der Inertgasdruck daher 0,79 bar entsprechend seinem Anteil von 79 %, der Sauerstoffdruck 0,21 bar. Wird der Druck verdoppelt, so verdoppeln sich auch die Teildrücke.

In der Lunge des Tauchers befindet sich jedoch auch **gesättigter Wasserdampf mit einem konstanten Druck von 0,063 bar** [2] [3]. Wird beim Tauchen der Umgebungsdruck erhöht, so erhöhen sich die Drücke von Sauerstoff und Inertgas, während der **Wasserdampf kondensiert** und sein Druck daher nicht steigen kann. Je größer der Gesamtdruck, desto geringer wird der Anteil des Wasserdampfs (wie auch bei einem Atemluftkompressor).

Will man den Inertgas- oder Sauerstoffdruck der Atemluft berechnen, so muss man zuerst den Wasserdampfdruck vom Gesamtdruck abziehen. Der Rest wird 79 % zu 21 % aufgeteilt.

Drücke in der Lunge des Tauchers:

Tiefe = 10 m, der Druck der Atemluft beträgt somit etwa 2 bar	
Inertgasdruck	$(2 \text{ bar} - 0,06 \text{ bar}) \times 0,79 = 1,53 \text{ bar}$
Sauerstoffdruck	$(2 \text{ bar} - 0,06 \text{ bar}) \times 0,21 = 0,41 \text{ bar}$
Wasserdampfdruck	(konstant) = 0,06 bar
Gesamtdruck =	$\text{Inertgasdruck} + \text{Sauerstoffdruck} + \text{Wasserdampfdruck} = 2 \text{ bar}$

Während der Druck des gesättigten Wasserdampfes an der Oberfläche noch 6 % ausmacht, halbiert sich sein Anteil beim doppelten Umgebungsdruck in 10 m Tiefe auf 3 %. In 4000 m Seehöhe beträgt der Luftdruck nur 0.61 bar und der Wasserdampfdruck somit 10 %.

Der gesättigte Wasserdampf vermindert den Inertgasanteil in der Lunge des Tauchers und beeinflusst dadurch die Dekompression.

Jedes Gas hat ab einem gewissen Partialdruck Auswirkungen auf den Taucher. **Stickstoff** und **Argon** sind Inertgase. In 40 m Tiefe ist ihr Partialdruck $5 \text{ bar} \times 0,79 \approx 4 \text{ bar}$. Die beiden Gase wirken bei diesem Druck narkotisch und erzeugen den Tiefenrausch.

In 66 m Tiefe beginnt der **Sauerstoff** für das Zentralnervensystem giftig zu werden, wenn er lange genug einwirkt: $7,6 \text{ bar} \times 0,21 = 1,6 \text{ bar}$. Dieser Druck gilt als Sicherheitsgrenze für das Tauchen mit Sauerstoff und mit sauerstoffangereicherter Luft (Nitrox). „66 m“ ist keine Einladung zum Tauchen in großer Tiefe. Es soll erinnert werden, dass Tauchunfälle in großer Tiefe auch durch den Sauerstoffdruck verursacht werden können! **Der Sauerstoffkrampf tritt ohne Vorwarnung ein und kann durch Ertrinken enden** [9]. Bei Dekompression mit Sauerstoff tritt der kritische Druck in 6 m Tiefe auf. **DAN** empfiehlt beim Tauchen die Druckgrenze von 1,5 bar zu respektieren. **CMAS hat sich auf 1,4 bar festgelegt**, während die Messungen von NOAA 1,6 bar ergeben haben und bei der US Navy „aus Sicherheitsgründen“ mit Sauerstoff in 9 und 6 m, also mit 1,9 und 1,6 bar Sauerstoff dekomprimiert wird.

3.7. Gesetz von Henry

„Die bei konstanter Temperatur in einer gesättigten Flüssigkeit gelöste Gasmenge ist proportional zum Druck an der Trennfläche zwischen Gas und Flüssigkeit“. Der Umgebungsdruck bewirkt, dass Gasmoleküle in die Flüssigkeit gepresst werden und dort durch ihre Wärmeschwingungen weiter wandern (diffundieren) [1]. Mit steigender Temperatur nimmt die Bewegung der Moleküle zu. Wenn ihre Geschwindigkeit hoch genug ist, befreien sie sich wieder aus der Lösung, so dass sich mit der Zeit der Zustand der Sättigung einstellt. Sättigung heißt der **Gleichgewichtszustand**, wenn pro Zeiteinheit gleich viele Gasteilchen in die Flüssigkeit diffundieren, wie aus ihr wieder austreten. Wird der Gasdruck verändert, so bewirkt die Diffusion, dass sich der „Lösungsdruck“ in der Flüssigkeit wieder an den Druck des angrenzenden Gases angleicht. **Es erfolgt ein Druckausgleich zwischen Gas und Flüssigkeit.**

Bühlmann erwähnte das Gesetz von Henry nicht, weil die Dekompression weder vom Sättigungszustand noch von der gelösten Gasmenge abhängt, sondern vom Druckunterschied zwischen Gewebe und Atemluft [16].

- **Wie sich die Gasdiffusion auswirkt**

Beim Abstieg und während des Aufenthalts am Grund werden die wasser- und besonders die fetthaltigen Gewebe des menschlichen Körpers mit gelöster Luft aufgeladen (aufgesättigt). Der Gasdruck in einem Gewebe beginnt zu steigen. Bei langen Tauchgängen kann er mit der Zeit den jeweiligen Umgebungsdruck erreichen (Druckausgleich = Sättigung = Anpassung).

Beim Aufstieg sinkt der Umgebungsdruck schneller als der Druck in den Geweben. Weil der Umgebungsdruck abnimmt, übersteigt der Gewebedruck ab einer bestimmten Tiefe den Umgebungsdruck. Dieser Umstand wird oft als „Übersättigung“ bezeichnet.

Die in Blut und Geweben vorhandenen mikroskopisch kleinen Gasbläschen (Mikrobläschen) beginnen zu wachsen. Je größer ihr Volumen, desto größer wird ihre Oberfläche und damit ihre Gasdurchlässigkeit, sodass der Gasaustausch schneller stattfinden kann und die Bläschen bilden sich wieder zurück. Erfolgt der Aufstieg zu rasch, so ist die Volumszunahme der Bläschen größer als ihr Abbau. Die Gasblasen werden immer größer, lagern sich aneinander und können Symptome der Dekompressionskrankheit erzeugen [11].

Tauchtabellen und Computer schreiben dem Taucher vor, wie er seinen Tauchgang beenden muss, damit er das während des Tauchgangs gelöste Gas „abatmen“ kann, ohne sich zu gefährden. Bleibt der Taucher innerhalb der „Nullzeit“, so kann er im Notfall jederzeit zur Oberfläche aufsteigen, wenn er die „zulässige Aufstiegsgeschwindigkeit“ nicht überschreitet. Taucht er länger, so muss er in den „Dekostufen“ warten, bis alle seine Körpergewebe so viel Gas abgegeben haben, dass sie den Luftdruck an der Oberfläche tolerieren. Darüber hinaus sollte er seinen Aufstieg durch „Sicherheitsstopps“ unterbrechen, um den Mikrobläschen Gelegenheit zu geben, wieder auf ihre ursprüngliche Größe zu „schrumpfen“ [4].

Die Gasdiffusion wird durch Dekotiefen und Dekozeiten berücksichtigt. Die Entwicklung von Mikrobläschen kann durch Sicherheitsstopps und die Halbierung der Aufstiegsgeschwindigkeit nahe der Oberfläche wesentlich vermindert werden.



3.8. Alle Gasgesetze wirken gleichzeitig

Man kann annehmen, dass sich das **Lungenvolumen** des „statistischen Normaltauchers“ nicht verändert. Die **Temperatur** der Lunge ist **konstant 37 °C**. Ein- und ausgeatmete Luft haben praktisch denselben Druck. Ein Teil des Sauerstoffs wird in CO₂ umgewandelt. Die ausgeatmete Luft enthält an der Meeresoberfläche etwa 6 % gesättigten Wasserdampf und etwa 4 % CO₂. Ein Taucher kann bei einem „theoretischen“ Atemzyklus nicht mehr Gasteilchen ausatmen als er eingeatmet hat, weil für ihn das Gesetz von Avogadro gilt [1]: **„Bei gleichem Druck und gleicher Temperatur enthalten gleiche Volumina aller idealen Gase die gleiche Anzahl Moleküle“**.

Man kann somit davon ausgehen, dass die eingeatmete Gasmenge pro Atemzug (Anzahl von Luftteilchen) konstant ist, weil sich weder die Lungentemperatur noch das Lungenvolumen noch der Druck ändern. Die Gasmenge in einer Tauchflasche besteht ebenfalls aus einer Anzahl von Gasteilchen. So lange das Ventil nicht geöffnet wird, kann sie sich nicht verändern, auch wenn sich der Druck (Bewegungsenergie der Gasteilchen) durch Abkühlung oder Erwärmung der Flasche verändert.

Der durchschnittliche Taucher kann aufgrund seines Atemzugvolumens aus einer 10 Liter Flasche mit 200 bar Druck und 5°C Temperatur nur eine bestimmte Anzahl von Atemzügen machen. Wenn die Flasche auf 25°C erwärmt wird, steigt ihre absolute Temperatur um 20 Kelvin oder 7 % (vgl. Abschnitt 3.4). Dadurch steigt wohl ihr Druck um 7 %, aber nicht die Anzahl von Gasteilchen. Die Anzahl der möglichen Atemzüge bleibt daher gleich, obwohl der Flaschendruck um 7 % gestiegen ist.

Auch wenn der Druck bei Abkühlung der Flasche im kalten Bergsee um 10 bar sinkt, verändert sich die eingeschlossene Luftmenge nicht. Ein Taucher muss nicht Angst haben, dass er weniger Luft in der Flasche hat. In der Lunge des Tauchers wird die Luft wieder auf 37 °C **angewärmt und befeuchtet**. Pro Atemzug verbraucht der „durchschnittliche Taucher“ (bei gleicher Anstrengung und gleichem Druck) immer die „gleiche Anzahl“ Gasteilchen.

Taucher beziehen ihren Luftverbrauch gerne auf Meeresniveau. In 1000 m Höhe sinkt der Druck um 0,1 bar und damit sinkt der Verbrauch um 10 %. In 1 m Tiefe steigen Druck und Verbrauch um 10 %. **Der Temperaturunterschied zwischen Lunge und Atemgas wird von Tauchern allgemein vernachlässigt**, obwohl ein Temperaturunterschied von 30°C den Druck oder das Volumen einer Gasmenge um 10 % verändert (vgl. Abschnitte 3.3 und 3.4).

Für die Praxis genügt es, wenn man anstatt der Anzahl von Luftteilchen mit der sog. „Luftmenge“ (Druck × Volumen) rechnet. In einer vollen 10 Liter Flasche befindet sich somit die „Luftmenge“: $200 \text{ bar} \times 10 \text{ Liter} = 2000 \text{ bar Liter}$. **Die Berechnung ist ungenau, aber so lange die Druckmessung immer bei gleicher Temperatur erfolgt, können die Planungsergebnisse verglichen werden**. Die Tauchgangsplanung wird noch ungenauer, wenn ein Taucher glaubt, seine Flasche vor der Druckmessung abkühlen zu müssen. Er entfernt sich immer weiter von 37 °C und damit von den vergleichbaren Werten.

Wenn eine Tauchflasche in der brennenden Sonne des Sinai liegt, steigt ihre Temperatur vielleicht von 30 auf 60°C und man kann sie nicht mehr angreifen. Die absolute Temperatur steigt dabei um 10 % und der Druck steigt auf 220 bar. Die Flasche wurde jedoch mit 300 bar geprüft und für 400 bar Berstdruck berechnet. Ein Taucher kann darauf vertrauen, dass bei 10 % Überdruck im Material der Tauchflasche noch keine Gefügeveränderungen auftreten können und dass somit von der Erwärmung keine Gefahr für den Taucher ausgeht. Die Gesetze von Amontons, Gay-Lussac und all die mühsamen Berechnungen haben daher für Taucher keinen praktischen Nutzen. **Kritisch dürfte eher der Einfluss prallen Sonnenlichts auf die schwarzen Gummischläuche von Lungenautomaten sein**.

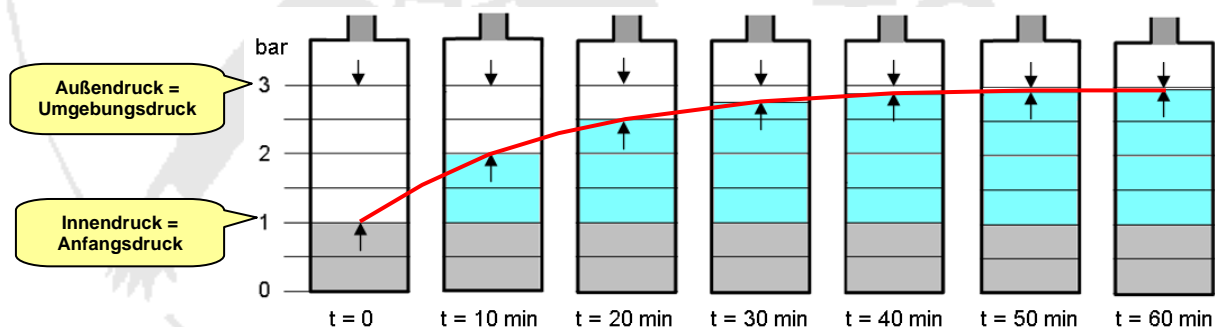
4. Gewebe/Kompartimente

Das Blut bildet das Transportmittel für die gelösten Atemgase von der Lunge in die Körpergewebe und zurück. Je nach Durchblutung können menschliche Gewebe schneller oder langsamer mit Gas aufgeladen werden und dieses auch wieder abgeben. Da die individuellen Unterschiede groß sind, rechnet und experimentiert man mit **Modellgeweben = Kompartimenten**, denen man wiederum menschliche Gewebe zuordnet. Jedes Kompartiment wird als eigenes System ohne gegenseitige Beeinflussung betrachtet. Auch das Blut selbst gilt oft als eigenes System.

Wird die Gesamtzahl der Kompartimente einer Druckänderung ausgesetzt und dauert die Druckänderung lange genug, so werden alle Kompartimente unterschiedlich schnell auf denselben neuen Druck auf- oder entladen. Im Zustand der Sättigung sind die Gewebe angepasst. Angepasst heißt, dass sich die „Sättigungskonzentration“ eingestellt hat. Jeder Bestandteil der Atemluft hat eine andere Löslichkeit. Es werden daher zur Berechnung statt der Gaskonzentration Partialdrücke angenommen. Der Partialdruck der Gase in der Atemluft ist gleich groß wie ihr Lösungsdruck im Gewebe.

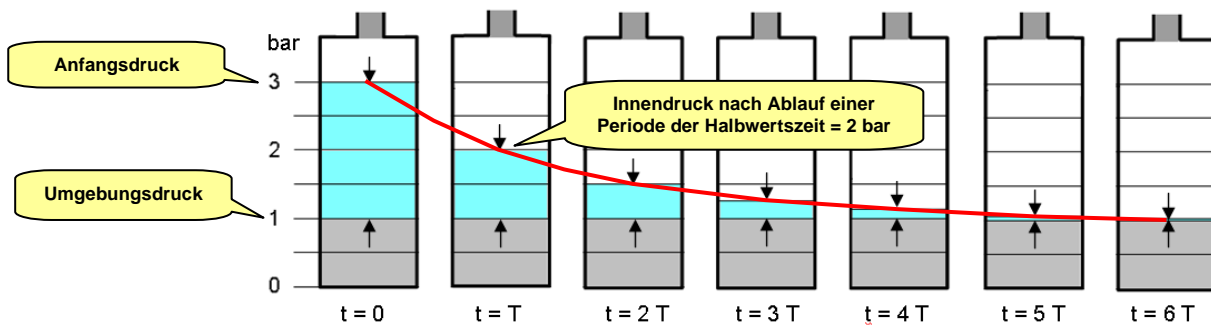
4.1. Aufladung und Entladung von Kompartimenten

Eine starrwandige Flasche wird mit einem porösen Stöpsel verschlossen. Zum Zeitpunkt $t = 0$ herrscht innen und außen 1 bar Luftdruck. Nun wird der umgebende Luftdruck auf 3 bar erhöht. Der untere Pfeil zeigt den Druck in der Flasche. Der obere Pfeil zeigt **3 bar Außendruck**. Das heißt, dass der Druck in der Flasche ohne Stöpsel sofort bis auf 3 bar ansteigen würde. Zwischen den Pfeilen sieht man den jeweiligen Druckunterschied.



Der poröse Stöpsel bewirkt, dass zwar Luft in die Flasche eindringt, dass aber der Druck in der Flasche nur langsam ansteigt. Die treibende Kraft für den Druckanstieg ist der **Druckunterschied** und dieser Unterschied **wird in 10 min jeweils halbiert**, sodass der Druck in der Flasche immer langsamer ansteigt. Nach Ablauf von $t = 10$ min wird der Druckunterschied zum ersten Mal halbiert. Nach Ablauf von $t = 60$ min ist er 6-mal halbiert worden und so klein, dass er vernachlässigt werden kann. Der Druck im Inneren der Flasche hat sich an den umgebenden Druck angepasst.

Die Zeit, in welcher der Druckunterschied auf den halben Wert zurückgeht, wird Halbwertszeit genannt. Die Flasche mit dem porösen Stöpsel hat die Eigenschaften eines sog. **Kompartiments** mit der **Halbwertszeit für Luft** von **T = 10 min**. Eine Periode der Halbwertszeit dauert 10 min.



Dieselbe Gesetzmäßigkeit zeigt sich auch, wenn der Luftdruck wieder auf 1 bar vermindert wird. Statt der „Grundzeit“ wird diesmal die **Periodenzahl** angegeben, weil sie für **alle** Kompartimente (unterschiedliche Halbwertszeiten) gilt.

Jetzt zeigen die unteren Pfeile, dass der **Außendruck** (= Umgebungsdruck) **wieder auf 1 bar zurückgegangen** ist. Der oberste Pfeil zeigt den **Innendruck am Anfang des neuen Anpassungsvorgangs**. Man sieht wieder, dass die Druckdifferenz in jeder Periode der Halbwertszeit (T) halbiert wird. Nach 6 Perioden ($t = 6 T$) ist die Anpassung des Kompartiments an den ursprünglichen Umgebungsdruck erfolgt.

Menschliche Gewebe: Die verschiedenen Gewebe des Tauchers sind mit gelöster Luft aufgeladen. Die Luftteilchen diffundieren durch die Lunge ins Blut und werden in die einzelnen Gewebe und wieder zurück transportiert. Es gibt stark durchblutete Gewebe, wie die Nieren oder das Rückenmark und es gibt schwach durchblutete, wie Sehnen oder Knochen. Dazwischen liegen „mittlere“ Gewebe, wie Haut und Muskulatur. Je stärker die Durchblutung, desto schneller steigt oder fällt der Druck der gelösten Luft in einem Gewebe, umso kürzer ist die Halbwertszeit. Gewebe mit ähnlicher Halbwertszeit werden zu einem Kompartiment zusammengefasst und je nach Halbwertszeit als „schnell“ oder „langsam“ bezeichnet. Das ZH-L8 Modell für Tauchcomputer rechnet beispielsweise mit 8 Kompartimenten mit Halbwertszeiten von 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320 und 640 Minuten. Kompartimente sind somit „statistische Gewebe“, mit welchen berechnet wird, wie sich der **Druck der gelösten Luft** im menschlichen Körper verändert und verteilt.

Der **Gewebedruck** (Innendruck eines Kompartiments) gleicht sich mit der Zeit an den jeweiligen **Druck der Atemluft** (Außendruck) an. Wenn ein Gewebe innerhalb eines Zeitraums gleich viele Luftteilchen abgibt wie es aufnimmt, hat sich der „Gleichgewichtszustand der Sättigung“ eingestellt. **Sobald der Druck der gelösten Luft in allen Geweben gleich groß ist wie der Druck der Atemluft ist der Taucher akklimatisiert**. Wenn sich der Druck der Atemluft ändert, weil der Taucher unter Wasser ab- oder aufsteigt (aber auch wenn er zu einem Bergsee aufsteigt), beginnt ein neuer Anpassungsprozess. Er dauert für jedes Gewebe 6 Perioden der Halbwertszeit. Das schnellste Gewebe braucht dazu $6 \times 5 \text{ min} = 30 \text{ min}$, das langsamste braucht $6 \times 640 \text{ min} = 64 \text{ Stunden}$.

Der Anpassungsvorgang: Zwischen Gewebe und Atemluft findet ein zeitverzögerter **Druckausgleich** statt. **Jedes Gewebe hat einen bestimmten Anfangsdruck, der sich einem größeren oder kleineren Umgebungsdruck nähert**. Nach 6 Perioden der Halbwertszeit ist der Druckausgleich erfolgt und das Gewebe hat annähernd den neuen Umgebungsdruck angenommen. Die größte Druckänderung erfolgt innerhalb der ersten Periode der Halbwertszeit. Der Anpassungsvorgang wird anhand eines „Modellgewebes“ dargestellt und mit der **Anpassungsgleichung von Haldane** berechnet. Für jedes Kompartiment wurden sog. „Bühlmannkoeffizienten“ veröffentlicht mit welchen man berechnet, welchen Druck die einzelnen Gewebe ohne Blasenbildung tolerieren.

4.1.1. Beispiel für „Entsättigung“ und Halbwertszeit



Wir messen den Druck einer vollen Tauchflasche und drehen das zweite Ventil ein bestimmtes Maß auf. Wir beobachten, dass der Druck innerhalb von 2 min von 200 bar auf 100 bar fällt. Nach weiteren 2 min fällt er von 100 auf 50 bar, nach weiteren 2 min auf 25 bar usw. Die Druckabnahme wird immer langsamer. Nach 12 min entweicht immer noch ein bisschen Luft.

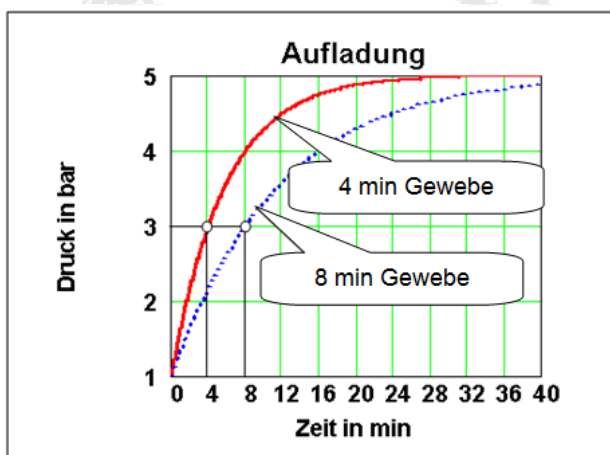
Unsere Tauchflasche hat bei dieser Ventilstellung die Eigenschaft eines Kompartiments mit der Halbwertszeit für Luft von $T = 2$ min.

In der ersten Periode der Halbwertszeit (2 min) sinkt der Druck auf die Hälfte, in der zweiten auf die Hälfte des verbliebenen Wertes. **Nach 6 Perioden der Halbwertszeit ist der Druckunterschied 6-mal halbiert worden.** Der Luftdruck wurde annähernd erreicht. Nach 6 Perioden ist die Anpassung an den Umgebungsdruck zu 98 % erfolgt und der Druck der Tauchflasche hat sich an den Luftdruck „angepasst“.

Umgekehrt könnte man sich in der Flasche ein Vakuum vorstellen. Sobald das Ventil geöffnet wird, strömt die Luft mit der gleichen Gesetzmäßigkeit in die Flasche. In 2 min steigt der Druck in der Flasche auf den halben Umgebungsdruck (Luftdruck). **Die Druckdifferenz wird innerhalb von 2 min jeweils halbiert.** Der Innendruck gleicht sich so lange an den Außendruck an bis der Druckausgleich erfolgt ist.

4.1.2. Beispiel für die „Aufsättigung“

Das 4 min Kompartiment ($T = 4$ min) wird von der Meeresoberfläche in 40 m Tiefe gebracht:



Der **Anfangsdruck der Gewebe** an der Oberfläche beträgt 1 bar.

Der neue **Umgebungsdruck** in 40 m Tiefe beträgt 5 bar.

Die **Druckdifferenz** beträgt daher 4 bar.

Auch hier gilt, dass die Druckdifferenz innerhalb einer Periode der Halbwertszeit halbiert wird. Nach $6T = 6 \times 4 \text{ min} = 24 \text{ min}$ sind 98 % des neuen Gasdrucks erreicht. Das „halb so schnelle“ 8 min Kompartiment benötigt dazu, wie die zweite Linie zeigt, die doppelte Zeit.



Es gilt die **gleiche Gesetzmäßigkeit** wie bei der sog. „Entsättigung“. Einmal ist die Differenz zwischen dem neuen Umgebungsdruck und dem Gewebedruck positiv, einmal negativ. Einmal steigt der Gewebedruck an, einmal geht er zurück.

Der Gewebedruck passt sich laufend an den Umgebungsdruck an.
Zwischen Atemgas und Gewebe erfolgt ein zeitlich verzögerter Druckausgleich.

Im Diagramm sind nur 2 Gewebe mit kurzen Halbwertszeiten dargestellt. Der menschliche Körper besteht jedoch auch aus wesentlich „langsameren“ Geweben und nur die Gesamtheit aller Gewebe ermöglicht die Beurteilung, wie weit die Anpassung während eines Tauchganges fortgeschritten ist. Der Anpassungszustand der Gewebe ist für nachfolgende Tauchgänge wichtig. **Bühlmantabellen** geben daher als **Wiederholungsgruppe** einen **Gewebekode** an. Das schnellste 4 min Gewebe der Bühlmantabelle beginnt mit dem Code „A“, das nächst langsamere 8 min Gewebe hat den Code „B“ usw.

Die „Wiederholungsgruppe“ der Bühlmantabelle bezeichnet das langsamste Gewebe, welches am Ende des Tauchgangs dekomprimiert werden muss.

Wiederholungsgruppe F heißt somit, dass das 38,3 min Gewebe in der letzten Dekostufe dekomprimiert werden muss.



A C H T U N G:

Andere Tabellen haben abweichende Wiederholungssysteme. Wiederholungsgruppen lassen sich daher NICHT vergleichen.

4.2. Gewebekoeffizienten von Bühlmann

Bühlmann untersuchte synthetische und natürliche Gewebe mit unterschiedlichen Halbwertszeiten und bestimmte die Gewebekoeffizienten a und b, mit denen er die Druckabhängigkeit berechnen konnte (Tabellenwerk 1986):

Code	Halbwertszeit T [min]	a [bar]	b	a [bar]	b
		ZH-L12 (1986)		ZH-L16 B	
A	4.00	1.900	0.800	1.2599	0.5050
	5.00			1.1696	0.5578
B	8.00	1.450	0.800	1.0000	0.6514
C	12.5	1.030	0.800	0.8618	0.7222
D	18.5	0.882	0.826	0.7562	0.7852
E	27.0	0.717	0.845	0.6667	0.8126
F	38.3	0.575	0.860	0.5600	0.8434
G	54.3	0.468	0.870	0.4947	0.8693
H	77.0	0.441	0.903	0.4500	0.8910
I	109	0.415	0.908	0.4187	0.9092
J	146	0.416	0.939	0.3798	0.9222
K	187	0.369	0.946	0.3497	0.9319
L	239	0.369	0.946	0.3223	0.9403
M	305	0.255	0.962	0.2850	0.9477
N	390	0.255	0.962	0.2737	0.9544
O	498	0.255	0.962	0.2523	0.9602
P	635	0.255	0.962	0.2327	0.9653

Die experimentell ermittelten Koeffizienten (linke Tabelle ZH-L12) bilden die Grundlage der „Bühlmann tabellen 1986“. Für 16 Gewebe wurden nur 12 Koeffizientenpaare verwendet. Die Gewebe K & L haben beispielsweise gleiche Koeffizienten und auch die letzten 4 Koeffizientenpaare sind gleich. Daher ergeben sich bei der Berechnung der Nullzeiten auffallende „Stufen“ anstatt eines natürlichen Verlaufs.

Für Computer und für Seehöhen über 2500 m wurde nun aus dem ZH-L12-Modell das ZH-L16-Modell [16] entwickelt (rechte Tabelle), bei dem sich keine „Stufen“ mehr ergeben, weil die Koeffizienten mit Näherungsgleichungen berechnet werden. Bei der praktischen Erprobung stellte sich heraus, dass bei mittleren Geweben Dekompressionsprobleme auftraten und die Koeffizienten mussten korrigiert werden. Heute gibt es für Tabellen (ZH-L16B) und Computer (ZH-L16C) eigene korrigierte Koeffizientensätze [16], welche weltweit anerkannt werden [4] und sogar als „Referenz“ gelten.

Die auf ZH-L16 beruhenden Tabellen haben durch Abänderung der Koeffizienten zum Teil veränderte Dekozeiten. Das schnellste 4 min Gewebe ist weniger konservativ und darf relativ weit aufsteigen. „Technische Taucher“ haben es durch das konservativere 5 min Gewebe ersetzt, um diesen Nachteil zu beseitigen.

UWATEC verwendet heute für Computer 5 – 10 – 20 – 40 – 80 – 160 – 320 und 640 min Gewebe [5], während SUUNTO 2.5 – 5 – 10 – 20 – 40 – 80 – 120 – 240 und 480 min nimmt.

5. Gastheorien

5.1. Theorie der gelösten Gase (Gasdiffusion)

Der britische Physiologe **Sir John Scott Haldane** (sprich Haldän) schuf die Grundlagen aller heutigen Tauchtabellen und Tauchcomputer, indem er die Löslichkeit des Stickstoffs in unterschiedlichen menschlichen Geweben untersuchte und berechnete. Er fand heraus, dass die verschiedenen menschlichen Gewebe je nach Durchblutung den Stickstoff unterschiedlich schnell lösen und wieder abgeben können. Er stellte auch fest, dass ein Gewebe gefahrlos „auf halben Druck“ gebracht werden konnte, eine Annahme, welche sich später für den Bergsee als ungeeignet erwies.

Für die Berechnungen wählte er 5 Modellgewebe (Kompartimente) mit Halbwertszeiten von 5 – 75 min [3].

Es gab die ersten Tauchtabellen.

- **Die von Haldane und allen seinen Nachfolgern verwendete Anpassungsgleichung lässt sich auch einfacher anschreiben:**

Gewebedruck = Anfangsdruck + Druckdifferenz × Anpassungsfaktor

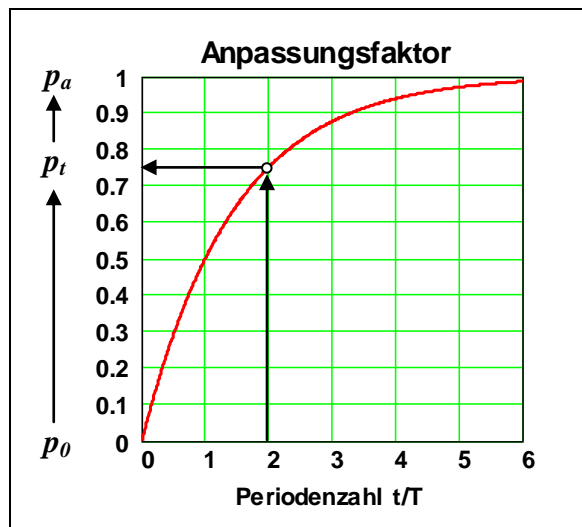
$$p_t = p_0 + (p_a - p_0) \times F$$

In dieser Gleichung bedeutet:

p_t	Gewebedruck am Ende der Grundzeit „t“
p_0	Anfangsdruck (meistens der Luftdruck an der Oberfläche)
p_a	Umgebungsdruck (Druck der Atemluft in der Tauchtiefe)
$p_a - p_0 = \Delta p$	Die Druckdifferenz (Delta p) entspricht der Tauchtiefe: $\Delta p = \frac{\text{Tiefe in Metern}}{10 \text{ m / bar}}$
F	Zeitabhängiger Anpassungsfaktor

Es muss ENTWEDER mit barometrischen ODER mit Inertgasdrücken gerechnet werden.

Der Anpassungsfaktor gibt die Gesetzmäßigkeit an, dass der Unterschied zwischen Umgebungsdruck und Anfangsdruck eines Gewebes innerhalb einer Periode der Halbwertszeit halbiert wird.



Die Kennlinie zeigt den Verlauf des Anpassungsfaktors „F“:

Der Anpassungsfaktor steigt ausgehend von „0“ nach 6 Perioden annähernd auf „1“ an. Er beschreibt damit ausgehend vom **Anfangsdruck** p_0 den Anpassungsvorgang des **Gewebedrucks** p_t an den **Druck der Atemluft** p_a

Beispiel: nach 2 Perioden beträgt der Anpassungsfaktor $F = 0,75$

Wenn der Druckunterschied $p_a - p_0 = 1$ bar ausmacht, so steigt der Gewebedruck p_t in 2 Perioden der Halbwertszeit um 0,75 bar (siehe Abschnitt 4.1.).

Anwendung:

Wie weit steigt der Druck des 4 min Gewebes bei einem „Rechtecktauchgang“ 40 m, 8 min? (Um den Rechengang übersichtlicher zu gestalten wurde der Wasserdampf vernachlässigt)

Grundzeit	$t = 8$ min
Halbwertszeit des Gewebes	$T = 4$ min
Periodenzahl	$t / T = 8 \text{ min} / 4 \text{ min} = 2$
Anpassungsfaktor aus dem Diagramm:	$F = 0,75$
Anfangsdruck auf Meeresniveau:	$p_0 = 1$ bar
Umgebungsdruck in 40 m	$p_a = 5$ bar

$$p_t = p_0 + (p_a - p_0) \times F = 1 \text{ bar} + (5 \text{ bar} - 1 \text{ bar}) \times 0,75 = 4 \text{ bar}$$

In 40 m Tiefe steigt der Gewebedruck in 8 min von 1 auf 4 bar. Es wurde mit „absoluten“ Drücken gerechnet. Der Inertgasdruck beträgt davon 79 %: $4 \text{ bar} \times 0,79 = 3,16 \text{ bar}$

Capt. Robert D. Workman beschrieb den linearen Zusammenhang zwischen maximal zulässigem Gewebedruck und Tauchtiefe und führte den Begriff **M-value** = Maximalwert ein. Der M-value ist der **höchstzulässige Inertgasdruck**, den ein Gewebe symptomlos (ohne Blasenbildung) erträgt. Er ermittelte damit die **„Tolerierte Tiefe“ gemessen von der Meeresoberfläche aus**. Amerikanische Taucher messen **Tiefe und Druck** in „Fuß oder Meter Seewasser“ (1 bar = 10 msw = 33 fsw). Viele britische Taucher messen bereits in „bar und Meter“. Die „Tolerierte Tiefe“ ist jene Tiefe, bis zu welcher ein „Gewebe“ ohne Blasenbildung aufsteigen darf, wenn es mit Inertgas aufgeladen war. Workman’s Arbeiten bilden die Grundlage der von 1956 bis 2008 gültigen US-Navy-Standard-Tabellen [17].

Prof. Albert A. Bühlmann ging an der Universität Zürich einen Schritt weiter [16]. Er untersuchte ebenfalls die Druckabhängigkeit von „Gewebe“ und fasste die Ergebnisse von Experimenten und realen Tauchgängen in der folgenden **Gewebe Gleichung** zusammen. Er bezog sich dabei nicht auf die Meeresoberfläche, sondern auf den jeweiligen Luftdruck. Statt der „Tolerierten Tiefe“ berechnete er den **„Tolerierten Umgebungsdruck“** und wurde damit **unabhängig von der Seehöhe**.



$$p_{tol} = (p_I - a) \times b$$

In dieser Gewebegleichung bedeutet:

p_{tol}	„Tolerierter Umgebungsdruck“ bis zu welchem ein Gewebe aufsteigen darf. Erst wenn dieser Druck unterschritten wird, weil der Taucher zu weit aufsteigt oder der Luftdruck am Bergsee zu gering ist, muss mit Symptomen der DCI gerechnet werden.
p_I	Inertgasdruck des untersuchten Gewebes
a, b	die beiden Gewebekoeffizienten beschreiben die Druckabhängigkeit des untersuchten Gewebes.

Bühlmann beschrieb jedes seiner 16 Gewebe durch ein Koeffizientenpaar a & b (Abschnitt 4.2.) und berechnete damit, auf welchen atmosphärischen (absoluten) Umgebungsdruck ein Gewebe aufsteigen darf, wenn es mit Inertgas aufgeladen worden war. Im Unterschied zu Workman konnte er (durch die Einbeziehung des jeweiligen Luftdruckes) **M-values für beliebige Bergseehöhen** und nicht nur für Meeresniveau berechnen.

Anwendung:

Welchen **absoluten Umgebungsdruck** p_{tol} „toleriert“ das „12,5 min Gewebe“, wenn es während eines Tauchgangs auf einen **Inertgasdruck** von $p_I = 2,6 \text{ bar}$ aufgeladen wurde?

Gerundete ZH-L16 B Gewebekoeffizienten: $a = 0,862 \text{ bar}$, $b = 0,722$

$$p_{tol} = (p_I - a) \times b = (2,6 \text{ bar} - 0,862 \text{ bar}) \times 0,722 \approx 1,25 \text{ bar}$$

Dieser Druck herrscht **im Meer in 2,5 m Tiefe**. Wenn das 12,5 min Gewebe auf einen Inertgasdruck von 2,6 bar aufgeladen war, darf es nach dem ZH-L16 B-Modell von Bühlmann im Meer bis zu einer Tiefe von 2,5 m aufsteigen (Ceiling), ohne dass Symptome zu erwarten sind. Praktisch wird das Gewebe in 3 m Tiefe dekomprimiert, bis es den Luftdruck von 1 bar toleriert.

In 1000 m Höhe finden wir den Druck von 1,25 bar 1 m tiefer in 3,5 m Tiefe. Das 12,5 min Gewebe muss daher bereits in 6 m dekomprimiert werden, bevor es überhaupt auf 3 m aufsteigen darf!

- Wenn man die Gleichung umformt, erhält man den höchstzulässigen Inertgasdruck:

$$p_I = \frac{p_{tol}}{b} + a$$

In Anlehnung an den M-value von Robert D. Workman wird der maximale Inertgasdruck oft als „Bühlmann M-value“ oder einfach als „M-Point“ bezeichnet.

Außer den von Workman und Bühlmann entwickelten M-values gibt es noch weitere:

- DSAT RDP (1987) für PADI Nullzeittaucher
- DCAP MM11F6 (1988) für schwedische „Trimix Tec Diver“

Tauchcomputer von UWATEC, SUUNTO und MARES verwenden jedoch ZH-L16.



5.2. Theorie und Modell der Mikrobläschen

DAN hat nachgewiesen, dass schnelle bis mittlere Gewebe mit Halbwertszeiten von 20-80 min etwa **30 min nach jedem „konventionellen“ Tauchgang** Mikrobläschen bilden, auch wenn die Dekompressionsvorschriften eingehalten werden.

Die Bläschen werden vom venösen Blut in die Lunge geschwemmt, dort „ausgefiltert“ und lösen sich wieder auf. „Silent bubbles“ (stille Bläschen) erzeugen noch keinerlei Symptome.

Man stellt sich vor, dass durch die Verminderung des Umgebungsdruckes während des Aufstiegs Gas vom Gewebe ins Bläschen diffundiert, welches aus einem „**Blasenkern**“ an der **Gefäßwand** zu wachsen beginnt (wie man es auch in einem Glas Bier beobachten kann). Die Wachstumsgeschwindigkeit steigt mit der Druckdifferenz zwischen Gefäßwand und Blut. Die Bläschen lösen sich ab und werden vom Blut in die Lunge geschwemmt, festgehalten und aufgelöst.

Wenn sie trotzdem durch die Lunge in den arteriellen Kreislauf gelangen, bleiben sie schließlich wieder an einer Gefäßwand (Kapillare) hängen, Blutplättchen lagern sich an und eine Abwehrreaktion (Entzündung) wird hervorgerufen. Die entstehenden Schwellungen verschließen die Gefäße und es entstehen die Symptome der Dekokrankheit.

In der Dekokammer werden die Bläschen zusammengedrückt. Das Gas diffundiert zurück ins Gewebe und die Größe der Bläschen verringert sich wieder. Sauerstoff unter erhöhtem Druck und Flüssigkeitszufuhr beschleunigen das Verschwinden der Blasen und damit der DCS-Symptome.

Es wird vermutet, dass sich die Gasblasen mit Gerinnungsprodukten des Blutes umkleiden, welche während der Dekompression wieder abgebaut werden müssen, so dass die Gewebe das Gas anfänglich langsamer abgeben als sie es aufgenommen haben. Der Blasenabbau in der Lunge wird jedenfalls verlangsamt, wenn viele Blasen eingeschwemmt werden [5] [16].

DAN stellte fest, dass es Taucher gibt, welche bei identischen Tauchgängen fast keine Blasen erzeugen und andere, welche große Blasenmengen entwickeln und daher ein wesentlich größeres „Blasenrisiko“ haben [4].

A. Marroni (Präsident von **DAN**) entdeckte mit seiner Arbeitsgruppe, dass durch zusätzliche „tiefe Sicherheitsstopps“ während des Aufstiegs die Bläschen auch bei „Risikotauchern“ vermieden werden können [4].

*

Bühlmann hat sich mit seinem Gewebemodell ZH-L16 in zivilen Tabellen und Tauchcomputern weltweit durchgesetzt. Die Dekostufen wurden frei gewählt. Am Beginn einer Dekopause kann der höchstzulässige Inertgasdruck eines Gewebes (M-value) erreicht werden. Auch wenn der Taucher die Vorschriften der Tabelle einhält, werden durch den langen, gleichförmigen Aufstieg auf relativ geringe Dekotiefen Mikrobläschen gebildet, die mit einem Doppeldetektor (siehe Titelseite des Skriptums) gemessen werden können. Die Bläschen sind so klein, dass sie symptomlos ertragen werden und daher als „silent bubbles“ bezeichnet werden.



Größere Tiefen sind nur mit „neuen“ Gasmischungen erreichbar und daher begann man nach einem universal anwendbaren Rechenmodell für die Dekompression mit unterschiedlichen Atemgasen zu suchen. Es wurde **nicht nur die Diffusion des gelösten Gases** in den verschiedenen Geweben untersucht, sondern auch das **Verhalten des Gases in den Mikrobläschen**, also in der freien Gasphase [15]. Aus dem Verhalten der Blasen wurde abgeleitet, dass **Dekostopps von Bläschenmodellen wesentlich tiefer sein müssen** als von konventionellen Gewebemodellen. Im Extremfall können die Unterschiede einige „bar“ ausmachen [11].

Brian Hills (Australien) entwickelte aufgrund von Experimenten zur Erforschung der Blasenentwicklung ein thermodynamisches Modell. Um Bläschen zu vermeiden, schrieb er neue Tabellen mit sehr langsamen Aufstiegs geschwindigkeiten und wesentlich tieferen Dekostopps vor. Trotz der theoretischen Begründung und der experimentellen Bestätigung seiner Arbeit und trotz praktischer Erfahrung wurde Hills belächelt. Seine Tabellen waren damals zu unkonventionell.

Die Einführung der Dopplermessungen bestätigte schließlich Hill's Vermutung, dass die langen gleichförmigen Aufstiege der USN-Tabelle auf geringe Dekotiefen die Blasenbildung begünstigten. Das Varying Permeability Model (VPM) wurde entwickelt, um das Verhalten der Bläschen während des Aufstiegs zu beschreiben. **Inzwischen hat sich allgemein die Überzeugung durchgesetzt, dass die Entstehung von Mikrobläschen durch geeignetes Aufstiegsverhalten vermieden werden soll und kann.**

Der tiefe erste Stopp stellt sicher, dass das Gas in Lösung bleibt und durch die Blutzirkulation fort getragen werden kann, anstatt in die Bläschen der schnellsten Gewebe zu diffundieren.

Bruce Wienke (USA) erweiterte das Modell nach einer sehr langen Vorlaufzeit für Wiederholungstauchgänge zum Reduced Gradient Bubble Model (RGBM), welches heute bereits in vielen Tauchcomputern implementiert ist [15].

*

Bei der herkömmlichen Dekompression steigt ein Taucher **auf möglichst geringe Tiefe** bis zur Grenze der Blasenbildung auf, um möglichst schnell aus dem Wasser zu kommen. Dabei wird die Bildung von „silent bubbles“ in Kauf genommen. Die Dekompression nach Blasenmodellen versucht hingegen **in möglichst großer Tiefe** das Gas in den Geweben in Lösung zu halten, damit keine Blasen entstehen. Sobald Blasen entstehen, müssen sie ja auch wieder abgebaut werden.

Die Bläschen sitzen in Geweben. Es gibt mehr kleine als große Bläschen. Sie sind von einer dünnen elastischen Haut umgeben, welche den Gasaustausch behindert.

Bläschen können wachsen oder schwinden, je nachdem ob der Druck im umgebenden Gewebe größer oder kleiner ist als der Druck im Bläschen. Ist der Gewebedruck größer, so wandert Gas durch das Häutchen ins Bläschen und es beginnt zu wachsen. Ist er kleiner, so wandert das Gas zurück und das Bläschen schwindet. Die Gewebedrücke werden bei Bläschenmodellen gleich wie bei Bühlmann/Workman/Haldane mit der Anpassungsgleichung berechnet.



Wenn der Druck im Bläschen gleich groß ist, wie der hydrostatische (mechanische) Umgebungsdruck, herrscht Druckgleichgewicht und die Größe des Bläschens kann sich „stabilisieren“. Es schrumpft aufgrund seiner Oberflächenspannung auf seine ursprüngliche Größe.

Beim Abstieg werden die Bläschen zusammengedrückt und ihre Oberfläche wird verringert. Somit wird der Querschnitt, durch den der Gasaustausch stattfinden kann, eingengt und der Gasdurchfluss durch das umgebende Häutchen eingeschränkt. Der Druck im Bläschen ist beim Abstieg größer als im Gewebe, das Gas wandert daher vom Bläschen ins Gewebe.

Beim Aufstieg sinkt der Umgebungsdruck, so dass der Druck im Bläschen kleiner wird als der Gewebedruck. Gas wandert daher vom Gewebe ins Bläschen und es beginnt zu wachsen. Die Oberfläche der Blase wird vergrößert. Somit kann mehr Gas durch das abgrenzende Häutchen hindurch wandern. Wenn der Aufstieg zu schnell ist, ist der Gasaustausch zu langsam um das Gas mit dem Blut abzutransportieren und das Bläschen wächst immer schneller.

Die Anfangsgröße einer Blase ist somit entscheidend, ob sie sich nach einem Aufstieg immer weiter vergrößert oder wieder verkleinert wird.

Wenn das Bläschen zu groß ist reicht die Gasdiffusion nicht mehr aus. Das Bläschen wächst weiter, löst sich ab und wird in die Lunge geschwemmt. **Deshalb sind Blasenmodelle bestrebt, die Bläschen in tiefen Stopps klein zu halten** [11] [15].

*

Während der Abbau gelöster Gase (Gasdiffusion) am schnellsten in möglichst geringer Tiefe unter Bildung von „silent bubbles“ erfolgt, werden Mikrobubbles (freie Gasphase) in möglichst großer Tiefe „aufgelöst“. **Der bisher verwendete 3 m Sicherheitsstopp ist dazu nicht geeignet.** Die wirksamste und daher schnellste Dekompression ergibt sich mit reinem Sauerstoff in der **größtmöglichen Tiefe von 6 m** (oxygen window) [11].

Während man in der Anfangszeit der Computer einem Taucher empfahl, am Grenzwert des Gewebeüberdrucks entlang aufzusteigen (Ceiling), tendieren „Technische Taucher“ zu möglichst tiefen Dekostufen (Floor). **DAN** empfiehlt den **tiefen Sicherheitsstopp, damit keine Grenzwerte mehr erreicht werden können** [6] [12].

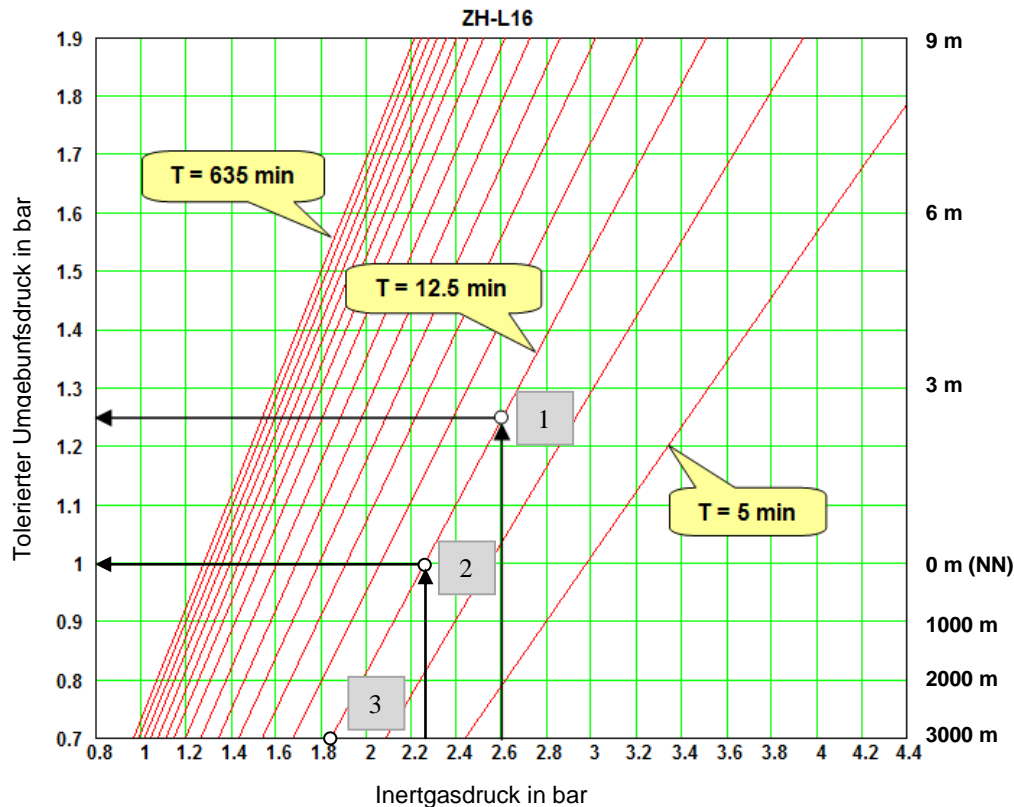
Die Tabellen des BSAC kennen nur eine 9 und eine 6 m Dekompressionsstufe. Der Aufstieg von 6 m zur Wasseroberfläche dauert 1 min. Diese Strategie tendiert zu „tiefen Stopps“ und zu einem tieferen Nullzeitstopp in 6 m. Der „blasenaktive Umweg“ über den „flachen“ 3 m **oder gar den 2 m Stopp von Bühlmann Bergsetabellen** wurde nicht mitgemacht.

Die Dekompression muss auch bei Verwendung von Computern mit einem tiefen Stopp eingeleitet werden und die Stufendekompression muss in größerer Tiefe beginnen, als der Computer anzeigt (Ceiling). So kann erfolgreich verhindert werden, dass der „M-Point“ eines Gewebes erreicht wird.

Der Nullzeitstopp wird in doppelte Tiefe (5 oder 6 m) verlegt und der anschließende Aufstieg zur Wasseroberfläche wird (ähnlich BSAC & UWATEC) langsamer. Alle diese Erkenntnisse von **DAN** wurden in der „Empfehlung für Dekompression & Aufstieg“ der Arbeitsgruppe des TSVÖ (Rhombert, Zauchner, Mai 2001) zusammengefasst [10].

5.3. Der tolerierte Umgebungsdruck von Bühlmann

Bühlmann verwendete für das ZH-L16-System 16 Kompartimente mit Halbwertszeiten von 4 bis 635 min. Das Diagramm zeigt, wie weit ein Taucher – genau genommen ein bestimmtes Gewebe – aufsteigen darf, wenn es während des Tauchgangs mit Inertgas aufgeladen wurde.



- 1 Wenn das 12,5 min Gewebe während des Tauchgangs einen Inertgasdruck von 2,6 bar erreicht hat, darf es bis 2,5 m Tiefe aufsteigen, weil es den Umgebungsdruck von 1,25 bar in 2,5 m Tiefe (Ceiling) toleriert.
- 2 Wenn es nur auf 2,27 bar aufgeladen war, toleriert es 1 bar und kann an die Meeresoberfläche (Normalniveau NN) gebracht werden (Ende der Nullzeit).
- 3 Vor einem Aufstieg in 3000 m Seehöhe muss das 12,5 min Gewebe bis 1,83 bar dekomprimiert werden, damit das Inertgas in gelöstem Zustand bleibt und nicht in die freie Gasphase (Bläschen) übergeht.

Je geringer der Umgebungsdruck und je „langsamer“ ein Gewebe, desto weniger Inertgas kann es in Lösung halten. Wird der „Tolerierte Umgebungsdruck“ eines Gewebes unterschritten, weil der Taucher zu weit aufgestiegen ist oder weil der Luftdruck an der Wasseroberfläche zu gering ist (Bergsee), bleibt das Gas nicht mehr in Lösung und es beginnen sich Blasen zu bilden.

Um Blasenbildung zu vermeiden, muss die Dekompression bei ausreichend großem Umgebungsdruck begonnen werden. Je höher der Bergsee, desto geringer ist der Umgebungsdruck in der Dekostufe. Der für die sichere Dekompression erforderliche Umgebungsdruck findet sich in größerer Tiefe. **Das heißt, die Dekompression muss im Bergsee tiefer beginnen.**

Die weit verbreitete „Bergseeformel“ steht somit im krassen Gegensatz zu den Rechenmodellen von Workman und Bühlmann.

6. Austauschvorschriften

Die **Dekotabelle** ist eine Austauschvorschrift, welche die optimale Dekompression der einzelnen Gewebe gewährleisten soll.

Optimal heißt, dass eine ausreichende, jedoch nicht überlange Dekompression für den „durchschnittlichen“ Taucher ein „sehr geringes Unfallrisiko“ darstellt.

Dekotabellen geben Nullzeiten, Dekotiefen, Dekozeiten und eine Reihe von Angaben vor, die notwendig sind, wenn man mehrere Tauchgänge pro Tag machen will (Wiederholungstauchgänge). Meistens wird die Aufstiegs geschwindigkeit angegeben, oft ein Höhenbereich.

Um die Tabellen unter Wasser anwenden zu können, braucht man eine Uhr und einen Tiefenmesser. **Tauchtabellen sind unverzichtbar, wenn man einen Tauchgang planen will.** Es erscheint daher nützlich, das Arbeiten mit Tabellen zu lernen.

Tauchcomputer liefern ebenfalls Austauschvorschriften. Sie messen laufend Druck und Zeit. Sie berechnen daraus alle Dekoinformationen und zeigen sie an. Sie ersetzen während des Tauchgangs Tiefenmesser, Uhr und Tabelle. Sie haben üblichen Tabellen längst den Rang abgelaufen. Die Anwendung ist einfach und viele Taucher haben blindes Vertrauen.

Weder Tabellen noch Computer können einen absoluten Schutz vor Symptomen der Dekokrankheit garantieren, weil es dafür noch andere Ursachen gibt, wie z.B. Flüssigkeitsmangel, Kälte, Übergewicht, Medikamentenkonsum, körperliche Anstrengung, Fliegen oder Fahrten über höher gelegene Pässe nach dem Tauchen...

Patent Foramen Ovale (PFO) = „Offenes ovales Fenster“ ist eine Verbindung der beiden Hälften des Herzens, welche sich nach der Geburt nicht ganz geschlossen hat. 25 – 30 % der Taucher sind davon betroffen. Mikrobläschen können durch Anstrengungen wie Husten aus dem venösen in den arteriellen Kreislauf gelangen und dort Mikroembolien verursachen.

Es wird daher empfohlen, den Aufstieg „blasenarm“ zu gestalten, indem man mit dem tiefen Sicherheitsstopp beginnt, einen konventionellen 5 m Stopp anschließt und den Aufstieg in Oberflächennähe verlangsamt [6] [12].

Eine weitere Ursache für Symptome kann Bläschenbildung durch einen kurzen, tiefen Wiederholungstauchgang sein, wenn der Taucher beispielsweise noch einmal absteigt, um den Anker zu lösen. **Die Bläschen werden zusammengedrückt. Sie gelangen durch den Lungenfilter in den arteriellen Kreislauf und dehnen sich dort beim Aufstieg wieder aus.**

Zu den Austauschvorschriften gehören auch Pausen, welche sicherstellen, dass die Inertgasbelastung langsamer Gewebe durch Wiederholungstauchgänge nicht zu groß wird und wieder abgebaut werden kann.



7. Einflüsse welche die Dekozeit verändern

Druck des gesättigten Wasserdampfes: In Oberflächennähe ist sein Anteil an der Atemluft groß (6,3 %). Dadurch vermindert er den Inertgasanteil in der Atemluft und die Dekozeiten verändern sich. In 4000 m Höhe steigt sein Anteil bereits auf 10 %.

Linearitätsfehler des Tiefenmessers: Wenn der Tiefenmesser 3 % zu wenig zeigt, ist die wahre Tiefe 3 % größer als die angezeigte Tiefe. Die Nullzeit wird dadurch bei größeren Tiefen deutlich kürzer.

Der Nullpunktfehler des Tiefenmessers verschiebt die gesamte Skala: Wenn der Tiefenmesser 1 m zu wenig zeigt, ist die wahre Tiefe größer, wie vorhin beim Linearitätsfehler. Der Gesamtfehler steigt, die Nullzeit wird noch kürzer.

Wenn jedoch der Tiefenmesser im Nullbereich **1 m zu viel zeigt, dekomprimiert der Taucher anstatt in 3 m nur in 2 m Tiefe**. Dieser Fehler ist ein Teil der Bergseeeproblematik, weil es noch Tabellen und Computer gibt, die **2 m** Dekotiefen vorschreiben. Diese Tiefen sollte man möglichst auch bei Wellen einhalten können, weil sonst der tolerierte Umgebungsdruck unterschritten wird! Zur Vermeidung von Blasen sind größere Tiefen besser geeignet. **Bergseetabellen mit 2 m Stufen wurden in einem begrenzten Höhenbereich durch deutsche Tabellen mit 3 m Stufen ersetzt.**

Große Kälte kühlt die Haut ab und erhöht die Lösung von Inertgas. Sie vermindert in weiterer Folge die Durchblutung und behindert so den Abtransport des Gases. Das Gas wird in Haut und Muskulatur zurückgehalten und daher die Nullzeit verkürzt.

Hohe Arbeitsleistung verstärkt die Durchblutung und damit die Aufladung der Gewebe während der Kompressionsphase. Aus der Verminderung des Flaschendruckes pro Zeiteinheit (Druckverbrauch in bar/min) wird von einzelnen „luftintegrierten Tauchcomputern“ die Arbeitsleistung abgeschätzt und auch die verbleibende Grundzeit in der jeweiligen Tiefe berechnet. Neuere Computer messen die Herzfrequenz, weil sie aussagekräftiger ist.

Anfangshöhe = Höhe des Wohnortes. Bühlmann nahm an, dass alle Gewebe an den Druck in 700 m angepasst sind, wenn der Aufstieg zum Bergsee in 2500 m beginnt. Die CMAS/SAA Tabelle berechnet hingegen den Aufstieg aus Meeressniveau.

Bergseehöhe = Höhe des Tauchplatzes. Während des Aufstieges vom Wohnort im Tal zum Tauchplatz am Bergsee beginnen die schnellsten Gewebe sich an den verminderten Umgebungsdruck = Luftdruck anzupassen. Langsame Gewebe behalten ihren Druck.

Tauchtiefe = größte erreichte Tiefe bedeutet einen „Rechtecktauchgang“.

Wartezeit = Adaptationszeit: Bei Höhenänderungen wird oft vom Erreichen der Tauchplatzhöhe bis zum Beginn des Tauchabstieges eine Wartezeit von 12 oder 24 Stunden vorgeschrieben. Die schnellsten Gewebe haben sich schon während des Aufstieges teilweise an den verminderten Luftdruck angepasst. Die langsameren haben erst mit der Druckanpassung begonnen (das langsamste Gewebe braucht dazu 64 Stunden). Die Tabelle gilt erst dann, wenn sich die entscheidenden Gewebe an den verminderten Luftdruck angepasst haben.

Eine Wartezeit von 30 min zwischen dem Eintreffen am Tauchplatz und dem Beginn des Tauchabstieges bildet die Grundlage für die „Methode des Tiefenzuschlages“ [8].



Der Begriff Grundzeit wurde als „Dauer der Luftversorgung“ neu definiert, als Zeit vom Beginn des Abstieges bis zum Erreichen des tiefen Sicherheitsstopps wo der „standardisierte Aufstieg“ beginnt. Damit ist es nicht mehr notwendig, eine Mindestgeschwindigkeit während des Aufstiegs einzuhalten. Man muss nur mehr darauf achten, nicht zu schnell zu werden. Ein Taucher kann sich voll auf den Aufstieg konzentrieren und muss sich nicht merken, welches Dekoprofil er am Grund abgelesen hat.

Aufstiegsgeschwindigkeit: Aus größeren Tiefen wird oft schneller aufgestiegen, um die Aufsättigung der Gewebe während des Aufstieges nicht zu vergrößern. In geringen Tiefen soll eine möglichst geringe Aufstiegsgeschwindigkeit die Bildung von Mikrobläschen verhindern. Neuere Tauchcomputer (A.P.Valves, UWATEC) reagieren darauf mit tiefenabhängigen Aufstiegsgeschwindigkeiten von 20 bis 7 m pro Minute [5].

Der Aufstieg wird durch Sicherheitsstopps unterbrochen um den Druck in den schnellsten Geweben abzubauen. **DAN** empfiehlt eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 10 m/min. Der Aufstieg von der letzten Dekostufe oder vom 5 m Sicherheitsstopp zur Wasseroberfläche muss „bewusst langsam“ sein (Halbierung der Aufstiegsgeschwindigkeit auf 5 m/min).

Sicherheitsstopps:

- **Der erste Sicherheitsstopp** „für Sporttaucher“ dauert 3 min und ergibt sich nach einer Empfehlung von **DAN** in etwa 15 m oder in halber Tiefe, wenn die Tauchtiefe geringer als 30 m war. Es handelt sich dabei um den „tiefen Sicherheitsstopp“ zur Vermeidung von Mikrobläschen, welche von den schnellsten Geweben erzeugt werden. Der Taucher liest seine Instrumente ab und kann seine „Dekoreserve“ abschätzen.
- **Der zweite (traditionelle) Sicherheitsstopp** in 5 m dauert 3-5 min und verlangsamt die Annäherung an den Luftdruck nach Nullzeittauchgängen. Er bildet den „Umschaltpunkt“, ab welchem die Aufstiegsgeschwindigkeit halbiert wird.

Zuschläge zu Sicherheitsstopps sind individuelle Erfahrungswerte und dienen zur Vermeidung von Symptomen der Dekokrankheit nach großer Kälte oder körperlicher Anstrengung. Bei wiederholten Teilaufstiegen, wie etwa beim Setzen von Bojen müssen auch in der Nullzeit zwischen den Arbeitsphasen Sicherheitsstopps eingelegt werden.

Oberflächenpause: Die Zeit vom Ende eines Tauchganges bis zum Beginn des Folgetauchganges verringert den Inertgasdruck der Gewebe und damit den Gewebekode. Die Oberflächenpause soll lang genug dauern, damit die Mikrobläschen abklingen können (Richtwert 1 ½ - 2 Stunden).

Nitrox: Der erhöhte Sauerstoffgehalt vermindert den Inertgasanteil und damit die Aufsättigung der Gewebe mit Inertgas.

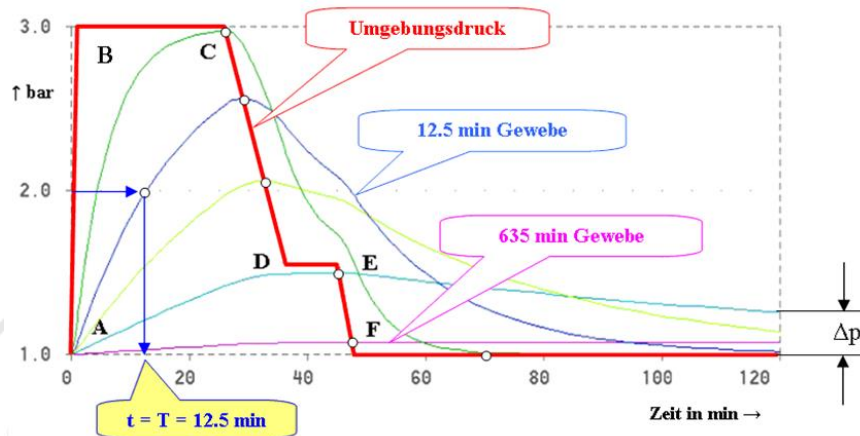
Sei nicht computergläubig!

Dein Computer weiß nichts von deinem PFO oder von deinem Übergewicht. Er kennt auch den Zustand deiner persönlichen Gewebe nicht. Er weiß nicht wie alt du bist, ob du Medikamente/Drogen nimmst oder rauchst und er kann nicht wissen ob du genügend Wasser getrunken hast um ein „durchschnittlicher Taucher“ zu werden.

Du musst lernen, es selber zu erkennen!

7.1. Druckänderungen während eines Tauchgangs

Beim Abstieg steigt der Druck. Anstatt die Tiefe (nach unten) zu zeichnen, wurde der Druck (nach oben) eingezeichnet. Man sieht den Druckverlauf in 5 von Bühlmanns 16 verschiedenen Kompartimenten während eines konventionellen Tauchgangs (ohne tiefen Sicherheitsstopp):



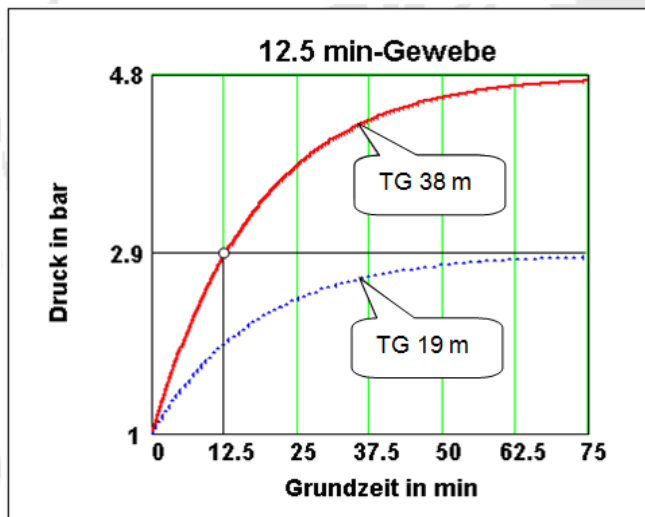
- Die breite Linie zeigt den **Umgebungsdruck** während eines 20 m Tauchgangs:
 A → B Der Abstieg erfolgt sehr schnell. Der Druck steigt von 1 auf 3 bar.
 A → C “Zeit am Grund” (alte Gerundzeit). Der Taucher bleibt in der größten Tiefe.
 C → D langsamer Aufstieg bis zum „flachen Sicherheitsstopp“
 D → E Aufenthalt in 5 m Tiefe
 E → F langsamer Aufstieg zur Oberfläche.
- Ganz oben sieht man das schnellste Kompartiment. Es hat sich an den Umgebungsdruck 3 bar angepasst. Sobald der Aufstieg beginnt, beginnt auch die Entladung (C). Nach 70 min ist der Gewebedruck wieder auf den Anfangswert zurückgegangen.
- Ganz unten sieht man das langsamste Kompartiment. Es wird noch während des Aufstiegs zur Oberfläche aufgeladen. Die Aufladung ist erst unmittelbar vor Erreichen der Oberfläche zu Ende (F). Das Kompartiment braucht 3 Tage um sich wieder auf den Anfangswert zu entladen. Nach Ablauf einer Periode der Halbwertszeit (10 Stunden) wird der an und für sich geringe Überdruck erst halbiert.
- Während des Aufstieges fängt ein Gewebe nach dem anderen an sich zu entladen. Sobald der Umgebungsdruck kleiner wird als einer der Gewebedrücke diffundiert gelöstes Gas aus dem Gewebe und der Gasdruck beginnt wieder zu sinken. Die meisten der 16 Gewebe werden während des Aufstiegs weiter geladen. **Bis zur halben Tiefe ist die Aufladung der Mehrzahl von Geweben relativ groß und beeinflusst die Dekompression.**
- Nach 120 min haben einzelne langsame Gewebe immer noch einen bemerkenswerten Überdruck “ Δp ” (Delta p). Je langsamer ein Gewebe, desto länger dauert es, bis es wieder seinen Anfangsdruck erreicht.

Die stärkste Aufsättigung erfolgt, wie das Bild zeigt, in der Zeit vom Verlassen der Oberfläche bis zum Eintreffen in halber Tiefe. Die weitere Aufsättigung der langsamsten Gewebe in „Dekotiefe“ ist vernachlässigbar.

Eine langsame Aufstiegs geschwindigkeit bewirkt die fortgesetzte Aufladung der Mehrzahl aller Gewebe. Um sie berücksichtigen zu können wird daher der Zeitraum von A – D als „neue Grundzeit“ eingesetzt.

In unserem Beispiel wurde nur das schnellste Gewebe in 20 m Tiefe angepasst (gesättigt). Es beginnt seine Entladung unmittelbar mit dem Beginn des Aufstieges. **Je langsamer ein Gewebe, desto geringer ist seine Aufladung** (Aufsättigung), **desto geringer ist die Tiefe, in der die Entladung** (Entsättigung) **beginnt**. Genau genommen passen sich die Gewebe während der Oberflächenpause an den Luftdruck an, solange bis ein neuer „Sättigungszustand“ eintritt. Der Begriff „Übersättigung“ wird oft falsch verstanden. Die sog. Übersättigung eines Gewebes tritt erst durch den Aufstieg ein, sobald die Entladung beginnt.

7.2. Aufstiegs geschwindigkeit



Das schnelle 12,5 min Gewebe erreicht beispielsweise seinen höchsten an der Oberfläche zulässigen Inertgasdruck bei einem sehr langen Tauchgang in 19 m Tiefe (bei 2,9 bar). Aus 19 m kann es jederzeit ohne Einhaltung von Dekopausen zur Oberfläche gebracht werden. In 19 m Tiefe hat es seine „ewige Nullzeit“. Bei einem 19 m Tauchgang wird in 75 min (6-fache Halbwertszeit) der höchstzulässige Inertgasdruck erreicht.

Den gleichen Gewebedruck wie bei einem langen 19 m Tauchgang erreicht das Gewebe bei einem 12,5 min Tauchgang in der doppelten Tiefe (bei 4,8 bar).

Nach einem Tauchgang in der Halbwertszeit ($t = T$) kann das Leitgewebe theoretisch sehr schnell bis halbe Tiefe gebracht werden. In dieser Tiefe herrscht Gleichgewicht der Drücke. Es findet keine weitere Aufsättigung mehr statt.

Erst beim weiteren Aufstieg beginnt die Entladung, wenn der Umgebungsdruck geringer ist als der Gewebedruck. Da beim „sprunghaften“ Aufstieg von 38 m bis 19 m noch keine Entladung erfolgt, erscheint für dieses Gewebe auch keine Begrenzung der Aufstiegs geschwindigkeit erforderlich. Erst ab 19 m muss sie vermindert werden. Langsame Gewebe werden weniger weit aufgeladen und könnten theoretisch „beliebig“ schnell in noch geringere Tiefen gebracht werden.

Tatsächlich verursacht jede schnelle Druckänderung die Ablösung von Blasen, sodass auch in größeren Tiefen nicht beliebig schnell aufgestiegen werden darf.



Um Gewebe beim Aufstieg nicht übermäßig weiter zu laden, erscheint es jedoch nützlich, die Aufstiegs geschwindigkeit im untersten Bereich zu erhöhen [5] [16].

Beim langsamen Aufstieg aus 38 m (entsprechend C – D Abschnitt 7.1.) erfolgt zunächst eine zusätzliche Aufsättigung des 12,5 min Gewebes, so dass nicht mehr in 19 m, sondern einige Meter tiefer das Gleichgewicht der Drücke erreicht wird und die „Entsättigung“ beginnt. Je langsamer der Aufstieg, desto weiter werden Gewebe geladen und der zulässige Gewebedruck für den direkten Aufstieg zur Oberfläche kann überschritten werden.

Während des Aufstieges beginnt ein Gewebe nach dem anderen mit der Entladung, so dass die Aufstiegs geschwindigkeit zunehmend verlangsamt werden muss. Je geringer der Luftdruck an der Oberfläche (Bergsee) desto geringer muss die Aufstiegs geschwindigkeit in Oberflächennähe sein.

Die meisten Tabellen verlangen im Anschluss an die Zeit am Grund einen kontinuierlichen, langsamen Aufstieg von C – D als wesentlichen Teil der Dekompression. Sobald jedoch die Aufstiegs geschwindigkeit von der Vorschrift abweicht, entstehen Probleme.

Ist der Aufstieg zu schnell, so können sich die schnelleren Gewebe nicht rechtzeitig entsättigen (Blasenbildung), ist er zu langsam, so werden langsame Gewebe weiter aufgesättigt. In beiden Fällen wird die Dekompression verändert.

Die Nullzeit der Tabelle wird überschritten, wenn die Aufstiegs geschwindigkeit in der unteren Hälfte des Aufstiegs zu langsam ist. Um die zusätzliche Aufladung berücksichtigen zu können, muss mit üblichen Tabellen der langsame Aufstieg zur Grundzeit addiert werden.

Ein sehr langsamer Aufstieg (3 m/min) vom Grund bis zur „halben Tiefe“ verursacht beispielsweise eine unnötige Aufsättigung der Gewebe und eine deutliche Verkürzung der Nullzeit. Bei Strömung oder schlechter Sicht kann die kontinuierliche, langsame Aufstiegs geschwindigkeit von 10 m/min nur bei größter Konzentration eingehalten werden. Auch ein überdurchschnittlicher Taucher hat nach 4 min höchster Konzentration während des Aufstiegs vergessen, welche Dekoinformation er in 40 m Tiefe abgelesen hat. Es ist wesentlich einfacher, wenn ein Taucher nur darauf achten muss, nicht zu schnell zu werden.

Es erscheint daher sinnvoll, bis auf etwa halbe Tiefe oder 15 m nicht schneller als 10 m/min aufzusteigen (Empfehlung von **DAN**) und sich erst dann genauer mit den Dekozeiten zu beschäftigen. Der Atemgasverbrauch in 15 m ist geringer und der Taucher kann klarer denken als in 40 m Tiefe. **Als „Neue Grundzeit“ wird somit nicht nur die Zeit am Grund eingesetzt, sondern die gesamte Ladezeit des Leitgewebes**, also die Zeit vom Abstieg bis der tiefe Stopp erreicht ist. Die Neue Grundzeit kann einfach geplant werden, weil sie der „Dauer der Luftversorgung“ entspricht.

Es ergibt sich ein „Sicherheitsgewinn“, weil das Aufstiegsverfahren einfacher ist, weil der tiefe Stopp Bläschen abbaut und weil die „rechnerische“ Grundzeit um den Aufstieg zum tiefen Stopp „verlängert“ wird.

7.3. Sicherheitsstopps

Untersuchungen von A. Marroni haben den Beweis erbracht, dass durch tiefe Sicherheitsstopps die Bildung von Mikrobubbles vermieden werden kann [4]. P.B. Bennett erwartet sich durch einen „Sicherheitsstopp in 15 m oder halber Tiefe“ einen **deutlichen Rückgang der „derzeitigen Häufigkeit von Dekompressionsunfällen“** (gemeint sind die „unverdienten“ Unfälle) und eine radikale Veränderung von zukünftigen Dekotabellen und Computerprogrammen [6]. Die erste Veränderung von Tabellen zeigt ja dieses Skriptum.

Während des tiefen Sicherheitsstopps beginnen sich schnellere Gewebe zu entladen, während sich langsame Gewebe weiter aufladen. Ein Aufenthalt in 15 m Tiefe verlängert die Dekompression erst nach etwa 10 min. **Der tiefe Stopp hat nur dann einen Einfluss auf die „Dekompression“, wenn er tiefer als 15 m durchgeführt wird.**

7.4. Aufstiegsmodell

Druckänderungen wirken sich in Oberflächennähe am stärksten aus. Druckänderungen durch den Aufstieg können daher nur beurteilt werden, **wenn man sie auf den jeweiligen Umgebungsdruck bezieht.**

7.4.1. Relative Aufstiegs geschwindigkeit

Der Aufstieg im Meer aus 10 m zur Oberfläche erzeugt eine Druckänderung von 1 bar: Ein Gasbläschen vergrößert sein Volumen um 100 %.

$$\frac{\text{Druckänderung}}{\text{Umgebungsdruck}} 100 = \frac{1 \text{ bar}}{1 \text{ bar}} 100 = 100 \%$$

Bezogen auf den Umgebungsdruck von 4 bar in 30 m Tiefe erhalten wir 25 % „relative“ Druckänderung. Bezogen auf 30 m Tiefe ist die Vergrößerung des Bläschens 25 %

$$\frac{\text{Druckänderung}}{\text{Umgebungsdruck}} 100 = \frac{1 \text{ bar}}{4 \text{ bar}} 100 = 25 \%$$

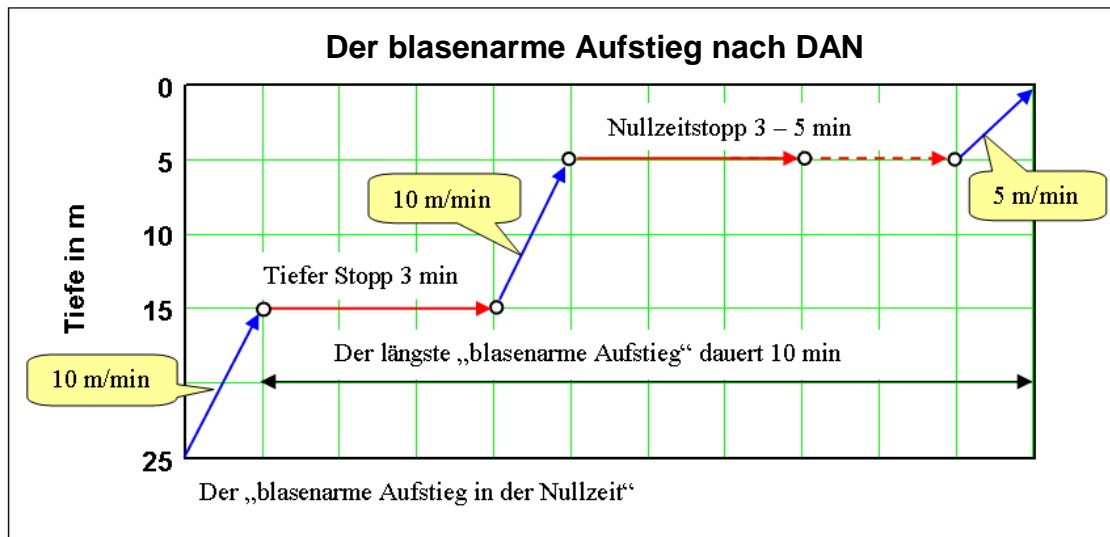
In 3000 m Höhe steigt die relative Druckänderung auf 143 %

Beim Aufstieg aus 10 m vergrößert sich das Gasbläschen um mehr als 140 %

$$\frac{\text{Druckänderung}}{\text{Umgebungsdruck}} 100 = \frac{1 \text{ bar}}{0,7 \text{ bar}} 100 = 143 \%$$

Die Aufstiegs geschwindigkeit muss daher in Oberflächennähe immer langsamer werden und sie muss im Bergsee noch ein weiteres Mal vermindert werden.

Eine zunehmende Belastung der Gewebe während des Aufstiegs wird vermieden, wenn man die „absolute“ Aufstiegs geschwindigkeit in Oberflächennähe halbiert.



Es ist eine leicht zu merkende, „bergseetaugliche“ Aufstiegsregel entstanden:
Der tiefe Stopp halbiert die Tiefe.
Der 5 m Stopp halbiert die Aufstiegsgeschwindigkeit.

7.4.2. Vorteile des Aufstiegsverfahrens

Es beruht auf experimentellen Untersuchungen von **DAN Europe**, die im Rahmen der Europäischen Gesellschaft für Unterwasser- und Baromedizin (EUBS) bereits in den Jahren 2000 [12], 2001 [13] und 2002 [14] veröffentlicht worden sind.

Es wird eine Planungstabelle verwendet, welche auf dem klar nachvollziehbaren ZHL- System von A.A. Bühlmann beruhen, welches an der Universität Zürich entwickelt worden ist [16]. Das Rechenmodell ZH-L16 ist „bergseetauglich“ und „nitroxtauglich“ und daher „**alltagstauglich**“.

Auch ein 5 min langer „tiefer Sicherheitsstopp“ verursacht bei Ersttauchgängen keine Verlängerung der Dekozzeit, weil die Aufsättigung der Gewebe in 15 m Tiefe vernachlässigbar ist.

Je geringer der Umgebungsdruck, desto geringer muss die Aufstiegsgeschwindigkeit werden. Die Aufstiegsgeschwindigkeit vom Nullzeitstopp (5 m Stopp) zur Oberfläche wurde daher auf 5 m/min halbiert und damit der verminderte Luftdruck am Bergsee [8] berücksichtigt. Der Taucher wird angehalten „bewusst langsam“ zur Oberfläche aufzusteigen (Sicherheitsfaktor).

Das Verfahren setzt keine Mindestgeschwindigkeit mehr voraus. Der Taucher muss nur mehr darauf achten, nicht zu schnell zu werden (Sicherheitsfaktor).

Durch die Einführung der „neuen Grundzeit“ muss sich kein Taucher mehr merken, welche Dekovorschrift er beim Verlassen des Grundes abgelesen hat (Sicherheitsfaktor). Die Einrechnung des Aufstieges bis zum tiefen Sicherheitsstopp verlängert die rechnerische Grundzeit und bildet dadurch einen Sicherheitszuschlag.

Der größte Sicherheitsfaktor ergibt sich weil man auch unter Wasser ablesen kann, wie lang die Luft reicht und weil man den Aufstieg zum Tauchplatz durch einen einfachen Zuschlag zur Tauchtiefe planen kann (ZH-L16 NITROXPLANNER).



Der Computer BUDDY NEXUS von A. P. Valves wurde für die Verwendung mit dem Kreislaufgerät „Buddy Inspiration“ neu entwickelt. Im Bereich von 65 bis 20 m schreibt er eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 20 m/min vor. Im Bereich von 20 m bis zur Oberfläche wird die Geschwindigkeit auf 10 m/min halbiert. Der Aufstieg im unteren Bereich kann auch mit einigen anderen Computern beschleunigt und somit eine unnötige Aufsättigung der Gewebe während des Aufstiegs vermieden werden. Wenn der Aufstieg aus größerer Tiefe beschleunigt wird, werden Dekozeiten kürzer als von einer Tabelle vorgeschrieben.

Eine Null-Meter Meerestabelle ist zur Bildung des „Tiefenzuschlags“ die einfachste Lösung. Es wurde zunächst eine konventionelle Tabelle für Meeressniveau mit den ZH-L12 Koeffizienten von Bühlmann (Abschnitt 4.2.) und eine Aufstiegsgeschwindigkeit von 10 m/min berechnet. Mit der „Zuschlags- & Abzugsmethode“ [8] ergeben sich damit **Planungsergebnisse die mit der 701-2500 m Bühlmanntabelle sehr genau übereinstimmen.**

Da alle modernen Tauchcomputer mit dem Nachfolgemodell ZH-L16 arbeiten, wurde der ZH-L16 B NITROXLNER entworfen. Er entspricht somit der zuletzt veröffentlichten Bühlmann-Bergseetabelle 2501-4500 m. Die Grundzeiten wurden so gewählt, dass sich Dekozeiten von 4, 8, 12 und 16 min ergeben. Man erhält dadurch für die Dekompression einen „gestuften“ Gasverbrauch von 10, 20, 30 oder 40 bar und damit eine grundlegend vereinfachte Tauchgangsplanung im Sinne von P.B. Bennett (**DAN**).

Im Gegensatz zu früheren Tabellen dauert der kürzeste Dekostopp lang genug (4 min), um die Gefahr von „Air Trapping“ zu verhindern. Die Verwendung der Meerestabelle mit 3 m Stufen vermeidet die erhöhte Blasenentwicklung aufgrund des 2 m Stopps älterer Bergseetabellen. Es wird auch kein Bergseecomputer gesperrt, weil er die Mindestdekotiefe 3 m unterschreitet.

Die Planungstabelle war ursprünglich mit Diagrammen ausgestattet, damit ein Taucher ohne mühsame Berechnungen ablesen konnte, wie lange die Luft in seiner Flasche reicht. Die Tabelle 2014 ist eine Weiterentwicklung für die verschiedenen Flaschengrößen. Die Erfahrung der letzten Jahre hat gezeigt, dass die meisten Taucher damit leichter umgehen können.

Der ZH-L16 -NITROXPLANER ist eine „bergsee- und nitroxtaugliche“ und damit „alltagstaugliche“ PLANUNGSTABELLE.

Er wurde für den „blasenarmen, standardisierten Aufstieg“ entworfen.

Die Tauchgänge selbst sollen mit modernen Tauchcomputern durchgeführt werden, weil sie durch die **einfachere Ablesung mehr Sicherheit** bieten. Es muss nicht unbedingt ein luftintegriertes Modell sein, denn die verbleibende Grundzeit kann direkt von der Tabelle abgelesen werden.

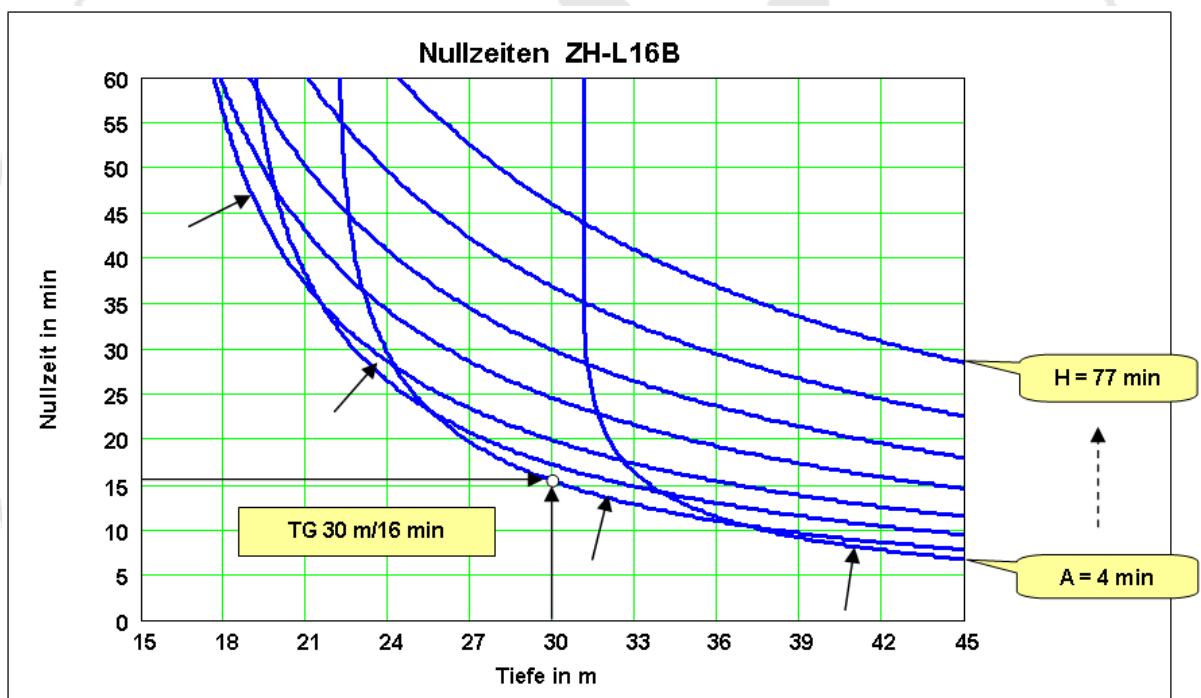
Es ist auch nicht unbedingt ein „Bläschencomputer“ notwendig. Prof. Wienke, der „Erfinder“ des RGBM- Bläschenprogramms meinte am **DAN-Divers-Day 2008** in Graz, dass sein Bläschenmodell ohnehin auf ein einfaches Diffusionsmodell „zusammenfällt“, wenn so getaucht wird, dass keine Blasen erzeugt werden.

7.5. Nullzeiten

Bühlmann definierte die Nullzeit als Zeit, in der sich das Gewebe in der angegebenen Tiefe auf den höchsten Inertgasdruck auflädt, der an der Oberfläche zulässig ist [16].

Die Nullzeit eines Gewebes hängt somit vom Luftdruck (in der Höhe des Berg-sees) und von der Tauchtiefe ab. Sie wird umso kürzer, je höher der Tauchplatz liegt und je tiefer der Tauchgang ist. Jedes Gewebe hat eine andere Nullzeit.

Im folgenden Diagramm ist der Verlauf der Nullzeiten der 8 schnellsten ZH-L16 Gewebe für Meeresniveau dargestellt. Die Gewebe wechseln sich ab. Das Gewebe mit der jeweils kürzesten Nullzeit (Leitgewebe) bestimmt die Gesamtnullzeit. Die „Grenzlinien“ der einzelnen Leitgewebe bilden die Nullzeit für den Taucher.



Der Nullzeit-Tauchgang dauert vom Beginn des Abstieges bis zum Erreichen des tiefen Sicherheitsstopps (Abschnitt 7.1 entsprechend A – D). Die Aufsättigung der Gewebe ist so weit fortgeschritten, dass der Oberflächendruck gerade noch von allen Geweben toleriert wird.

Ein Tauchgang 30 m, 16 min ist somit noch ein Nullzeittauchgang. Das bestimmende Gewebe (Leitgewebe mit der kürzesten Nullzeit) ist das 8 min Gewebe (B). Da die Gewebekennlinien relativ nahe beieinander liegen und die Planung von Wiederholungstauchgängen möglich sein muss, wurde für die Tabelle die höhere Wiederholungsgruppe D gewählt.

7.6. Nullzeittauchgänge

Nützt man die gesamte Nullzeit aus, so ist die **Inertgasbelastung des Leitgewebes** grundsätzlich gleich groß wie am Ende der Dekompressionszeit von Dekotauchgängen. In beiden

Fällen wird beim Aufstieg der tolerierte Umgebungsdruck (Luftdruck) und damit der höchstzulässige „Inertgasüberdruck“ erreicht. Nur wenn der Taucher unter der Nullzeitgrenze bleibt, ist die Belastung seiner Gewebe geringer.

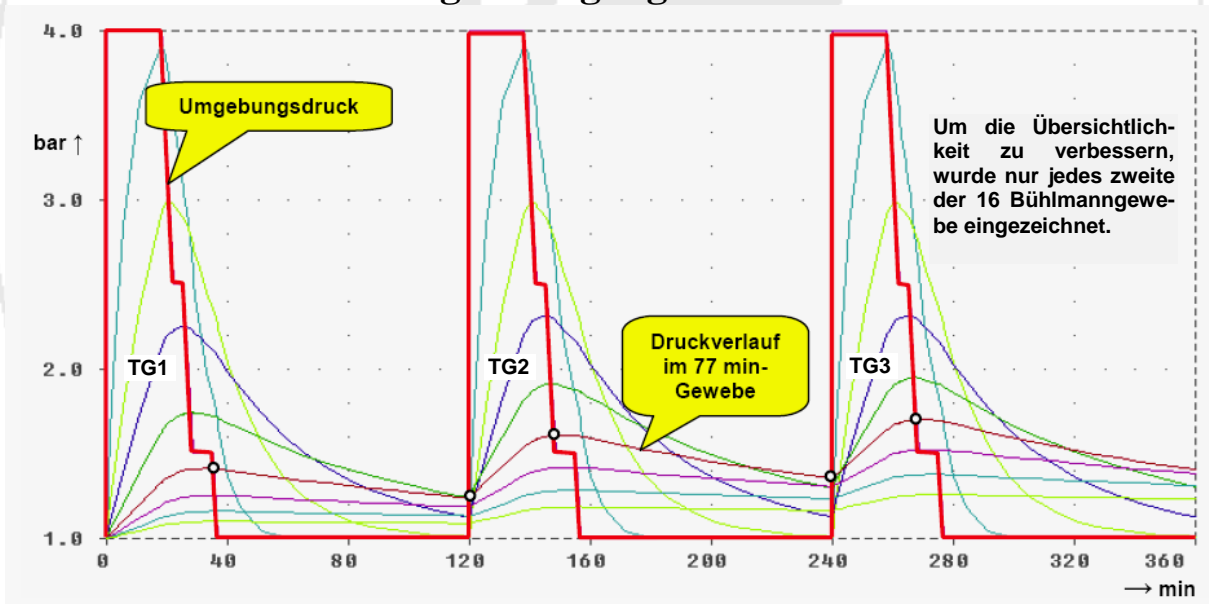
Die Verminderung der Aufstiegs geschwindigkeit gilt auch für Nullzeittauchgänge. Der **Sicherheitsstopp für Nullzeittauchgänge** (zur Vermeidung von „Air-Trapping“ und natürlich auch zum Abbau von Blasen) **beträgt 3 min in 5 m Tiefe**. Anschließend darf **bewusst langsam** zur Oberfläche aufgestiegen werden.

Es wurde gemessen, dass der Anfall von Mikrobläschen nach einem tiefen Tauchgang an der Nullzeitgrenze besonders groß ist [4]. **Der tiefe Stopp ist daher auch für Tauchgänge in der Nullzeit erforderlich.**

Am Bergsee werden die Nullzeiten mit zunehmender Höhe immer kürzer, weil die Gewebe nicht mehr so weit aufgeladen werden dürfen. Die Verkürzung der Nullzeiten kann jedoch durch Anreicherung der Atemluft mit Sauerstoff (Nitrox) kompensiert werden [9].

Mit Nitrox bleiben auch „lange“ Bergseetauchgänge noch innerhalb der Nullzeit.

7.7. Wiederholungstauchgänge



Der Umgebungsdruck zeigt den Verlauf der 3 Tauchgänge **TG1 – TG3**. Um Mikrobläschen zu vermindern wurden ein **3 min Stopp in 15 m** und ein **5 min Stopp in 5 m Tiefe** eingeführt. **Das Oberflächenintervall dauert jeweils knapp 1 ½ Stunden**. Die schnellsten Gewebe erreichen die höchsten Drücke und werden auch als erste entladen. Während des Oberflächenintervalls sinken alle Gewebedrücke auf unterschiedliche Werte. Der Folgetauchgang beginnt immer mit dem Restdruck aus dem vorhergehenden Tauchgang. Mittlere und langsame Gewebe können sich nicht auf ihre Anfangswerte entladen. Man sieht, wie der Druck des 77 min-Gewebes **von Tauchgang zu Tauchgang zunimmt**. Das Kompartiment braucht eine **lange Oberflächenpause während der Nacht** um sich wieder entladen zu können.

Zur Entladung der langsamsten Kompartimente reicht eine Nacht nicht aus. **DAN** empfiehlt daher jeweils nach 3-4 Tagen mit vollem Tauchprogramm einen **tauchfreien Tag**. Fliegen



nach dem Tauchen ist ein Problem der langsamen Gewebe möglicherweise in Verbindung mit dem sog. "Economy-Class Syndrome". Die trockene Luft und der Bewegungsmangel infolge der engen Sitzposition mit angewinkelten Beinen über viele Stunden begünstigt Venenprobleme in den Beinen.

Dekotabellen mit Wiederholungsgruppen sind nicht geeignet, um den steigenden Dekompressionsbedarf nach jedem Folgetauchgang sicherzustellen. Wenn die Dekompression für den dritten Tauchgang bemessen wurde, ist sie für den zweiten Tauchgang länger als nötig. Der vierte Tauchgang erscheint bereits riskant, weil der Restdruck langsamer Gewebe immer weiter ansteigt. **Die Verwendung von Wiederholungstabellen wird daher auf 2 oder auf 3 Tauchgänge pro Tag begrenzt. Mit Bühlmannstabellen dürfen bis zu 3 Tauchgänge pro Tag durchgeführt werden. Für andere Tabellen gibt es keine Angaben.**

Einzelne Tabellen haben kurze Zeitzuschläge, andere haben lange. Die „optimale“ Dekompression kann nicht garantiert werden. Tabellen eignen sich daher für die Planung, während der Tauchgang besser mit einem Computer durchgeführt wird.

Planungsergebnisse mit einer ZH-L16 Tabelle sind am ehesten vergleichbar, weil heutzutage „alle“ Computer "modifizierte" Bühlmannprogramme verwenden.

Der Gewebekode kann den Einfluss der langsamen Kompartimente nur für eine begrenzte Anzahl von Wiederholungstauchgängen berücksichtigen. Der Gewebekode bezeichnet ja nur das Leitgewebe oder das langsamste Gewebe, welches nach einem Tauchgang dekomprimiert werden muss. **Das gewählte System der „Wiederholungsgruppen“ ist grundsätzlich NICHT geeignet, um den bei jedem Folgetauchgang steigenden Druck langsamer Gewebe zu berücksichtigen.** Das folgende Beispiel wurde so gewählt, dass die Grenzen für die Anwendung der Wiederholungsgruppen erreicht werden (worst case scenario):

- **Es soll eine Serie von gleichartigen Tauchgängen untersucht werden:**

Seehöhe 700 m und angepasste Gewebe, damit der direkte Tabellenvergleich möglich wird. Verwendete Tabelle: Bühlmann 0-700 m (ZH-L12).

Für alle Tauchgänge gilt: Tiefe = 33 m, Zeit = 30 min, Oberflächenpause = 100 min. Nach OP = 100 min vermindert sich RG nach B, Zeitzuschlag = 10 min. Gewebekode und Zeitzuschläge der Tabelle bleiben für alle Folgetauchgänge gleich. **Der steigende Gewebedruck kann daher nicht berücksichtigt werden.**

	Deko nach ZH-L12 Tabelle 0-700 m	Berechnung mit ZH-L16 B	
TG1:	4 + 11 G = 15	5 + 11 = 16	+ 1
TG2:	2 + 8 + 23 G = 33	5 + 20 = 25	- 8
TG3:	2 + 8 + 23 G = 33	5 + 25 = 30	- 3
TG4:	2 + 8 + 23 G = 33	5 + 32 = 37	+ 4
TG5:	2 + 8 + 23 G = 33	5 + 49 = 54	+ 21

TG1 Zeigt, dass das Programm (ZH-L16B) geringfügig konservativer rechnet, als die Tabelle (ZH-L12). Für TG2 und TG3 sind die Tabellenzeiten noch länger als nötig. **Bei TG4 ist die Dekompression mit Tabelle bereits zu kurz.**

Die originale Wiederholungstabelle von Bühlmann ist somit für **höchstens 3 Tauchgänge pro Tag** verwendbar.



Die Zeitzuschläge der Wiederholungstabelle sind für TG2 und TG3 länger als erforderlich und daher zulässig. Für TG4 sind sie jedoch zu kurz. Außerdem ist die Dekotiefe 9 m zu groß. Wenn die Dekotiefe größer als notwendig ist, erfolgt die Entladung der Gewebe zu langsam und es werden längere Dekozeiten erforderlich. **Vorteilhaft wäre jedoch der schnellere Abbau von Mikrobläschen in vergrößerten Dekotiefen.**

Wiederholungstauchgänge sollen beim „non limit Tauchen“ möglichst innerhalb der Nullzeit bleiben. Je kürzer die Oberflächenpause, desto länger werden die Zeitzuschläge, so dass die verbleibende Nullzeit immer kürzer wird. Nullzeiten können daher in der Praxis nur mit Tauchcomputern ausgeschöpft werden. **Der Computer muss schon bei allen vorausgegangen Tauchgängen verwendet worden sein.**

Da die Aufsättigung langsamer Gewebe mit jedem Tauchgang zunimmt, wird nach 3 - 4 Tauchgängen eine lange (nächtliche) Pause von 12 Stunden empfohlen. 1 Tag pro Woche sollte tauchfrei bleiben (laut **DAN** sogar jeder 3. bis 4. Tag).

Es wurde beobachtet, dass die Entwicklung von Mikrobläschen innerhalb der ersten beiden Stunden nach einem Tauchgang relativ groß werden kann [4].

Die Oberflächenpause sollte daher möglichst 1 ½ - 2 Stunden betragen. In dieser Zeitspanne wird auch die Sauerstoffbelastung des Zentralnervensystems durch Nitrox zuverlässig halbiert [9].

7.8. Tauchgänge im Bergsee

Durch den verminderten Umgebungsdruck (Luftdruck) können die Gewebe weniger Inertgas in Lösung halten. Die Nullzeiten werden kürzer, die Dekozeiten länger. In 3000 m Höhe finden wir den Umgebungsdruck von 1 bar in einer Tiefe von 3 m (!).

Die Dekompression muss somit in größerer Tiefe beginnen.

Wenn der Tauchplatz höher als der Wohnort liegt, muss gewöhnlich 12 oder 24 Stunden gewartet werden, bis eine Tabelle verwendet werden darf.

Für einen Einsatztaucher, der zu einem Stausee am Berg geflogen wird, steht keine geeignete Tabelle zur Verfügung, weil keine Tabelle den schnellen Aufstieg vom ersten in den zweiten oder gar den dritten Höhenbereich berücksichtigt.

Der Taucher braucht daher einen Tauchcomputer, der den Aufstieg zum Berg mitrechnet. Nur der Hersteller kann Auskunft geben, ob ein Computer dazu geeignet ist. Es gibt Computer, die manuell auf den Bergseemodus umgeschaltet werden müssen. Manche Taucher ziehen einen Computer vor, der den Aufstieg zum Bergsee selbst erkennt.



Steht kein geeigneter Computer zur Verfügung, oder passt der Höhenbereich der Tabelle nicht, oder kann die vorgeschriebene Wartezeit nicht eingehalten werden, so steht für die Tauchgangsplanung als **Alternative die „Methode des Tiefenzuschlages“** [8] zur Verfügung. Diese Methode fordert gegenüber einer passenden Bergseetabelle geringfügig längere Dekozeiten. Die Verlängerung erscheint jedoch zumutbar.

Der Aufstieg zum Bergsee erfordert bei einzelnen Computern eine Adaptationszeit (Wartezeit) vor dem Tauchgang. Vor dem Aufstieg zu einem höher gelegenen Pass im Anschluss an den Tauchgang oder vor einem Flug muss ebenfalls eine Wartezeit eingehalten werden [7].

Mit zunehmender Höhe steigt die Anzahl langsamer Kompartimente, die dekomprimiert werden müssen noch stärker als bei Wiederholungstauchgängen. Damit steigen die Dekozeiten in geringer Tiefe besonders rasch an. Die Dekozeiten für Wiederholungstauchgänge werden immer länger. Ein dritter Tauchgang ist oft nicht mehr sinnvoll, weil die Dekozeiten länger werden als die Grundzeit.

• **Beispiel:**

Es soll die Dekompression für eine Serie von gleichartigen Tauchgängen ermittelt werden: Der Bergsee liegt in einer Höhe zwischen 1501 – 2500 m.

**Einzige erhältliche Tabelle: Bühlmann 701 – 2500 m,
Die Dekompressionsstufen sind 9, 6, 4 und 2 m !**

Für alle Tauchgänge gilt: Tiefe = 30 m, Grundzeit = 30 min, Oberflächenpause 100 min.

TG1: Dekovorschrift: 1 + 4 + 11 G (G = 54,3 min Gewebe)

OP = 100 min, G vermindert sich nach B, Zeitzuschlag für 30 m = 11 min,

Gesamtzeit = 30 min + 11 min = 41 min, nächst längere Tabellenzeit 45 min,

TG2: Dekovorschrift für 30 m und 45 min: 2 + 6 + 12 + 23 G

Da der Gewebekode nicht mehr verändert wird, bleibt auch der Zeitzuschlag für nachfolgende Tauchgänge gleich und alle Folgetauchgänge erfordern dieselbe Dekozeit.

Um eine möglichst gute Übereinstimmung zu erzielen, wurde die folgende Tabelle mit dem Koeffizientensatz ZH-L12 von Bühlmann berechnet. Im Anschluss an den Aufstieg von 701 bis 2500 m wurde eine Wartezeit von 40 min eingerechnet. Berechnet man nun den Einfluss der langsamen Gewebe, so findet man, **dass der Gewebekode bei jedem Folgetauchgang erhöht wird**, und dass beim 4. Tauchgang die Dekozeit in **2 m** Tiefe bereits 80 min beträgt weil das 305 min Gewebe dekomprimiert werden muss.

Tauchgänge: 30 m / 30 min OP = 100 min	Berechnete Dekompression in			Leit-gewebe	Halbwertszeit T [min]	Deko mit Tabelle Bühlmann 701 – 2500 m	Diff. [min]
	6 m	4 m	2 m				
TG1	1	4	12	G	54,3	1 + 4 + 11 G	- 1
TG2	1	4	21	H	77	2 + 6 + 12 + 23 G	+ 17
TG3	1	4	25	I	109	2 + 6 + 12 + 23 G	+ 13
TG4	1	4	80	M	305	2 + 6 + 12 + 23 G	- 42
TG5	1	4	124	N	390	2 + 6 + 12 + 23 G	- 86



Mit der Wiederholungstabelle von Bühlmann sind auch im Bergsee wieder nur 3 Tauchgänge pro Tag möglich. Die Dekozeiten werden extrem lang. In diesem Zusammenhang bekommt die Verwendung von NITROX eine neue Bedeutung, **weil Wiederholungstauchgänge in großer Höhe nur mit NITROX sinnvoll durchgeführt werden können** [8] [9].

Das vorhin genannte Rechenprogramm wurde vom Autor ursprünglich auf der Basis des ZH-L12-Systems von Bühlmann [8] entwickelt, damit die Lücke im System der Dekotabellen geschlossen werden konnte.

Wenn der Koeffizientensatz gegen ZH-L16 B ausgetauscht wird [16], fallen die **unnatürlichen Beschränkungen durch die Gewebe M und N** weg und es werden Tabellen für größere Höhen möglich. **Erst ZH-L16 ermöglicht Berechnungen über 2 Höhenbereiche. Mit ZH-L16 sind nun Berechnungen mit beliebigen Bergseehöhen und Aufstiegszeiten möglich.**

7.9. Höhenbereiche von Tabellen

Der Aufstieg zum Tauchplatz wird von den meisten Tabellen nicht berücksichtigt. **Sie sind daher nur für angepasste Gewebe und nur für einen begrenzten Höhenbereich gültig.** Die Bergseetabelle von Bühlmann ist die einzige, welche den Aufstieg von 701 m auf 2500 m innerhalb einer Stunde ausdrücklich zulässt.

Die DECO92 Tabelle gibt es für die Höhenbereiche 0-700 m und 701–1500 m. Es gibt **keine verbindlichen Angaben**, nach welcher Wartezeit die Bergseetabelle verwendet werden darf.

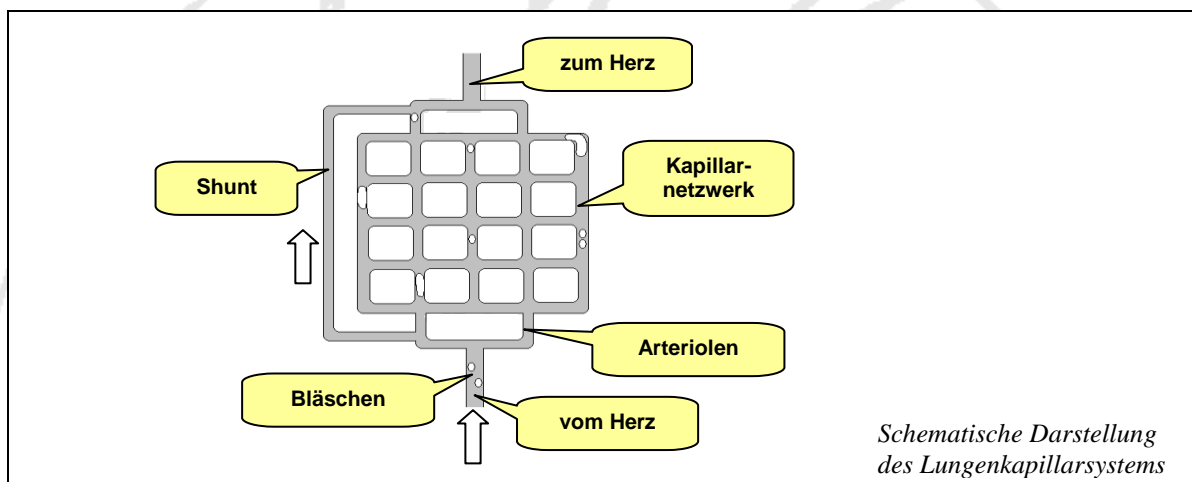
Wenn ein Taucher **im Tal (500 m) wohnt und in einem Bergsee (1000 m) tauchen möchte**, müsste er **am Bergsee übernachten**, damit sich wenigstens die schnellere Hälfte seiner Gewebe an den verminderten Druck anpassen kann. Der britische Tauchverband SAA (Sub Aqua Association) verwendet das Bühlmannsystem und schreibt in seinem Handbuch 1988 auf Seite 27 sogar eine allgemeine **Wartezeit von 24 Stunden** vor, wenn „eine Höhenänderung“ (in größere Höhe) erfolgt ist.

Die kanadische DCIEM-Tabelle (1992) verwendet im Bergsee ebenfalls ein Zuschlags- und Abzugssystem. Die Tiefenzuschläge sind besonders groß, weil bei den Dekotiefen so extreme Abzüge gemacht werden. Die Zuschläge sind noch größer als bei der „alten Bergseeformel“. **Die Arbeiten Bühlmanns werden offensichtlich NICHT anerkannt.**

Die Methode des Tiefenzuschlages [8] beruht auf dem ZHL- System von Bühlmann. Sie stellt eine Alternative zu Bergseetabellen dar und ermöglicht die Planung beliebiger Bergseetauchgänge. Die Methode kann sogar unter Wasser angewendet werden.

7.10. Der Rechts - Links - Shunt [16]

Blasen, die sich am Ende des Tauchgangs in den Geweben bilden, werden vom venösen Blut in die Lunge geschwemmt. Dort bleiben sie in den Kapillaren stecken und werden wieder abgebaut. Wenn viele Blasen eingeschwemmt werden, wie z.B. nach Wiederholungstauchgängen, nimmt der Widerstand der Lungenstrombahnen durch die stecken gebliebenen Blasen so weit zu, dass Blut an den Alveolen vorbei auf die arterielle Seite des Kreislaufs gelangt. Es bildet sich ein **Umgehungskreislauf (Nebenschluss = Shunt)**, durch welchen das Blut an den Alveolen vorbei geleitet wird. Blut, welches nicht durch die Alveolen strömt, kann keinen Stickstoff abgeben. Die Stickstoffabgabe durch die Atmung wird verzögert. Dieser Nebenschluss wird als „Rechts- Links- Shunt“ bezeichnet, weil er innerhalb der Lunge eine (modellhafte) Verbindung der beiden Herzhälften darstellt.



Das Phänomen des Rechts- Links- Shunts betrifft die Dekompression erst bei extrem langen Tauchgängen, wenn die Blasenbildung schon während der Dekostopps erfolgt. Es muss aber bei **Wiederholungstauchgängen**, beim **Fliegen nach dem Tauchen** und bei **Fahrten über höher gelegene Pässe** berücksichtigt werden. Je geringer der **Luftdruck am Bergsee**, desto schneller wachsen die Blasen, umso größer wird der Einfluss des Rechts- Links- Shunts. **Oberflächenpausen sollten daher am Bergsee länger dauern, als auf Meeresniveau.**

Nach Tauchgängen von Sporttauchern kann die Blasenbildung beginnen sobald die Oberfläche erreicht ist. **Wird wiederholt abgetaucht, so werden die Blasen komprimiert und gelangen auf die arterielle Seite, wo sie sich beim Aufstieg wieder ausdehnen.**

Jede Druckverminderung durch einen Aufstieg zur Oberfläche bewirkt die Ablösung von Blasen. **Wiederholte Aufstiege, wie bei Rettungsübungen, erzeugen daher in hohem Maß Mikrobläschen. Je höher der Bergsee, desto schneller wachsen sie.** Übungen welche Blasen erzeugen, wie „Jacket aufblasen“ oder „Rettungsübungen“ dürfen daher nur an den Beginn eines Tauchgangs gelegt werden, so lange noch wenig Mikrobläschen da sind und die Tiefe von Rettungsübungen muss begrenzt werden. Schwierigkeiten treten gewöhnlich nur beim Abheben vom Grund und bei Annäherung an die Oberfläche auf, sodass die sinnvolle Tiefe für derartige Übungen grundsätzlich auf 10 m oder weniger begrenzt werden kann. Das Abheben vom Grund kann auch in 5 m Tiefe geübt werden.

Von Aufstiegsübungen bei Wiederholungstauchgängen wird dringend abgeraten, genauso vom Freitauchen oder sportlicher Betätigung im Anschluss an einen Tauchgang. Die Blasenbildung erfolgt auch bei Tauchlehrern, welche solche Übungen begleiten.



8. Tauchcomputer

Tauchcomputer sind einfacher anzuwenden als Tabellen. Die Planung eines Tauchgangs wird jedoch mühselig im Vergleich zur Planung mit Tabelle. Einzelne Computer sind dazu nicht geeignet. **Bergseplanungen sind immer noch nicht möglich.** Manche Computer müssen von Hand auf den passenden Höhenbereich eingestellt werden, andere können die Druckänderungen beim Aufstieg zum Tauchplatz messen. Solche Computer müssen daher immer **am Wohnort des Benützers aufbewahrt** werden.

Durch Berührung mit dem Wasser wird der Nullpunkt des Tiefenmessers auf den Oberflächendruck eingestellt und der Tauchmodus wird eingeschaltet. Der Computer misst in kurzen Abständen die Druckänderung (Tiefe) und die Zeit, zeigt sie an und berechnet daraus die Inertgasdrücke der einzelnen Gewebe. Er berechnet, wie lange der Taucher noch in der augenblicklichen Tiefe verweilen darf, ohne dass Dekopausen notwendig werden (Nullzeit) und zeigt die erforderliche Aufstiegszeit mit allen Dekopausen an. Neuere Computer zeigen keine starren Dekotiefen (3, 6, oder 9 m) mehr an, sondern geben an, wie weit der Taucher **aufsteigen darf**, ohne seine Gewebe zu überlasten (**ceiling = Obergrenze**). Sie geben auch an, wie weit ein Taucher **aufsteigen muss** damit überhaupt eine nennenswerte „Entsättigung“ beginnt (**floor = Untergrenze**).

„Luftintegrierte“ Computer zeigen sowohl den Flaschendruck als auch die Zeit an, die der Taucher noch in der augenblicklichen Tiefe mit dem momentanen Luftverbrauch verbringen kann, ohne seine „Reserve“ anzugreifen. Sie schätzen „körperliche Anstrengung“ aufgrund von Veränderungen des **Druckverbrauchs** ab.

„Adaptive Programme“ versuchen die temperaturabhängige Löslichkeit des Stickstoffs in der Haut zu berücksichtigen, indem sie die Wassertemperatur messen. Nitroxcomputer lassen sich auf den Sauerstoffgehalt der Atemluft einstellen. Immer mehr Systeme übertragen den Flaschendruck nicht durch einen Schlauch sondern über kodierte Ultraschallsignale von einem Sender an der Hochdruckstufe zum Empfänger im Computer am Handgelenk.

Tauchcomputer sind heute meist nicht mehr für den „durchschnittlichen Taucher“ sondern für den „ungeübten Urlaubstaucher“ ausgelegt. Sie rechnen während des Tauchgangs und an der Oberfläche weiter und gelten nur für das Tauchgangsprofil ein und desselben Tauchers.

Tauchcomputer haben den grundsätzlichen Vorteil gegenüber Tabellen, dass man die Dekompression auch ein oder zwei Meter tiefer beginnen und durchführen kann. **Der tolerierte Umgebungsdruck wird nicht mehr erreicht und die Bildung von Mikrobläschen mit großer Sicherheit vermindert.** Die Dekozeit wird natürlich länger.

Tauchcomputer sind nicht zuverlässiger als Uhren oder Tiefenmesser. Sie können daher nicht die fehlenden Instrumente des Tauchpartners ersetzen.

Bei Computern ist die gleiche Entwicklung festzustellen, wie bei Dekotabellen. Im Streben nach „erhöhter Sicherheit von Tabellen“ hat man versucht, „statistische Unfallhäufigkeiten“ einzubauen und damit die Dekozeiten in einzelnen Tiefenbereichen nicht mehr nachvollziehbar verlängert. Bei Computern ist der „persönliche Sicherheitslevel“ der große Renner. Wenn der erste Computerhersteller mit einem Sicherheitsargument (Verkaufsargument) vorprescht, zieht der nächste nach und versucht den ersten zu übertreffen.



Ein Vergleich der Dekozeiten von 9 verschiedenen Computern in einem Tauchmagazin (Oktober 2002) zeigt, dass ein **Vergleich grundsätzlich nicht mehr möglich** ist. Für ein und denselben Tauchgang werden Dekozeiten von 8 bis 138 min angegeben, so dass ein Taucher 2 Stunden länger dekomprimieren muss als sein Partner. Derartige Abweichungen stellen die Sinnhaftigkeit des Computers in Frage. Eine Verlängerung der Dekozeiten um 2 Stunden erscheint nicht geeignet, um die Sicherheit von Tauchern zu erhöhen.

Computer haben begonnen, den Tauchern das Denken abzunehmen. Sie sind keine Entscheidungshilfe mehr, weil sie einen Taucher „gängeln“ und ihm sogar das Tauchen verbieten. Computer gaukeln dem Taucher eine Sicherheit vor, die er nicht hat.

Der Computer ist nicht in der Lage, einen Taucher garantiert vor der Dekokrankheit zu schützen, genau so wenig wie ein „Lawinenpieps“ nicht wissen kann ob die Lawine tatsächlich ausgelöst wird oder nicht.

Erst durch eine fundierte Ausbildung auf dem Gebiet der Dekompression kann ein Taucher die Fähigkeit erwerben, sich selbständig für einen bestimmten Computer zu entscheiden. Ohne Ausbildung ist man den Verkaufsargumenten der Hersteller ausgeliefert.



Computer haben den unbestreitbaren Vorteil der einfachen Anwendbarkeit und sie sind geeignet, Nullzeiten auszureizen. Es erscheint daher nützlich, die **Regeln für den „blasenarmen Aufstieg von DAN“** anzuwenden, auch wenn sie noch nicht in den Bedienungsanleitungen aufscheinen.

Einzelne „konservative“ Computer zeichnen sich durch „**überlange“ Dekozeiten** aus. Ein Taucher, dessen Dekozeiten wesentlich länger sind als jene seines Partners neigt dazu, diese Zeiten nach Belieben „freihändig“ zu verkürzen, weil doch der Partner das Wasser jedes Mal früher verlässt, wenn ihm schon kalt ist. ...dem Partner ist ja auch noch nie etwas passiert!



Zunächst möchte man meinen, ein konservativer Computer sei tatsächlich „sicherer“ als ein liberaler. Bei Dekotauchgängen kann sich das schnell ändern. Es scheint sicherer, wenn man einen möglichst liberalen **Computer „konservativ“ verwendet, indem man die Dekostufen tiefer beginnt und Dekozeiten verlängert.**

Wenn die Luft knapp wird, bei starker Strömung, wenn man zu erkennen glaubt, dass die Haie „unruhig“ werden, wenn Kälte oder „ein unvermeidlicher dringender Druck“ den Aufstieg erzwingt – bei all diesen Notfällen sagt uns ein liberaler Computer die kürzeste Zeit, nach der wir das Wasser mit relativ geringem Risiko verlassen können. Es kann angenommen werden, dass der Computerhersteller dabei genau so wenig Risiko eingehen will wie wir.

Wird ein Computer auf „sicher“ eingestellt, kommt es vor, dass die Dekozeiten doppelt so lang sind als jene des Partners. Entweder der Taucher sitzt die Dekozeit aus, oder er hängt den Computer ins Wasser, damit er nicht für den nächsten Tauchgang gesperrt wird. Es empfiehlt sich daher, dass Taucher gleichartige „Sicherheitspolster“ einstellen oder ganz darauf verzichten, weil sie ausgebildet sind und daher abschätzen können, in welcher Tiefe sie Sicherheitsstopps einhalten und welche sie verlängern wollen.

In diesem Zusammenhang soll erwähnt werden, dass es seit Mitte 2003 Computer gibt, welche einen tiefen Sicherheitsstopp in ihr Rechenprogramm eingebaut haben. Die grundlegenden Arbeiten von **DAN**, von Bruce Wienke und anderen haben begonnen in der Dekompression Fuß zu fassen.

8.1. Wichtige Begriffe

Hardware:

Drucksensor, Daten- und Programmspeicher, Rechen- und Anzeigeeinheit sind gemeinsam mit der Batterie in einem druckfesten Gehäuse mit Armband eingebaut



Tauchcomputer müssen programmiert werden,

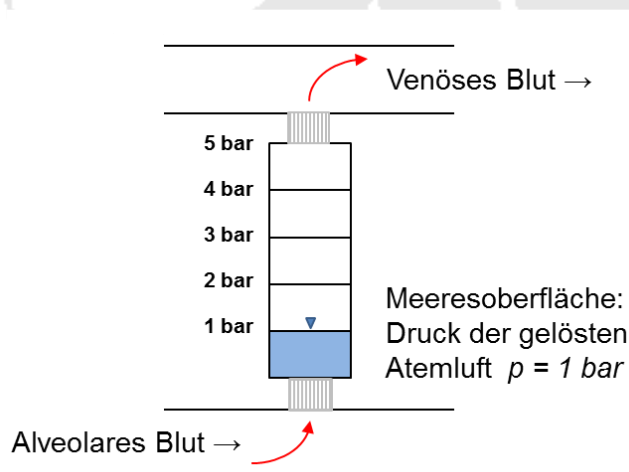
damit sie die vorgegebenen Rechenoperationen durchführen können. Die notwendigen Berechnungen werden von einem Rechenmodell mit 6-9 sog. Kompartimenten abgeleitet, welche menschlichen Geweben entsprechen.

Software:

Die Gewebedaten und die Steuerbefehle für den Mess- und Rechenablauf werden in digitaler Form in Speicherbausteine „eingelassen“ und können schrittweise „abgearbeitet“ werden.

Programmablauf:

Sobald der Drucksensor eine Druckänderung misst, beginnt der Computer in kurzen Zeitintervallen die einzelnen Gewebedrücke zu berechnen und mit dem gemessenen Druck zu vergleichen. Aus den berechneten Werten erstellt der Computer eine Prognose, wie der Aufstieg zur Wasseroberfläche erfolgen kann. Wenn der Sensor Druckänderungen erkennt, die eine Blasenbildung verursachen können, verändert das Programm einzelne Parameter und die Berechnung wird konservativer. Dazu kommen viele Unterprogramme, welche die Einstellung des Computers ermöglichen.



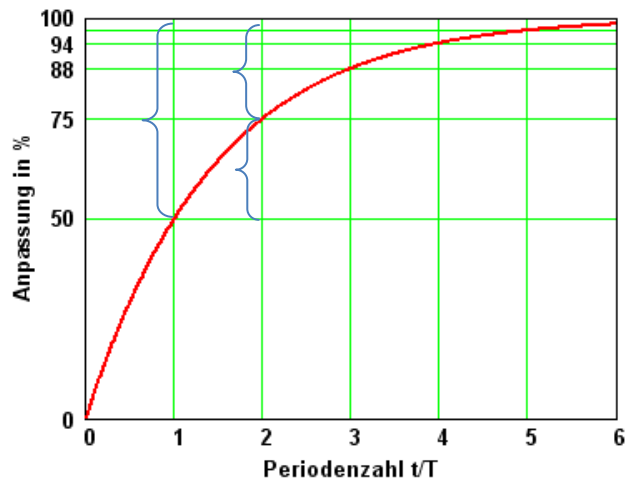
Kompartiment/Gewebe:

Unter einem Kompartiment kann man sich auch einen durchbluteten Behälter vorstellen. Das zugeführte Blut vermischt sich laufend mit dem Blut im Behälter. Wenn der Druck der gelösten Luft im zugeführten Blut größer wird als im Kompartiment, so beginnt der Druck im Kompartiment zu steigen. Wenn der Druck im zugeführten Blut fällt, so nimmt auch der Druck im Kompartiment ab. Der Druck im Kompartiment gleicht sich so lange an den Umgebungsdruck an bis der Druckausgleich erfolgt, d.h. bis die sog. Anpassung oder Sättigung eintritt.

Der Computer ist so programmiert, dass er in kurzen Zeitabständen den Umgebungsdruck misst und daraus berechnet wie sich die Drücke der einzelnen Gewebe verändern. Er rechnet so lange weiter, bis alle Gewebe rechnerisch den gemessenen Umgebungsdruck angenommen haben (Druckausgleich). Der Computer wird NIE ausgeschaltet.

Halbwertszeit:

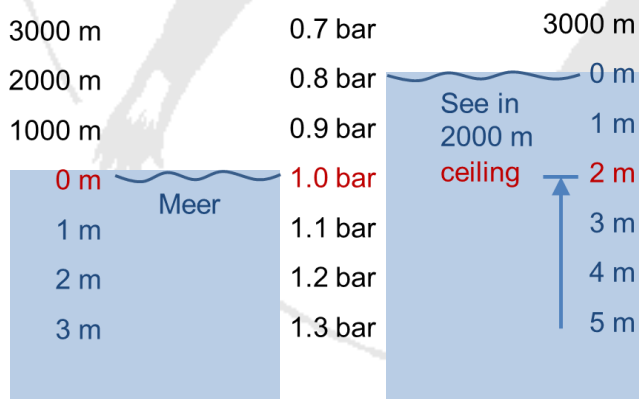
Wie lang es dauert, bis der Druckausgleich erfolgt hängt von der sog. Halbwertszeit ab. Bei einem „20 min Gewebe“ dauert es beispielsweise 20 min, bis der Druckunterschied zwischen Umgebung und Kompartiment halbiert wird. In 6 Perioden der Halbwertszeit ($6 \times 20 \text{ min} = 120 \text{ min} = 2 \text{ Stunden}$) wird der Druckunterschied 6-mal halbiert und so klein, dass Anpassung angenommen wird. Bei schnelleren Geweben erfolgt der Druckausgleich früher, bei langsameren später. Typische Halbwertszeiten sind 5, 10, 20, 40, 80, 160, 320, und 640 min.



Der Tolerierte Umgebungsdruck:

$$\text{Tolerierter Umgebungsdruck} = (\text{Inertgasdruck} - a) \times b$$

Ein Kompartiment wird nicht nur durch seine Halbwertszeit gekennzeichnet sondern auch durch die Koeffizienten a und b, mit welchen der „Tolerierte Umgebungsdruck“ berechnet wird. Das ist der geringste Umgebungsdruck, dem ein Kompartiment ausgesetzt werden darf, ohne dass Symptome einer DCS zu erwarten sind. **Der Umgebungsdruck darf nie unter diesen Druck fallen.** Der Tolerierte Umgebungsdruck eines Gewebes kann in Form einer „Gewebekennlinie“ dargestellt werden und zeigt unabhängig von der Seehöhe bis zu welchem Druck (nicht Tiefe) das Gewebe aufsteigen darf. **Ceiling** ist die Tiefe, in welcher der Tolerierte Umgebungsdruck herrscht.



Die Seehöhe:

Ein Gewebe mit einem Tolerierten Umgebungsdruck von beispielsweise 1 bar darf im Meer an die Oberfläche gebracht werden. In 2000 m Seehöhe beträgt der Oberflächendruck nur 0.8 bar und 1 bar Umgebungsdruck finden wir erst in 2 m Tiefe. **Das Gewebe darf somit nur bis 2 m Tiefe aufsteigen, weil der Tolerierte Umgebungsdruck in 2 m Tiefe herrscht (Ceiling).** Das Gewebe wird in 3 m dekomprimiert und zwar so lang, bis es den Luftdruck in 2000 m toleriert.

Der Aufstieg vor dem Tauchgang:

Wenn der Aufstieg zum Bergsee vom Meer aus erfolgt beträgt der Anfangsdruck der Gewebe 1 bar. Während des Aufstiegs beginnen sich die Gewebe auf den sinkenden Luftdruck zu entladen. Der Druck im schnellsten Gewebe kann dem Aufstieg annähernd folgen, das langsamste behält weitgehend seinen Anfangsdruck. **Das heißt, dass die einzelnen Gewebe den**



Tauchgang mit unterschiedlichen Drücken beginnen, die höher sind als der Luftdruck. Wenn der Gewebedruck schon am Anfang des Tauchgangs größer ist als der Luftdruck, so ist er auch am Ende größer, was zu einer zusätzlichen Verlängerung der Dekozeit führt.

Der Aufstieg nach dem Tauchgang:

Wenn das langsamste Kompartiment beispielsweise auf Meeresniveau angepasst ist (Anfangsdruck = 1 bar) toleriert es den Luftdruck in 5000 m Seehöhe. Wenn der Anfangsdruck größer ist, weil schon getaucht wurde, **muss zunächst einmal 1 Stunde gewartet werden, bis die in den Geweben entstehenden Blasen wieder abgeklungen sind**. Anschließend kann der Aufstieg beginnen, muss aber in einer geringen Höhe beendet werden. **Wenn die Wartezeit vor dem Aufstieg länger dauert, darf weiter aufgestiegen werden**. Das Computerprogramm greift auf eine gespeicherte Tabelle zurück oder es wird so geschrieben (mit mathematischen Gleichungen ausgestattet), dass die Wartezeit vor einem Flug oder vor einer Passfahrt berechnen werden kann.

Mikroblasen:

Im Blut befindet sich die Luft nicht nur in der gelösten Phase sondern auch in der Gasphase (Mikrobläschen). Infolge von Erwärmung oder von Druckstößen durch Wellen oder körperliche Belastungen und vor allem bei Abnahme des Umgebungsdrucks beginnen die Mikrobläschen zu wachsen. **Der Umgebungsdruck muss in jeder Phase des Tauchgangs groß genug sein, damit die Bläschen klein gehalten werden können und das gelöste Gas auch wirklich in Lösung bleibt**.

Der Tiefe Stopp:

Ein 30 m Tauchgang im Meer mit 40 min Grundzeit dauert für das 40 min Gewebe genau eine Periode der Halbwertszeit. Der Druckunterschied beträgt $4 \text{ bar} - 1 \text{ bar} = 3 \text{ bar}$. Da der Druckunterschied in 40 min halbiert wird, steigt der Gewebedruck um 1.5 bar von 1 auf 2.5 bar. Das Gewebe hat den Umgebungsdruck in halber Tiefe (15 m) angenommen. **Steigt der Taucher nun auf, so besteht für ein Bläschen im 40 min Gewebe in halber Tiefe Druckgleichgewicht**. Innen- und Außendruck heben sich auf und das Bläschen kann sich aufgrund seiner Oberflächenspannung zurückbilden.

Nullzeit/Dekozeit:

Anfänglich berechnet der Computer **wie lang es dauert, bis das Leitgewebe für die gemessene Tiefe den an der Oberfläche zulässigen Inertgasdruck erreicht** (Nullzeit). Wenn der Tauchgang länger dauert berechnet er die Zeit, die das Leitgewebe in den üblichen Dekostufen 6 m und 3 m verbringen muss, um das Gas weit genug abzubauen (Dekoprofil).

Nitrox:

Die Beimischung von Sauerstoff zur Atemluft bewirkt, dass der Inertgasanteil der Atemmischung sinkt. Der Inertgas-Partialdruck des Atemgases ist geringer, wie bei einem Tauchgang in geringerer Tiefe. **Mit dem sinkenden Inertgasdruck sinkt der Tolerierte Umgebungsdruck eines Gewebes. Das heißt, dass der Taucher mit Nitrox auf geringeren Druck aufsteigen darf als mit Luft und weniger dekomprimieren muss**. Die Gefährdung eines Tauchers geht in erster Linie vom Stickstoff aus. Am Nitroxcomputer muss daher der gemessene oder nächst größere



Stickstoffanteil eingestellt werden. Da sich aber nur der Sauerstoffanteil einstellen lässt, wählt man den kleineren Sauerstoffanteil.

Aufstiegsgeschwindigkeit:

Aus den gemessenen Druck- und Zeitintervallen wird berechnet, wie gut ein Taucher die zulässige Aufstiegsgeschwindigkeit einhält (Aufstiegswarnung).

Druckverbrauch:

Der Drucksender übermittelt den vom Sensor gemessenen Flaschendruck an den Tauchcomputer. Der Computer zeigt den Druck an. Er registriert den **Druckverbrauch = wie viel Bar pro Minute verbraucht werden** und berechnet daraus die Zeit, in welcher der Druck in der gemessenen Tiefe auf den Reservedruck (z.B. 40 bar) zurückgehen wird (**verbleibende Grundzeit**).

Warnungen:

Sobald der Umgebungsdruck **zu weit oder zu schnell** absinkt, wird der Taucher gewarnt. Dazu kommen „Nitroxwarnungen“ und es können alle möglichen zusätzlichen Alarme ein- und ausgeschaltet werden.

Vor dem Tauchgang muss überprüft werden, ob sich die Einstellungen für den beabsichtigten Tauchgang eignen.

- Die Grenze für den **Sauerstoffdruck** muss gewählt werden
- Der gemessene **Sauerstoffanteil** der Atemmischung muss eingestellt werden
- Der Tauchplatz muss im gewählten **Höhenbereich** liegen. Manche Computerhersteller geben in der Bedienungsanleitung an, dass vor dem Tauchgang beispielsweise eine **Anpassungszeit** von 3 Stunden in Höhe des Tauchplatzes verbracht werden muss.

Sicherheit:

Dem Anwender wird schmackhaft gemacht, dass seine persönliche Sicherheit gesteigert wird, wenn er Gradientenfaktoren und Alarme einstellen kann. Damit entfernt er sich jedoch immer weiter von den Sicherheitsgrenzen für den typischen Taucher. **Am Ende kann er nicht verstehen, warum gerade er 20 min lang dekomprimieren muss und sein Partner nicht.**

Dekounfälle sind sehr selten. Bei der Hälfte handelt es sich um „unverdiente“ Unfälle, bei welchen sich der betroffene Taucher genau an die Vorschriften von Tabelle oder Computer gehalten hat. **DAN hat herausgefunden, dass die Verlängerung von Dekozeiten NICHT geeignet ist, um diese „unverdienten“ Unfälle zu verhindern und empfiehlt anstatt der Verlängerung von Dekozeiten den „blasenarmen Aufstieg“.**

O ₂	BOOK	MORE	LIGHT	M ₂
	TIME 13:36	SO:09.27	MB L3	
	DEPTH 26.0m	DIVE TIME 9:	CMO ₂ 2%	
	LEVEL STOP 3h	TAT 1:	TEMP 20°C	
		4:18.0h	AUG	
WARNING BEGINN LEVELSTOPPS				

Computeranzeigen können verwirren, wenn der Anwender die vielen Informationen moderner Computer nicht auseinanderhalten kann. In einer Stresssituation erscheinen Computer nützlich, die leicht ablesbar sind und ihre Anzeigen auf das Wesentliche begrenzen.





Tauchgangsplanung:

Die Planung sollte zu Hause am Schreibtisch, aber auch unmittelbar vor dem Tauchgang erfolgen können, wenn der Taucher schon im Wasser steht. Wenn zur Planung Computereinstellungen verändert werden müssen, steigt die Unfallgefahr. **DAN** meldete einen schweren Dekounfall. Ein Taucher hatte Angst mit Nitrox 1.4 bar Sauerstoffdruck zu erreichen und glaubte, aus Sicherheitsgründen mit Luft tauchen zu müssen (!). **Nach dem Planungsvorgang vergaß er seinen Computer wieder von Nitrox auf Luft zurückzustellen.**

Vorläufig kann in den Tauchcomputer weder der Flaschendruck, noch der Aufstieg zum Tauchplatz eingegeben werden. Eine umfassende Tauchgangsplanung ist daher nur mit Tabellen möglich. **Außerdem dauert die Ablesung der Tabelle weniger lang als die Umstellung des Computers.**

Tauchgänge werden nur dann mit Tabellen geplant, wenn die Planung nicht länger als 1 Minute dauert und wenn sie ernst genommen werden kann, weil der Tauchcomputer (Software) zum selben Ergebnis kommt

8.2. Der Tiefenzuschlag mit ZH-L16

- **Wenn Tauchplatz und Wohnort in gleicher Höhe liegen**

ZH-L16-B, Aufstieg von 2500 - 2500 m in 0 min

Maximale Tiefe in Metern ? 30
Zeit am Grund in Minuten ? 30

RG/HWZ	Dekopausen	Inertgas	Ministdeko	Ceiling
B 8		2.79 bar	1.34 min	4.2 m
C 12.5		2.55 bar	3.22 min	4.8 m
D 18.5		2.24 bar	3.61 min	4.2 m
	DEKO 6 m / 4 min			
B 8		2.27 bar	1.08 min	.8 m
C 12.5		2.24 bar	5.05 min	2.6 m
D 18.5		2.07 bar	8.89 min	2.8 m
E 27		1.82 bar	10.22 min	1.9 m
F 38.3		1.57 bar	10.08 min	1.1 m
	DEKO 3 m / 11 min			

Ein Tauchgang 30 m, 30 min soll geplant werden. Der Taucher ist in 2500 m Seehöhe akklimatisiert.

Wenn der Taucher in **2500 m** Seehöhe akklimatisiert ist, dauert die geplante Deko = 4 + 11 = 15 min.

ZH-L16-B, Aufstieg von 0 - 0 m in 0 min

Maximale Tiefe in Metern ? **33.75**
Zeit am Grund in Minuten ? 30

Tiefe + 12.5 %

RG/HWZ	Dekopausen	Inertgas	Ministdeko	Ceiling
B 8		3.25 bar	1.43 min	4.5 m
C 12.5		3 bar	3.6 min	5.3 m
D 18.5		2.66 bar	4.57 min	4.7 m
E 27		2.29 bar	.29 min	3 m
	DEKO 6 m / 5 min			
C 12.5		2.57 bar	3.88 min	2.2 m
D 18.5		2.41 bar	7.86 min	2.8 m
E 27		2.16 bar	9.26 min	2 m
F 38.3		1.89 bar	9.05 min	1.1 m
	DEKO 3 m / 10 min			

Wählt man Meeresniveau und einen Tiefenzuschlag von exakt **5 % pro 1000 m** so beträgt die **Rechentiefe** = 30 m + 12.5 % = 33.75 m und die Dekozeit dauert exakt gleich lang.

Wenn Wohnort und Tauchplatz in der gleichen Höhe liegen, erhält man die Nullzeit oder die Dekozeit, wenn man eine Null Meter Meeres-



tabelle nimmt und die geplante Tiefe exakt um 5 % pro 1000 m Seehöhe vergrößert. Dieser Zusammenhang kann anhand der 2501-4500 m Bühlmantabelle überprüft werden [16].

- Wenn der Tauchplatz höher liegt als der Wohnort des Tauchers

ZH-L16-B, Aufstieg von 0 - 2500 m in 30 min

Maximale Tiefe in Metern ? 30
Zeit am Grund in Minuten ? 30

RG/HWZ	Dekopausen	Inertgas	Mindestdeko	Ceiling
B 8		2.79 bar	1.37 min	4.3 m
C 12.5		2.57 bar	3.4 min	4.9 m
D 18.5		2.27 bar	4.38 min	4.5 m
E 27		1.97 bar	.94 min	3.1 m
	DEKO 6 m / 5 min			
B 8		2.16 bar	.26 min	.2 m
C 12.5		2.19 bar	4.37 min	2.2 m
D 18.5		2.06 bar	8.7 min	2.8 m
E 27		1.85 bar	11.48 min	2.2 m
F 38.3		1.64 bar	14.82 min	1.7 m
G 54.3		1.44 bar	12.41 min	.8 m
	DEKO 3 m / 15 min			

Ein Tauchgang 30 m, 30 min (wie vorhin) soll geplant werden. Vor dem Tauchgang soll ein Aufstieg von 0-2500 Meter in 30 min erfolgen.

Wenn der Aufstieg von 0-2500 m in 30 min erfolgt, dauert die Dekozeit für den gleichen Tauchgang infolge des schnellen Aufstiegs um **5 min länger**.

ZH-L16-B, Aufstieg von 0 - 0 m in 0 min

Maximale Tiefe in Metern ? **36**
Zeit am Grund in Minuten ? 30

Tiefe + 20 %

RG/HWZ	Dekopausen	Inertgas	Mindestdeko	Ceiling
C 12.5		3.13 bar	.42 min	6.2 m
	DEKO 9 m / 1 min			
B 8		3.22 bar	1.28 min	4.3 m
C 12.5		3.04 bar	4.02 min	5.6 m
D 18.5		2.73 bar	5.85 min	5.3 m
E 27		2.36 bar	2.96 min	3.6 m
	DEKO 6 m / 6 min			
C 12.5		2.52 bar	3.39 min	1.9 m
D 18.5		2.42 bar	8.09 min	2.9 m
E 27		2.2 bar	10.61 min	2.3 m
F 38.3		1.94 bar	12.03 min	1.5 m
G 54.3		1.69 bar	4.34 min	.3 m
	DEKO 3 m / 13 min			

Sporttaucher können für einen Aufstieg von 0-2500 m mit **20 % Tiefenzuschlag** rechnen. Die **Rechentiefe** beträgt 30 m + 20 % = 36 m und mit einer Null Meter Meerestabelle dauert die geplante Deko wiederum gleich lang wie vorher.

Wenn der Tauchplatz höher liegt als der Wohnort und wenn ein schneller Aufstieg erfolgt, erhält man für die Planung eines Tauchgangs sehr gute Übereinstimmung,

wenn man die geplante Tiefe der Meerestabelle um **10 % pro 1000 m** Seehöhe vergrößert. Die Dekozeiten sind zwar meist länger als nötig, dafür können **2 Partner gemeinsam vor dem Tauchgang** 10 oder 20 % ohne bedeutenden Fehler zur geplanten Tiefe hinzuzählen. Bis 1200 m genügen für Sporttaucher 10 %, bis 2500 m genügen 20 % Tiefenzuschlag.

Sowohl die Seehöhe als auch der Aufstieg zum Bergsee können mit einem Zuschlag zur Tauchtiefe geplant werden, der von 2 Tauchpartnern VOR dem Tauchgang gemeinsam abgeprochen wird. 10 oder 20 % können gemeinsam ohne gefährlichen Rechenfehler zur Tauchtiefe addiert werden. Die Planung wird einfacher und genauer als mit Bergsetabellen und die Ergebnisse sind mit Computeranzeigen vergleichbar.

Ein schneller Aufstieg von Einsatztauchern kann sehr genau durch einen Tiefenzuschlag von 10 % pro 1000 m geplant werden [8].



- **Der Tiefenzuschlag wurde von ZH-L16 Geweben abgeleitet:**

Die Gewebegleichung von Bühlmann beschreibt den maximal zulässigen **Inertgasdruck** eines Gewebes:

$$\text{Inertgasdruck} = \frac{p \text{ tol}}{b} + a$$

An der Oberfläche muss der jeweilige Luftdruck toleriert werden. Der maximale **Druck der gelösten Luft** in einem angepassten Gewebe beträgt somit:

$$\text{Maximaldruck} = \frac{\left(\frac{p \text{ tol}}{b} + a\right)}{0.79}$$

*Druck in der zulässigen Maximaltiefe = Luftdruck + Druck der Wassersäule.
zulässiger Wasserdruck = Maximaldruck der gelösten Luft - Luftdruck*

Leitgewebe ist überwiegend das 12.5 min Gewebe, wobei $a = 0.8618 \text{ bar}$ und $b = 0.7222$
Der zulässige Druck der Wassersäule beträgt somit:

- **Auf Meeresniveau:** Anfangsdruck = Luftdruck = 1.013 bar

$$\text{zul. Wasserdruck} = \frac{\left(\frac{1.013 \text{ bar}}{b} + a\right)}{0.79} - 1.013 \text{ bar} \approx \mathbf{1.85 \text{ bar}} \text{ und entspr. } \mathbf{18.5 \text{ m Tiefe}}$$

- **In 2000 m Seehöhe:** Anfangsdruck = Luftdruck = 0.789 bar

$$\text{zul. Wasserdruck} = \frac{\left(\frac{0.789 \text{ bar}}{b} + a\right)}{0.79} - 0.789 \text{ bar} \approx \mathbf{1.68 \text{ bar}} \text{ und entspr. } \mathbf{16.8 \text{ m Tiefe}}$$

In beiden Tiefen wird der jeweilige Tolerierte Umgebungsdruck erreicht.

Die beiden Tiefen sind somit gleichwertig = äquivalent

Das Verhältnis der beiden Tiefen beträgt $18.5 \text{ m} / 16.8 \text{ m} = 1.10$

Das heißt, die **äquivalente Meerestiefe** ist in 2000 m Seehöhe 10 % größer als die **geplante Bergseetiefe**. **Mit zunehmender Seehöhe steigt die äquivalente Meerestiefe für angepasste Gewebe um 5 % pro 1000 m.**

- **Aufstieg 0-2000 m Seehöhe:**

Wenn nach einem „schnellen“ Aufstieg von 0-2000 m eine Periode der Halbwertszeit gewartet wird, kann sich das Leitgewebe zur Hälfte anpassen und der Anfangsdruck des Gewebes beträgt $(1.013 \text{ bar} + 0.789 \text{ bar}) / 2 = 0.901 \text{ bar}$.

$$\text{zul. Wasserdruck} = \frac{\left(\frac{0.789 \text{ bar}}{b} + a\right)}{0.79} - 0.901 \text{ bar} \approx \mathbf{1.57 \text{ bar}} \text{ und entspr. } \mathbf{15.7 \text{ m Tiefe}}$$

$18.5 \text{ m} / 15.7 \text{ m} = 1.18$

Dauert die Wartezeit nach einem schnellen Aufstieg zum Tauchplatz (Aufstieg eines Einsatztauchers) eine Periode der Halbwertszeit, so ist die äquivalente Meerestiefe in 2000 m Seehöhe 18 % größer als die geplante Bergseetiefe.

Wenn also vor dem Tauchgang ein Aufstieg erfolgt, steigt die äquivalente Meerestiefe mit zunehmender Seehöhe um 9 % pro 1000 m. Da dieser Wert von **ZH-L16 Geweben** abgeleitet wurde, stimmen Planungsergebnisse und Computeranzeigen überein.

Wenn der Tauchplatz höher liegt als der Wohnort des Tauchers kann mit guter Genauigkeit auch mit dem konservativeren Wert 10 % pro 1000 m gerechnet werden.

Wenn Taucher nicht mehr kompliziert rechnen müssen, steigt ihre Bereitschaft zur Tauchgangsplanung und Unfälle durch Panik aus tatsächlichem oder auch nur eingebildetem Luftmangel können vermieden werden.

8.3. Tauchgangsplanung mit dem Luftverbrauch

Ein Taucher verlässt sich gerne auf seinen Computer. Wenn der Computer des Tauchpartners eine „Bergspitze“ mehr oder weniger anzeigt, so wundert er sich. Bei einem Unterschied von ein paar Stunden „Entsättigungszeit“ wundert er sich auch...

Computer sind doch heutzutage schon „sooo sicher“ geworden ...
Jeder kann für sich „seine persönliche Sicherheit“ einstellen ...
Auf irgend etwas **muss** man sich ja heutzutage verlassen können ...
Mein Computer ist sowieso der teuerste und daher der sicherste ...

Aber wie soll man es dem Computer sagen, wenn man weiß, dass man anschließend an den Tauchgang einen 500 m höher liegenden Pass überqueren muss? Warum zeigt bei der Tauchgangsplanung jeder Computer etwas anderes an? Warum zeigen sogar gleiche Computermodelle unterschiedliche Werte?

Jeder Computerhersteller versucht sich von seinen Konkurrenten abzugrenzen indem er die „herausragende Sicherheit“ des eigenen Produktes anpreist. Wenn da alle Computer dieselben Werte anzeigen würden...? Computer nehmen dem Taucher das Mitdenken ab. Sie reagieren inzwischen auf den Luftverbrauch. Letzter Schrei in Japan sind Computer, die sogar den Aufstieg mit dem Jacket steuern. Was soll man da überhaupt noch planen?

Taucher, die noch nicht „computergläubig“ sind planen ihre Tauchgänge, weil sie wissen wollen, wie lange sie mit ihrer Luft auskommen werden und mit welchen Dekozeiten sie rechnen müssen. Nur die Planung mit „Tabellen“ kann dem Taucher sagen, mit welchem Druck er den Aufstieg beginnen muss und was auf ihn bei Wiederholungstauchgängen und bei Tauchgängen im Bergsee mit Nitrox zukommen wird. Während des Tauchgangs sind Computer besser geeignet.

Die Tauchgangsplanung soll der Sicherheit dienen. Wenn die Berechnungen so kompliziert und umfangreich bleiben wie sie derzeit dargestellt werden, wird auch in Zukunft niemand seinen Tauchgang planen. **Außerdem können durch Rechenfehler riskante Fehlplanungen verursacht werden, die ein Urlaubstaucher nicht erkennen kann.**

Eine komplizierte Berechnung dient nicht der Sicherheit!

Die größte Ungenauigkeit ist der durchschnittliche Luftverbrauch pro Minute oder das AMV (Atem- Minuten- Volumen). Es beschreibt den durchschnittlichen Luftverbrauch eines Tauchers an der Meeresoberfläche. Es schwankt **bei geringer Aktivität** von **12-18 l pro min** [17] und kann kurzzeitig bis etwa **40 l pro min** bei einem aufgeregten Taucher am Anfang seiner Ausbildung steigen. Der Luftverbrauch kann daher nur abgeschätzt werden. Die Schätzung wird genauer, wenn der Taucher sein persönliches AMV kennt.

In der Sonne steigt der Druck der Tauchflasche. Wenn dann der Druck im kalten Wasser des Bergsees wieder zurückgeht glauben manche Taucher, sie hätten weniger Luft zur Verfügung und sie müssten ihren „Luftvorrat“ neu „berechnen“. Wissen diese Taucher, was sie rechnen? Ist in der Flasche mehr Luft, nur weil sie in der Sonne liegt?



8.4. Bestimmung des Atem-Minuten-Volumens

Jeder Taucher kann sein persönliches AMV ermitteln, wenn er an der Wasseroberfläche schwimmt und abliest, wie viel bar er in 5 min aus seinem 10 l Tauchgerät abatmet. Die Druckänderung und die verbrauchte Zeit sollen möglichst genau abgelesen werden, damit man das AMV sinnvoll berechnen kann.

Wenn ein Taucher bei einem Luftdruck von 1 bar (an der Meeresoberfläche) innerhalb von 5 min aus einer 10 l Flasche 10 bar abatmet, so verbraucht er:

$$\frac{\text{Luftmenge}}{\text{Zeit}} = \frac{10 \text{ bar} \times 10 \text{ l}}{5 \text{ min}} = 20 \frac{\text{bar l}}{\text{min}} \quad (\text{„entspanntes“ Luftvolumen mit 1 bar Druck})$$

Das AMV beträgt bei „mittlerer körperlicher Anstrengung“ 20 Liter/min

8.5. Druckverbrauch und AMV

Der Druckverbrauch hängt von der Tiefe ab. Mit der 10 Liter Flasche in 10 m Tiefe beträgt er:

$$\text{Druckverbrauch} = \frac{\text{AMV} \times \text{Umgebungsdruck in 10m Tiefe}}{\text{Flaschenvolumen}} = \frac{20 \text{ l/min} \times 2 \text{ bar}}{10 \text{ l}} = 4 \frac{\text{bar}}{\text{min}}$$

Wenn der durchschnittliche Taucher in **10 m** Tiefe taucht und aus einer **10 Liter** Flasche atmet, so verbraucht er in **5 min** $5 \text{ min} \times 4 \text{ bar/min} = \mathbf{20 \text{ bar}}$. Der verbrauchte Druck entspricht exakt dem persönlichen AMV des Tauchers. **Wenn der Taucher nur 18 bar verbraucht beträgt sein AMV = 18 Liter/min.** In 1000 m Seehöhe muss die Messung wegen des geringeren Luftdrucks 1 m tiefer vorgenommen werden. Die Messung kann mit beliebigen Flaschengrößen erfolgen. Man muss nur vom NITROXPLANER ablesen in welcher Tiefe der Druckverbrauch 4 bar/min beträgt.

Die **Dekompressionszeit** wird überwiegend in 3 m Tiefe verbracht. Berücksichtigt man den tiefen Sicherheitsstopp in 15 m, so **kann während der gesamten Aufstiegsphase mit einer durchschnittlichen Tiefe von 5 m gerechnet werden.** Wenn man den Luftverbrauch auf das jeweilige Flaschenvolumen bezieht, erhält man den durchschnittlichen Druckverbrauch.

Ein „durchschnittlicher“ Taucher verbraucht mit der 10 Liter Flasche in 5 m Tiefe:

$$\text{Druckverbrauch} = \frac{\text{AMV} \times \text{Umgebungsdruck}}{\text{Flaschenvolumen}} = \frac{20 \text{ l/min} \times 1.5 \text{ bar}}{10 \text{ l}} = 3 \frac{\text{bar}}{\text{min}}$$

$$\text{Mit einer 15 Liter Flasche verbraucht er nur: } \frac{20 \text{ l/min} \times 1.5 \text{ bar}}{15 \text{ l}} = 2 \frac{\text{bar}}{\text{min}}$$

Der Druckverbrauch eines Tauchers **während der Austauschphase** in einer durchschnittlichen Tiefe von 5 m beträgt somit
mit der **10 l Flasche** etwa **3 bar/min**,
mit der **15 l Flasche** etwa **2 bar/min**.



Wenn der Restdruck in der **10 l Flasche** des Tauchers am Ende des Aufstiegs noch **30 bar** beträgt, könnte er bei einem Druckverbrauch von **3 bar/min** mindestens **10 min** lang dekomprimieren:

$$\text{Dekoreserve} = \frac{\text{Restdruck}}{\text{Druckverbrauch}} = \frac{30 \text{ bar}}{3 \text{ bar/min}} = 10 \text{ min}$$

Dem „durchschnittlichen“ Taucher bleibt bei 30 bar eine „Dekoreserve“
mit der **10 l Flasche** etwa **10 min**.
mit der **15 l Flasche** etwa **15 min**.

In der Praxis lässt sich eine Tauchflasche nicht völlig leer atmen. Würde der Taucher in 5 m Tiefe bleiben, so stünde ihm etwas weniger Zeit zur Verfügung. Da die letzte Dekostufe nur 3 m tief ist, wird der Druckverbrauch etwas geringer, außerdem verbraucht ein Taucher in Ruhe deutlich weniger Luft als in Bewegung [17].

Ein Taucher, der mit dem „Druckverbrauch“ umgehen kann wird nicht panisch reagieren. Er weiß ja, wie lange er mit seiner Restluft auskommen wird. **Mit 2 oder 3 bar/min kann er unter Wasser „im Kopf“ berechnen, welchen Druck er für die Dekompression braucht.**

Natürlich kann er den „Dekoverbrauch“ gleich vom DEKOPLANER ablesen

Genau genommen sinkt der Druckverbrauch mit steigender Seehöhe. Temperatur und Volumen der Lunge bleiben konstant, nur der Druck der eingeatmeten Luft nimmt ab. Dadurch nimmt natürlich auch die Menge der pro Atemzug eingeatmeten Luft ab. Es entsteht ein „Sicherheitspolster“ für den Bergseetaucher, welcher bei den folgenden Planungsbeispielen **nicht** berührt werden soll.

8.6. Der Druck für den blasenarmen Aufstieg

Der blasenarme Aufstieg in der Nullzeit nach **DAN** besteht aus

- dem tiefen Sicherheitsstopp **3 min** in maximal 15 m Tiefe,
- dem Teilaufstieg von 15 - 5 m mit 10 m/min in **1 min**,
- dem „Nullzeitstopp“ **3 min** in 5 m
- und dem Teilaufstieg aus 5 m zur Wasseroberfläche mit 5 m/min in **1 min**.

Der blasenarme Aufstieg ist somit „standardisiert“. Er dauert **8 min** und der Taucher verbraucht in 8 min **16 - 24 bar** je nach Flaschengröße. Soll auch noch für einen Notfall „100 % Reservedruck“ für **den gemeinsamen blasenarmen Aufstieg mit dem Tauchpartner** übrig bleiben, so müssen von den 200 bar einer vollen Tauchflasche insgesamt **50 bar** abgezogen werden. **Zur Abschätzung der Grundzeit bleiben 150 bar übrig.**

Je größer das Flaschenvolumen und je größer der Flaschendruck, desto länger dauert die Grundzeit. Bei erhöhtem Luftverbrauch wird sie kürzer. Fotografen kommen mit ihrer Luft länger aus, wenn sie flacher atmen. Die Vernachlässigung der Temperatur erzeugt bei den herkömmlichen Berechnungen des Luftbedarfs einen Fehler bis zu 10 %, welcher aber nicht weiter beachtet wird.

8.7. Planung mit Tabelle

„Konventionelle“ Berechnungen des „Luftvorrates“ oder „Luftbedarfs“ setzen voraus, dass ein Taucher schon im Voraus genau weiß, wie lange sein Tauchgang dauert.

In der Praxis möchte ein Taucher erst einmal abschätzen können, wie lange er mit der vorhandenen Luft auskommen wird und er will auch wissen, ob er am Ende des Tauchgangs dekomprimieren muss oder nicht.

Eine „weltweite“ Umfrage unter Tauchlehrern der CMAS hat 2004 ergeben, dass die Tauchgangsplanung in der Praxis NICHT durchgeführt wird, weil die Berechnungen viel zu mühsam sind und weil Rechenfehler von Anfängern nicht erkannt werden.

Weil die Verwechslungsgefahr groß ist, sollen Tiefen und Zeiten in Tabellen grundsätzlich weder auf- noch abgerundet werden. Man geht besser mit Zwischenwerten in die verschiedenen Tabellen.

Tauchplan:

Seehöhe	=	1000 m	(entspr. Tiefenzuschlag = 10 %)
Geplante Tiefe	=	28 m	
Flaschenvolumen:	=	15 l	(Dekoverbrauch 2 bar/min)
<u>Gemessener Druck</u>	=	200 bar	
Druck für Aufstieg, Stopps & Reserve	=	50 bar	(= Marke am Finimeter)
Verfügbarer Druck: 200 bar – 50 bar	=	150 bar	
Tiefer Sicherheitsstopp:	=	14 m, 3 min	(halbe Tiefe)

- **Abschätzung der Grundzeit:**

$$\text{Druckverbrauch} = \frac{\text{Umgebungsdruck} \times \text{AMV}}{\text{Flaschenvolumen}} = \frac{3,8 \text{ bar} \times 20 \text{ l/min}}{15 \text{ l}} \approx 5,1 \text{ bar/min}$$

In 28 m Tiefe verbraucht ein durchschnittlicher Taucher mit einer 15 l Flasche 5,1 bar/min.

$$\text{Grundzeit} = \frac{\text{verfügbare Druck}}{\text{Druckverbrauch}} = \frac{150 \text{ bar}}{5,1 \text{ bar/min}} \approx 30 \text{ min}$$

- **Die „üblichen“ Aufrundungen:**

Tiefenzuschlag für 1000 m	=	10 %
Rechentiefe = Tiefe + 10 %	=	28 m + 2,8 m ≈ 31 m
Nächst größere Tabellentiefe	=	33 m
Nächst längere Grundzeit	=	32 min
Dekompression für 33 m, 32 min	=	5 + 11 G

Tiefe + 10 %

33	19	4	D	2.4	
13'D	23	1	7	E	3.3
4.3	28	3	8	F	4.6
32	5	11	G	5.3	

Nächste Zeit

In der Praxis wird die Grundzeit jedoch kürzer als 30 min, weil ein Teil der Luft für die Deko reserviert werden muss. Mit der Grundzeit wird natürlich auch die Deko kürzer.

Mühsame Berechnungen sind nicht sehr sinnvoll, denn die Deko berechnet ja auch niemand. Wichtiger erscheint die Übereinstimmung mit ZH-L16 Computern.



1000 m Seehöhe erfordern 10 % Tiefenzuschlag. Die Rechentiefe = 28 m + 10 % ≈ 31m. Die abgelesene Dekozeit ist sehr konservativ weil wieder mit der nächst größeren Tiefe 33 m gerechnet wird. 26 min Grundzeit liegt zwischen 23 und 28 min und erfordert eine Dekozeit zwischen 8 und 12 min. Wir können mit etwa 10 min Dekozeit rechnen. Eine genauere Planung ist nur mit geeigneter Software möglich.

Addiere zur Tiefe 10% pro 1000 m Seehöhe, Aufstieg 2000 m, Wartezeit in Tauchplatzhöhe 30 min

Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	
Null	min	6m	3m	RG	m	Null	min	
15	95	4	G	0.4	36	16	4	
83°G	108	8	G	0.8	11°D	20	2	
18	64	4	F	0.7	6.7	25	4	
50°F	72	8	G	1.1	6.1	28	6	
21	46	4	F	1.3	39	14	4	
34°E	54	8	F	1.9	9°D	18	2	
4.7	60	12	G	2.2	6.5	22	4	
4.1	68	16	G	2.6	6.5	25	1	
24	34	4	E	1.4	42	12	4	
25°E	43	8	F	2.5	8°D	16	2	
4.5	48	1	11	G	3.0	6.9	19	4
4.5	53	2	14	G	3.4	6.9	22	1
27	27	4	E	1.7	45	11	1	
19°E	35	8	F	2.9	7°D	14	2	
4.9	40	2	10	G	3.6	7.3	17	1
4.9	43	3	13	G	4.0	7.3	20	2
30	22	4	E	1.9	48	9	3	
16°D	28	1	7	F	3.2	6°D	12	2
5.3	33	3	9	F	4.1	6°D	15	1
5.3	37	5	11	G	4.6	7.7	18	2
33	19	4	D	2.4	51	8	3	
19°D	23	1	7	E	3.3	5°D	11	2
5.7	28	3	8	F	4.6	5°D	13	1
5.7	32	5	11	G	5.3	8.1	16	2

Oberflächenintervall	min	„0“	Pass
		Std.	Std.
A	2	2	2
B	20	2	2
C	10	25	3
D	10	15	30
E	10	15	25
F	30	45	75
G	60	75	100

Tiefe	15m	18m	21m	24m	27m	30m	33m	36m	39m	42m	45m	48m	51m
41	29	20	16	14	11	9	7	6	5	4	3	2	1
33	25	17	14	11	9	7	6	5	4	3	2	1	0
28	22	15	12	10	8	7	6	5	4	3	2	1	0
24	20	13	11	9	7	6	5	4	3	2	1	0	0
21	18	12	10	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0
19	16	11	9	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0
17	14	10	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0
15	12	9	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0
13	10	8	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0
11	9	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0
9	8	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0
7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0
6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

15 Liter ZH-L16 B
Berechnet mit 2009-B.BAS

Dekoplanung: Der Taucher darf nicht in 28 m Tiefe warten, bis sein Computer 10 min Dekozeit anzeigt, weil die Dekozeit während des Aufstiegs zum tiefen Stopp weiter steigt. Er muss die geplante Tiefe rechtzeitig verlassen, damit er spätestens mit 70 bar den tiefen Stopp erreicht. Mit 70 bar beim tiefen Stopp hat er für die Dekompression 20 bar zur Verfügung.

Der NITROXPLANER kann weder DCS noch Luftmangel ausschließen, tauche mit Computer

NITROX	(Luft)	Flaschendruck in bar	bar
40 36 32 28	Tiefe	200 190	min
16	15	13	12
19	17	16	14
22	20	18	16
24	22	20	19
27	25	23	21
30	27	25	23
30	27	25	23
32	30	27	25
34	32	30	28
34	32	30	28
36	34	32	30
36	34	32	30
39	36	34	32
38	34	32	30
40	36	34	32
40	36	34	32
43	38	36	34
45	40	38	36
47	42	40	38
45	40	38	36
48	42	40	38
51	45	43	41
51	45	43	41
25	29	34	40
28	32	37	44
30	34	40	47

Bei 10 min Deko muss der tiefe Stopp mit 70 bar erreicht werden

Geplante Dekozeit

Dekoverbrauch = 2 bar/min
20 bar / 2 bar/min = 10 min
20 bar reicht für 10 min Deko

15 Liter

Meter Grundzeiten für Meeressniveau, 20 Liter/min, 50 bar Reserve

MOD ▶ PO2 ▶ CNS 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 %

8.9. Anwendung unter Wasser

Der NITROXPLANER kann weder DCS noch Luftmangel ausschließen, tauche mit Computer

NITROX		(Luft)	Flaschendruck in bar										bar								
40	36	32	28	Tiefe	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	bar	
Tiefe in Meter					5	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	2.0
16	15	13	12	▶ 10	56	53	49	45	41	37	34	31	27	24	20	17	14	11	8	4	2.7
19	17	16	14	▶ 12	51	48	44	41	38	34	31	28	25	22	19	16	13	10	7	3	2.9
22	20	18	16	▶ 14	47	44	41	38	34	31	28	25	22	19	16	13	9	6	3	3.2	
24	22	20	19	▶ 16	43	40	38	35	32	29	26	23	20	17	14	11	9	6	3	3.5	
27	25	23	21	▶ 18	40	38	35	32	29	27	24	21	19	16	13	11	8	5	3	3.7	
30	27	25	23	▶ 20	38	35	33	30	28	25	23	20	18	15	13	10	8	5	3	4.0	
32	30	27	25	▶ 22	35	33	30	28	26	23	21	19	16	14	12	9	7	5	2	4.2	
34	32	30	27	▶ 24	33	31	29	26	24	22	20	18	15	13	11	8	7	4	2	4.5	
36	34	32	30	▶ 26	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	10	9	7	4	2	4.8	
38	36	34	32	▶ 28	29	27	25	22	20	18	16	14	12	11	10	8	7	5	3	5.1	
40	38	36	34	▶ 30	26	24	22	20	18	16	14	12	11	10	8	7	5	3	5.4		
43	40	38	36	▶ 32	24	23	21	19	17	15	13	11	10	8	7	5	3	5.7			
45	43	40	38	▶ 34	23	22	20	18	16	14	13	11	10	8	7	5	3	6.0			
47	45	43	40	▶ 36	22	21	20	18	16	14	13	11	10	8	7	5	3	6.3			
50	47	45	43	▶ 38	21	20	19	17	16	14	13	11	10	8	7	5	3	6.6			
53	50	47	45	▶ 40	20	19	18	16	15	13	11	10	8	7	5	3	6.9				
56	53	50	47	▶ 42	19	18	17	16	14	13	11	10	8	7	5	3	7.2				
59	56	53	50	▶ 44	18	17	16	15	14	12	10	9	7	6	5	4	7.5				
62	59	56	53	▶ 46	17	16	15	14	13	11	10	9	7	6	5	4	7.8				
65	62	59	56	▶ 48	16	15	14	13	12	10	9	7	6	5	4	3	8.1				
68	65	62	59	▶ 50	15	14	13	12	11	10	9	7	6	5	4	3	8.4				
71	68	65	62	▶ 52	14	13	12	11	10	9	7	6	5	4	3	2	8.7				
74	71	68	65	▶ 54	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	9.0				
77	74	71	68	▶ 56	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	9.3				
80	77	74	71	▶ 58	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	9.6				
83	80	77	74	▶ 60	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	9.9				
86	83	80	77	▶ 62	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	1	10.2				
89	86	83	80	▶ 64	8	7	6	5	4	3	2	1	1	1	1	1	10.5				
92	89	86	83	▶ 66	7	6	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	10.8				
95	92	89	86	▶ 68	6	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	11.1				
98	95	92	89	▶ 70	5	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	11.4				
101	98	95	92	▶ 72	4	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	11.7				
104	101	98	95	▶ 74	3	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.0				
107	104	101	98	▶ 76	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.3				
110	107	104	101	▶ 78	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.6				
113	110	107	104	▶ 80	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	12.9				
116	113	110	107	▶ 82	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13.2				
119	116	113	110	▶ 84	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13.5				
122	119	116	113	▶ 86	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13.8				
125	122	119	116	▶ 88	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14.1				
128	125	122	119	▶ 90	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14.4				
131	128	125	122	▶ 92	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	14.7				
134	131	128	125	▶ 94	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.0				
137	134	131	128	▶ 96	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.3				
140	137	134	131	▶ 98	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.6				
143	140	137	134	▶ 100	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	15.9				
146	143	140	137	▶ 102	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16.2				
149	146	143	140	▶ 104	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16.5				
152	149	146	143	▶ 106	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	16.8				
155	152	149	146	▶ 108	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17.1				
158	155	152	149	▶ 110	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17.4				
161	158	155	152	▶ 112	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	17.7				
164	161	158	155	▶ 114	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.0				
167	164	161	158	▶ 116	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.3				
170	167	164	161	▶ 118	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.6				
173	170	167	164	▶ 120	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	18.9				
176	173	170	167	▶ 122	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19.2				
179	176	173	170	▶ 124	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19.5				
182	179	176	173	▶ 126	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	19.8				
185	182	179	176	▶ 128	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20.1				
188	185	182	179	▶ 130	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20.4				
191	188	185	182	▶ 132	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	20.7				
194	191	188	185	▶ 134	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21.0				
197	194	191	188	▶ 136	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21.3				
200	197	194	191	▶ 138	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21.6				
203	200	197	194	▶ 140	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	21.9				
206	203	200	197	▶ 142	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22.2				
209	206	203	200	▶ 144	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22.5				
212	209	206	203	▶ 146	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	22.8				
215	212	209	206	▶ 148	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23.1				
218	215	212	209	▶ 150	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23.4				
221	218	215	212	▶ 152	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	23.7				
224	221	218	215	▶ 154	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24.0				
227	224	221	218	▶ 156	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24.3				
230	227	224	221	▶ 158	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24.6				
233	230	227	224	▶ 160	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	24.9				
236	233	230	227	▶ 162	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	25.2				
239	236	233	230																		



9. Fragen und Antworten

Die Fragen überschneiden sich mit B**, damit der Überblick abgerundet werden kann.

1. Wie wirkt sich der Unterschied in der Tiefenmessung mit Computer zwischen Meer- und Süßwasser auf die Dekompression aus und warum?

Überhaupt nicht. Die Dekozeiten hängen nur vom gemessenen Druckunterschied ab. Im Süßwasser nimmt der Druck in 10 m Tiefe nur um 0.981 bar zu, weil die Dichte geringer ist.

2. Wie tariert sich ein Taucher im Meer aus?

Er muss seine „spezifische Masse“ (= Dichte) an das Meerwasser angleichen, indem er seine Gesamtmasse mit Blei um 2–3 kg vergrößert.

3. Was passiert, wenn die Temperatur des Wassers 0 °C übersteigt?

Es ist geschmolzen = flüssig. Bei 4 °C ist die Dichte am größten. Es sinkt auf den Grund des kalten Sees und das Wasser wird durchmischt. Im Sommer schwimmt das warme Wasser auf dem kalten (Sprungschicht).

4. Wie sieht man einen Gegenstand unter Wasser?

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes ist im Wasser $\frac{1}{4}$ langsamer als in der Luft, deshalb sehen wir einen Gegenstand $\frac{1}{4}$ näher an der Maskenscheibe. Durch die Perspektive erscheint er vergrößert. Je geringer der Abstand zwischen Auge und Scheibe, desto größer erscheint der Gegenstand. Zum Maskenrand hin erscheint er verzerrt. Ein Gegenstand ist $\frac{1}{3}$ weiter weg, als wir ihn sehen.

5. Wie hört man unter Wasser, aus welcher Richtung ein Boot kommt?

Durch den geringen Dichteunterschied zwischen Kopf und Wasser wandern die Schallwellen ohne gedämpft und verzögert zu werden direkt durch die Kopfoberfläche zu den Innenohren. Es ist weder die Richtung noch die Entfernung einer Schallquelle erkennbar. Wenn das Motorgeräusch lauter wird, nähert sich das Boot.

6. Wodurch wird ein Taucher bei gleich bleibender Wassertemperatur am stärksten abgekühlt?

Der menschliche Körper erwärmt das Wasser, es steigt auf und kaltes fließt nach (Konvektion). Strömung und Bewegung verstärken die Wärmeableitung.

7. Welche Sicherheitsgrenzen sollen die Partialdrücke der Komponenten eines Atemgases nicht überschreiten?

Stickstoff: etwa 4 bar entsprechend einer Tauchtiefe von 40 m mit Luft.

Sauerstoff: 1,6 bar entsprechend einer Dekompressionstiefe von etwa 6 m mit Sauerstoff.

8. Wie lange könnte ein Taucher mit 30 bar in einer 10-Liter-Flasche im Notfall in 5 m dekomprimieren? Wie groß ist der „Druckverbrauch“ pro min?

Der Druckverbrauch beträgt für die Dekompression mit einer 10 Liter Flasche ungefähr 3 bar/min.

Mit 30 bar kann er somit mindestens $30 \text{ bar} / 3 \text{ bar pro min} = 10 \text{ min}$ dekomprimieren.

9. Wie lange könnte ein Taucher mit 30 bar in einer 15 l Flasche im Notfall in 5 m dekomprimieren? Wie groß ist der „Druckverbrauch“ pro min?

Der Druckverbrauch beträgt für die Dekompression mit einer 15 Liter Flasche ungefähr 2 bar/min.

Mit 30 bar kann er somit bis zu $30 \text{ bar} / 2 \text{ bar pro min} = 15 \text{ min}$ dekomprimieren.

In der Nullzeit genügt es, wenn der Taucher mit 50 bar den tiefen Stopp erreicht.

10. Muss man den Luftverbrauch für das Jacket berücksichtigen?

Um ein 20 Liter Jacket 40 m Tiefe voll aufzublasen braucht man 100 Liter entspannte Luft, mit welcher man laut Dekoplaner mit einer 12 Liter Flasche in 40 m Tiefe gerade 1 min lang atmen kann. ($8,3 \text{ bar/min} \times 12 \text{ Liter} \approx 100 \text{ bar Liter pro Minute}$). Eine Berücksichtigung hat daher wenig Nutzen.



11. Was bewirkt der Wasserdampf in der Lunge?

Die Einatemluft wird mit Wasserdampf gesättigt. Der Druck des gesättigten Wasserdampfes ist temperaturabhängig, aber unabhängig vom Umgebungsdruck. Er vermindert die Partialdrücke von Sauerstoff und Inertgasen. Weil sich ein geringer Inertgasanteil einstellt, werden kürzere Dekozeiten berechnet.

12. Was versteht man unter Sättigung?

Sättigung ist der Gleichgewichtszustand, wenn aufgrund der „Sättigungskonzentration“ pro Zeiteinheit gleich viele Gasteilchen in ein Gewebe diffundieren, wie aufgrund von Wärmeschwingungen der Moleküle wieder austreten. Der berechnete Gewebedruck (Lösungsdruck) ist gleich groß wie der Umgebungsdruck.

13. Was ist ein „schnelles Gewebe“?

Stark durchblutete Gewebe wie Blut, ZNS oder Nerven haben kurze Halbwertszeiten von 4 – 27 min. Sie werden als „schnell“ bezeichnet, weil sie schneller als andere aufgeladen werden. Sie erreichen daher höhere Inertgasdrücke und werden als erste in größeren Dekotiefen dekomprimiert. Die tiefen Dekopausen sollten unbedingt eingehalten werden, weil Schäden an schnellen Geweben Lähmungen erzeugen können.

14. Wie weit muss ein Gewebe dekomprimiert werden?

Bis es den Druck der nächsthöheren Dekostufe oder den Oberflächenluftdruck toleriert. Es müssen jedoch auch benachbarte Gewebe untersucht werden, weil sich die verantwortlichen Leitgewebe abwechseln.

15. Was bewirkt die Halbwertszeit $T = 12,5$ min?

Der Unterschied zwischen dem Druck der Atemluft und dem Gewebedruck wird in 12,5 min halbiert

16. Was verdanken wir Haldane?

Er unterteilte die menschlichen Gewebe in Kompartimente und berechnete die Gasdiffusion mit Partialdrücken. Wir verdanken ihm die ersten Tauchtabellen.

17. Was verdanken wir Bühlmann?

Er beschrieb die Druckabhängigkeit der einzelnen Gewebe unabhängig vom Meeresniveau und ermöglichte dadurch Bergseetabellen. Wir verdanken ihm das erste Rechenmodell für Bergseecomputer.

18. Was ist ein Rechenmodell?

Es besteht aus mathematischen Gleichungen, welche die Gesetzmäßigkeiten der Gasdiffusion und die druckabhängigen Eigenschaften der Modellgewebe beschreiben. Aufgrund des Rechenmodells kann ein Computerprogramm zur Berechnung der Dekompression geschrieben werden. Es gibt verschiedene Rechenmodelle, welche zusätzlich zur Gasdiffusion versuchen, die Bläschenbildung nachzuvollziehen.

19. Was ist der Geltungsbereich einer Tabelle?

Der Geltungsbereich von Bühlmannstabellen gibt an, in welchem Höhenbereich Wohnort und Tauchplatz liegen müssen und wie schnell der Aufstieg erfolgen darf. Leider gibt es bei den übrigen Tabellen keine genauen Angaben. Ein Vergleich mit anderen Tabellen ist daher nur schwer möglich.

20. Was versteht man unter Grundzeit?

Wenn man die Grundzeit als „Ladezeit der Gewebe“ definiert, so dauert die Grundzeit vom Abtauchen bis zum Erreichen des tiefen Sicherheitsstopps in der halben Tiefe maximal 15 m.

21. Was passiert während der Grundzeit?

Die einzelnen Gewebe werden unterschiedlich weit mit Inertgasen aufgeladen. Die schnellsten Gewebe erreichen die höchsten „rechnerischen“ Drücke.

22. Was passiert während der Nullzeit?

Am Ende der Nullzeit, hat das Leitgewebe für die jeweilige Tauchtiefe den höchsten an der Oberfläche zulässigen Gewebedruck erreicht.



23. Was passiert während des Aufstieges?

Sobald der Umgebungsdruck geringer ist als der Gewebedruck beginnt die „Entsättigung“ eines Gewebes. Schnelle Gewebe entladen sich schon während des Aufstieges, langsame werden noch weiter aufgeladen.

24. Wer bestimmt die Aufstiegeschwindigkeit?

Sobald die „Aufsättigung“ eines Gewebes zu Ende ist und die „Entsättigung“ begonnen hat, muss die Aufstiegeschwindigkeit begrenzt werden. Da schnelle Gewebe als Erste mit der Entladung beginnen, bestimmen sie die anfängliche Aufstiegeschwindigkeit in größerer Tiefe.

25. Was versteht man unter dem „tolerierten Umgebungsdruck“?

Es ist der geringste Umgebungsdruck (Druck der Atemluft), den ein Gewebe noch verträgt (toleriert), wenn es mit Inertgas aufgeladen wurde. Erst wenn dieser Druck unterschritten wird, weil der Taucher zu weit aufgestiegen ist oder wenn der Luftdruck am Bergsee zu gering ist, werden Blasen gebildet.

26. Welche Phase der Dekompression ist die „empfindlichste“?

Die Annäherung an den tolerierten Umgebungsdruck. Mit Computer kann die Dekompression 1-2 m tiefer begonnen werden. Der Aufstieg aus 3 oder 5 m zur Wasseroberfläche muss bewusst langsam erfolgen.

27. Was passiert in den Dekopausen?

Die Gewebe werden so weit entladen, bis alle den jeweiligen Oberflächendruck (Luftdruck) tolerieren.

28. Was passiert, wenn die Aufstiegeschwindigkeit zu groß ist?

Die Gewebe können sich nicht rechtzeitig entsättigen und bilden Blasen. Durch einen tiefen Sicherheitsstopp erreicht man, dass sich vorhandene Blasen wieder zurückbilden können.

29. Was passiert, wenn die Aufstiegeschwindigkeit zu langsam ist?

Die einzelnen Gewebe werden weiter aufgesättigt. Die Dekozeiten in geringen Tiefen müssen unter Umständen verlängert werden. Die Aufstiegszeit musste bei „alten“ Tabellen zur „Grundzeit“ addiert werden. Durch die neue Definition der „Grundzeit“ ist es nicht mehr nötig eine Mindestgeschwindigkeit einzuhalten. Der Taucher muss nur mehr darauf achten, nicht zu schnell zu werden.

30. Was passiert während der Oberflächenpause?

Die Verminderung der Wiederholungsgruppe deutet an, dass sich die Gewebedrucke unterschiedlich schnell an den Oberflächendruck anpassen. Langsame Gewebe können sich während der Oberflächenpause nicht ausreichend entladen, so dass ihr Druck von Tauchgang zu Tauchgang zunimmt. Es können daher mit Bühlmantabellen höchstens 3 Tauchgänge pro Tag durchgeführt werden. Bevor man mehrere Tauchgänge pro Tag plant, muss man genau wissen, ob die verwendete Tabelle überhaupt dazu geeignet ist.

31. Was ist eine Wiederholungsgruppe?

Sie ist bei Bühlmantabellen ein Gewebekode, der das langsamste Gewebe bezeichnet, welches nach einem Tauchgang dekomprimiert werden muss. Andere Tabellen haben andere Wiederholungssysteme. Wiederholungsgruppen sind daher nicht vergleichbar.

32. Wozu dient der Gewebekode?

Der Gewebekode dient als Anhaltspunkt für ein System von Zeitzuschlägen.

33. Wozu dienen die Zeitzuschläge?

Der Gewebeüberdruck am Ende eines Tauchgangs oder am Ende der Oberflächenpause beeinflusst nachfolgende Tauchgänge. Je nach Tiefe des Folgetauchgangs sind die Auswirkungen unterschiedlich. Mittlere und langsame Gewebe sind während der Oberflächenpause nicht ganz entsättigt worden, erreichen beim Folgetauchgang höhere Drücke und müssen daher länger dekomprimiert werden. Die Dekozeiten einer Tabelle werden verlängert, wenn man die Grundzeit durch einen Zeitzuschlag verlängert.



34. Warum sind die Zeitzuschläge für große Tiefen kürzer?

Schnelle Gewebe haben nach der Oberflächenpause den geringsten „Restdruck“. Sie werden bei einem nachfolgenden Tauchgang auf die höchsten Drücke aufgeladen, und bestimmen bei tiefen Tauchgängen die Dekompression. Sie werden als erste in größeren Dekotiefen wieder entsättigt und sind auch wieder schnell entladen. Die notwendigen Zeitzuschläge werden somit kurz. Zeitzuschläge können auch als Stickstoff-Restzeit definiert werden. Je tiefer der Tauchgang, desto kürzer ist die Ladezeit für die gedachte Stickstoffmenge.

35. Warum sind die Zeitzuschläge für geringe Tiefen länger?

Während schnelle Gewebe oft noch in der Nullzeit bleiben, erreichen langsame Gewebe durch den „Restdruck“ aus dem vorausgegangenen Tauchgang erhöhte Drücke. Da die absoluten Werte der Drücke im Verhältnis zum Umgebungsdruck immer noch gering sind, können sie nur in geringer Tiefe dekomprimiert werden. Je geringer der zulässige Druckunterschied, desto länger dauert die Entladung. Zeitzuschläge können auch als Stickstoff-Restzeit definiert werden. Je geringer die Tiefe, umso länger dauert es, bis die gedachte Stickstoffmenge aufgenommen wird.

36. Gibt es Grenzen für die Anwendung der Wiederholungsgruppe?

Für den ersten Wiederholungstauchgang sind die Zuschläge der Bühlmanntabellen länger als erforderlich. Da langsamere Gewebe aber bei jedem Folgetauchgang weiter aufgeladen werden, müsste sich das Leitgewebe bei jedem nachfolgenden Tauchgang verändern. Die Zeitzuschläge der Tabelle sind nicht mehr in der Lage den steigenden Dekompressionsbedarf langsamer Gewebe abzudecken. Mit Bühlmanntabellen können somit höchstens 2 Wiederholungstauchgänge (3 Tauchgänge pro Tag) geplant werden.

37. Wozu dient ein Sicherheitsstopp?

Er dient nicht zur Verlängerung der Dekozeit, sondern zum Abbau von Mikrobläschen, weil die Annäherung an den tolerierten Umgebungsdruck verlangsamt wird. Ein Sicherheitsstopp in 15 m oder halber Tiefe hat praktisch keinen Einfluss auf die Dekozeit. Der Aufenthalt in 15 m gibt ausreichend Zeit zur Bestimmung der Dekoreserve, zur Bestimmung der Dekozeiten und zum Vergleich der Computeranzeigen.

38. Was sind Mikrobläschen?

Es sind kleinste Gasbläschen im Blut, kleiner als rote Blutkörperchen. Sie verändern während eines Tauchganges und in der folgenden Oberflächenpause ihre Größe. Durch geeignetes Tauchverhalten können sie klein gehalten werden, damit sie nicht zu Symptomen der DCS führen.

39. Was versteht man unter „Bildung“ von Mikrobläschen?

Mikrobläschen haben sich „gebildet“ wenn ihre Größe so weit angewachsen ist, dass man ihre Bewegung im Blutstrom mit einem Doppler-Detektor messen kann.

40. Welche Gewebe erzeugen Mikroblasen?

Die schnellen bis mittleren Leitgewebe entsprechend dem Gewebekode mit der stärksten Belastung.

41. Durch welche Maßnahme wird die Bildung von Mikrobläschen am sichersten verhindert?

Durch Einhaltung eines tiefen und eines flachen Sicherheitsstopps.

42. Welche Einflussgrößen verändern die Dekompression am meisten?

Die Bergseehöhe ohne vorherige Adaption (schneller Aufstieg zum Bergsee) verlängert die Dekozeit
Die Verwendung von Nitrox verkürzt die Dekozeit

43. Was passiert, wenn der Tauchplatz höher liegt als der Wohnort?

Während des Aufstieges zum Tauchplatz beginnt die Anpassung der Gewebedrücke an den verminderten Luftdruck. Langsame Gewebe können sich nicht völlig an den verminderten Luftdruck anpassen und behalten einen Druckrest. Der erhöhte Anfangsdruck erfordert längere Dekozeiten. Darüber hinaus können die Gewebe im Bergsee weniger Inertgas in Lösung halten.



44. Was passiert, wenn ich am Vormittag im Baggersee (im Tal) tauchen möchte und nachmittags im Achensee (am Berg)?

Es gibt keine Tabelle, die eine Höhenänderung zwischen zwei Tauchgängen innerhalb 12 Stunden berücksichtigt. Bevor man mit einem Bergseecomputer einen derartigen Tauchgang macht, **muss man genau wissen** ob er die Berechnung durchführen kann, **ob er überhaupt dazu geeignet ist!** Im Zweifelsfall ist von derartigen Tauchgängen abzuraten.

45. Welche Tabelle verwendet man in 930 m Höhe?

Die Bühlmann Bergseetabelle berücksichtigt den Aufstieg von 701 m zur Tauchplatzhöhe. Liegt der Wohnort tiefer, so muss eine lange Wartezeit eingehalten werden, oder man muss zur Planung die Methode des Tiefenzuschlages verwenden. **DAN** warnt vor der Mischung unterschiedlicher Tabellensysteme in verschiedenen Seehöhen.

46. Wie erfolgt die Dekompression im Bergsee?

Leider verweigern Computerhersteller jede Auskunft über die Behandlung des Bergsees. Wenn der Computer den Aufstieg zum Bergsee mitrechnen kann, darf sofort nach dem Eintreffen am Bergsee getaucht werden. Die Dekozeiten werden durch den Aufstieg zum Bergsee verlängert. Manche Computerhersteller schreiben eine Anpassungszeit in Höhe des Tauchplatzes vor.

Die Bühlmantabelle berücksichtigt einen einstündigen Aufstieg von 701–2500 m. Wohnt der Taucher tiefer, so muss er eine lange Wartezeit einhalten oder er taucht außerhalb der Tabelle. Es gibt keine Anweisung, wie sich der Taucher verhalten muss, wenn er unter 700 m wohnt und über 700 m taucht.

Wenn die üblichen 12 Stunden Wartezeit nicht eingehalten werden können oder wenn keine passende Bergseetabelle vorhanden ist, wird zur Planung die Methode des Tiefenzuschlages angewendet. Dazu eignet sich am besten eine Bühlmantabelle für Meeresniveau (ZH-L16 NITROXPLANER). Die DECO2000 hat zwar die längsten Dekozeiten, es gibt aber keine Anweisung, wie sich der Taucher verhalten muss, wenn er unter 700 m wohnt und über 700 m taucht. Über 1500 m gibt es nur Bühlmantabellen.

47. Was bewirkt ein langsames Gewebe am Bergsee?

Der schnelle Aufstieg von langsamen Geweben in große Seehöhen verursacht die längsten Dekozeiten. Langsame Gewebe tolerieren den geringsten Gewebe(über)druck. Die langsamen Gewebe sind auch verantwortlich für die Wartezeit vor Passfahrten und Flügen.

48. Wie und warum verändert sich die Nullzeit am Bergsee?

Je geringer der Luftdruck und je langsamer das Gewebe, desto weniger Inertgas kann es in Lösung halten. Es darf daher bei vermindertem Luftdruck weniger weit (= weniger lang) aufgeladen werden. Die Nullzeiten der Gewebe (Ladezeiten) werden somit im Bergsee kürzer.

49. Wie verändert sich das Flugverbot am Bergsee?

Je höher der Bergsee, desto geringer ist der Unterschied zwischen Oberflächen- und Kabinendruck eines Flugzeugs, desto kürzer wird das Flugverbot. Das längste Flugverbot ergibt sich nach einem Tauchgang im Meer. Das Flugverbot von Bühlmantabellen wurde für Meeresniveau berechnet. Es gilt für Passfahrten und Flüge ohne Druckkabine bis 4200 m über Grund.

Neuere Messungen haben ergeben, dass Wiederholungstauchgänge meist große Blasenmengen erzeugen, sodass das Flugverbot der Bühlmantabelle verlängert werden muss. Der Rechts- Links- Shunt verzögert den Blasenabbau, dazu kommen der Bewegungsmangel und die trockene Luft in Verkehrsflugzeugen. **DAN** empfiehlt daher ein wesentlich längeres Flugverbot. Nach Deko- und Wiederholungstauchgängen beträgt das Flugverbot 24 Stunden.

50. Berücksichtigt die 0–700 m Tabelle den Aufstieg von 0 auf 700 m?

Nein. Die Bühlmantabelle ist für Gewebeanpassung in 700 m berechnet. Erfolgt der Aufstieg von 0 auf 700 m, so sind die Dekozeiten zu kurz und es muss die Zuschlagsmethode angewendet werden. Der Unterschied für „Freizeitstaucher“ kann 2 min und mehr betragen. Die DECO2000 wurde offensichtlich für einen schnellen Aufstieg von 0-1000 m berechnet.



10. Angabe der verwendeten Quellen

[1]	Hammer, Morass, Raab: Lehrbuch der Physik, Oldenbourg Verlag Wien Schulbuch-Nr: 0492
[2]	Beat Müller: „Berechnungsgrundlagen der Bühlmantabelle 86“, NEREUS 1/1987. Seiten 4 - 6
[3]	Klaus Meier-Ewert: „Grundlagen der Dekompression und Berechnung von Dekompressionsprofilen mit Hilfe der ZH-L12-Koeffizienten“ DER TAUCHLEHRER 4/1986, Seiten 14 – 24
[4]	A. Marroni: „Project Safe Dive, Research Report 2“ ALERT DIVER 4/2000, Seiten 21 – 23
[5]	UWATEC: „Das Rechenmodell der Aladin Tauchcomputer“ http://www.uwatec.com
[6]	P.B. Bennett: „A Half the Depth of Dive Safety Stop?“ ALERT DIVER 1/2001, Seite 4
[7]	Beat Müller: „Passfahrten und Fliegen ohne Druckkabine“ NEREUS (1/1988) Seiten 12 – 14
[8]	H. Zauchner, H. Renner, Tauchen am Bergsee, Apple i-book, 2013, ISBN 978-3-200-02982-8 https://itunes.apple.com/at/book/tauchen-am-bergsee/id722386261?mt=11
[9]	H. Zauchner: „Tauchen mit Nitrox kann auch einfach sein“ TSVÖ – Nitrox-Tauchlehrerkurs 2001
[10]	Martin Rhomberg, H. Zauchner: „Empfehlungen für Dekompression & Aufstieg“, Eine Empfehlung der Arbeitsgruppe des TSVÖ Mai 2001
[11]	E. Maiken: „Bubble Decompression Strategies“ DEEP TECH, Issue 6, 1995
[12]	A. Marroni: Introduction of extra deep stops in the ascent profile without changing the original ascent rates. „DSL“ Special Project 01/2000. Diving and Hyperbaric Medicine, Proceedings of the XXVI Annual Scientific Meeting of the European Underwater and Baromedical Society, R. Cali Corleo Ed. Malta 14-17 September, 2000: 1-8
[13]	A. Marroni: Instant speed of ascent vs. delta-p in the leading tissue and post-dive doppler bubble production. „DSL“ Special Project 02/2001. EUBS 2001 Proceedings of the 27 th Annual Meet- ing. U. van Laak Ed. Hamburg 12 –16 September, 2001: 74 - 78
[14]	P.B. Bennett: What ascent profile for the prevention of decompression sickness? Recent Research on the Hill/Haldane ascent controversy. Paper presented at the 28 th Annual Meeting of the EUBS, Bruges, 5-8 September 2002
[15]	Bruce R. Wienke: „Abyss/Reduced Gradient Bubble Model: Algorithm, Bases, Reductions, and Coupling to ZHL critical Parameters“ Southwest Enterprises Inc. P.O. Box 508 Santa Fe, N.M. 87504
[16]	Bühlmann, Völlm, Nussberger: “Tauchmedizin” ISBN 3-540-42979-4, 2002
[17]	U.S. Navy Diving Manual, Revision 6, April 2008
[18]	R.L. Bell, R.E. Borgward, The theory of high-altitude corrections to the US Navy Standard Decompression Tables. Undersea Biomedical Research Vol. 3, No. 3, September 1976
[19]	S.M. Egi, A.O. Brubakk: Diving at altitude: a review of decompression strategies, Undersea & Hyperbaric Medicine, Vol. 22, No 3, 1995



11. Anhang

Die folgenden ZH-L16 B Planungstabellen 2014 wurden für Meeresniveau, gebräuchliche Flaschengrößen und einen Durchschnittsverbrauch von 20 Liter/min berechnet. Die originale Bühlmann-Wiederholungstabelle gilt für Luft(tiefen) und ist unabhängig von der Seehöhe.

Der NITROXPLANER kann weder DCS noch Luftmangel ausschließen, tauche mit Computer

NITROX				(Luft)																	Flaschendruck in bar	
40	36	32	28	Tiefe	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	bar	min	
Tiefe in Meter				5	50	47	43	40	37	33	30	27	23	20	17	13	10	7	3	3.0		
16	15	13	12	▶ 10	38	35	33	30	28	25	23	20	18	15	13	10	8	5	3	4.0		
19	17	16	14	▶ 12	34	32	30	27	26	23	20	18	16	14	11	9	7	5	2	4.4		
22	20	18	16	▶ 14	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	10	8	6	4	2	4.8		
24	22	20	19	▶ 16	29	27	25	23	21	19	17	15	13	12	10	8	6	4	2	5.2		
27	25	23	21	▶ 18	27	25	23	21	20	18	16	14	13	11	9	7	5	4	2	5.6		
30	27	25	23	▶ 20	25	23	22	20	18	17	15	13	12	10	8	7	5	3	2	6.0		
30	27	25	23	▶ 22	23	22	20	19	17	16	14	13	11	9	8	6	5	3		6.4		
32	30	27		▶ 24	22	21	19	18	16	15	13	12	10	9	7	6	4	3		6.8		
34	32	30		▶ 26	21	19	18	17	15	14	13	11	10	8	7	6	4	3		7.2		
34	32			▶ 28	20	18	17	16	14	13	12	11	9	8	7	5	4	3		7.6		
36	34			▶ 30	19	18	16	15	14	13	11	10	9	8	6	5	4	3		8.0		
36	34			▶ 32	18	17	15	14	13	12	11	10	8	7	6	5	4			8.4		
38				▶ 34	17	16	15	14	13	11	10	9	8	7	6	5	3			8.8		
40				▶ 36	16	15	15	13	12	11	10	9	8	7	6	5	3			9.2		
43				▶ 38	16	15	14	13	11	10	9	8	7	6	5	4	3			9.6		
45				▶ 40	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3			10.0		
47				▶ 42	14	13	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4				10.4		
▼	▼	▼	▼	Meter	Grundzeiten für Meeresniveau, 20 Liter/min, 50 bar Reserve																	
25	29	34	40	1.4 bar	▶ 15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	min							
28	32	37	44	1.5 bar	▶ 12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	min							
30	34	40	47	1.6 bar	▶ 5	9	14	18	23	27	32	36	41	45	min							
MOD	▶			PO2	▶	CNS	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	%					



Addiere zur Tiefe 10% pro 1000 m Seehöhe, Aufstieg 2000 m, Wartezeit in Tauchplatzhöhe 30 min

Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Oberflächenintervall „0“				Pass			
Null	min	6m	3m	RG	Null	min	9m	6m	3m	RG	min	Std.	Std.		
15	95	4	G	0.4	30	22		4	E	1.9	A	2	2		
83°G	108	8	G	0.8	16°D	28	1	7	F	3.2	B	20	2		
5.0					8.0	33	3	9	F	4.1	C	25	3		
						37	5	11	G	4.6	D	30	3		
						19		4	D	2.4	E	30	3		
18	64	4	F	0.7	33	23	1	7	E	3.3	F	45	4		
50°F	72	8	G	1.1	13°D	28	3	8	F	4.6	G	75	8		
5.6					8.6	32	5	11	G	5.3		100	12		
						16		4	D	2.6		130	5		
21	54	8	F	1.9	36	20	2	6	E	3.7	10 Liter				
34°E	60	12	G	2.2	11°D	25	4	8	F	5.1	15 m	41	29	20	16
6.2	68	16	G	2.6	9.2	28	6	10	F	5.8	18 m	33	25	17	14
						14		4	D	2.8	21 m	28	22	15	12
24	34	4	E	1.4	39	18	2	6	E	4.3	24 m	24	20	13	11
25°E	43	8	F	2.5	9°D	22	4	8	F	5.4	27 m	21	18	12	10
6.8	48	1	G	3.0	9.8	25	1	6	F	6.3	30 m	19	16	11	9
	53	2	G	3.4		12		4	D	2.9	33 m	17	14	10	8
						16		2	E	4.7	36 m	15	12	9	7
27	27	4	E	1.7	42	12		4	D	2.9	39 m	14	11	8	7
19°E	35	8	F	2.9	8°D	16	2	6	E	4.7	42 m	13	10	7	6
7.4	40	2	G	3.6	10.4	19	4	8	F	5.7	Tiefe		Stickstoff-Restzeit		
	43	3	G	4.0		22	1	6	F	6.6	Berechnet mit 2009-B.BAS		2014		

Meeresniveau, Tiefe + 3% + 1 m, Nullzeit RG, Druckverbrauch in bar/min, Grundzeit vom Verlassen der Oberfläche bis der tiefe Sicherheitsstopp erreicht ist, flacher Sicherheitsstopp in 5 m Tiefe



Der NITROXPLANER kann weder DCS noch Luftmangel ausschließen, tauche mit Computer

NITROX				(Luft)	Flaschendruck in bar												bar					
40	36	32	28	Tiefe	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	min		
Tiefe in Meter				5	60	56	52	48	44	40	36	32	28	24	20	16	12	8	4		2.5	
16	15	13	12	▶ 10	45	42	39	36	33	30	27	24	21	18	15	12	9	6	3	3.3		
19	17	16	14	▶ 12	41	38	35	33	30	27	25	22	19	16	14	11	8	5	3	3.7		
22	20	18	16	▶ 14	38	35	33	30	28	25	23	20	18	15	13	10	8	5	3	4.0		
24	22	20	19	▶ 16	35	32	30	28	25	23	21	18	16	14	12	9	7	5	2	4.3		
27	25	23	21	▶ 18	32	30	28	26	24	21	19	17	15	13	11	9	6	4	2	4.7		
30	27	25	23	▶ 20	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	5.0		
	30	27	25	▶ 22	28	26	24	23	21	19	17	15	13	11	9	8	6	4	2	5.3		
	32	30	27	▶ 24	26	25	23	21	19	18	16	14	12	11	9	7	5	4	2	5.7		
	34	32	30	▶ 26	25	23	22	20	18	17	15	13	12	10	8	7	5	3	2	6.0		
	34	32	30	▶ 28	24	22	21	19	17	16	14	13	11	9	8	6	5	3		6.3		
	36	34	34	▶ 30	23	21	20	18	17	15	14	12	11	9	8	6	5	3		6.7		
	36	34	34	▶ 32	21	20	19	17	16	14	13	11	10	9	7	6	4	3		7.0		
	38	36	36	▶ 34	20	19	18	16	15	14	12	11	10	8	7	5	4	3		7.3		
	40	38	38	▶ 36	20	18	17	16	14	13	12	10	9	8	7	5	4			7.7		
	43	40	40	▶ 38	19	18	16	15	14	13	11	10	9	8	6	5	4			8.0		
	45	43	43	▶ 40	18	17	16	14	13	12	11	10	8	7	6	5	4			8.3		
	47	45	45	▶ 42	17	16	15	14	13	12	10	9	8	7	6	5	3			8.7		
				▶ 45	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	5	4				9.2		
▼	▼	▼	▼	Meter	Grundzeiten für Meeresniveau, 20 Liter/min, 50 bar Reserve																	
25	29	34	40	1.4 bar	▶ 15	30	45	60	75	90	105	120	135	150							min	
28	32	37	44	1.5 bar	▶ 12	24	36	48	60	72	84	96	108	120							min	
30	34	40	47	1.6 bar	▶ 5	9	14	18	23	27	32	36	41	45							min	
MOD ▶				PO2 ▶	CNS	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100							%



Addiere zur Tiefe 10% pro 1000 m Seehöhe, Aufstieg 2000 m, Wartezeit in Tauchplatzhöhe 30 min

Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Oberflächenintervall	„0“	Pass					
Null	min	6m	3m	RG	m	Null	min	9m	6m	3m	RG	m	min	Std.	Std.
15	95	4	G	0.4	33	19	4	D	2.4					2	2
83'G	108	8	G	0.8	13'D	23	1	7	E	3.3				2	2
18	64	4	F	0.7	7.2	28	3	8	F	4.6				3	3
50'F	72	8	G	1.1		32	5	11	G	5.3				3	3
21	46	4	F	1.3	36	16	4	D	2.6						
34'E	54	8	F	1.9	11'D	20	2	6	E	3.7					
5.2	60	12	G	2.2	7.7	25	4	8	F	5.1					
	68	16	G	2.6		28	6	10	F	5.8					
24	34	4	E	1.4	39	14	4	D	2.8						
25'E	43	8	F	2.5	9'D	18	2	6	E	4.3					
5.7	48	1	11	G	3.0	8.2	22	4	8	F	5.4				
	53	2	14	G	3.4		25	1	5	9	F	6.3			
27	27	4	E	1.7	42	12	4	D	2.9						
19'E	35	8	F	2.9	8'D	16	2	6	E	4.7					
6.2	40	2	10	G	3.6	8.7	19	4	8	F	5.7				
	43	3	13	G	4.0		22	1	6	9	F	6.6			
30	22	4	E	1.9	45	11	1	3	D	3.2					
16'D	28	1	7	F	3.2	7'D	14	2	6	E	4.8				
6.7	33	3	9	F	4.1		17	1	4	7	F	6.1			
	37	5	11	G	4.6	9.2	20	2	5	9	F	7.0			

Tiefe	12 Liter	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
15 m	41	29	20	16											
18 m	33	25	17	14											
21 m	28	22	15	12											
24 m	24	20	13	11											
27 m	21	18	12	10											
30 m	19	16	11	9											
33 m	17	14	10	8											
36 m	15	12	9	7											
39 m	14	11	8	7											
42 m	13	10	7	6											
45 m	11	9	7	6											

Tabelle zur Tauchgangsplanung berechnet mit 2009-B.BAS
 Meeresniveau, Tiefe + 3% + 1 m, Nullzeit 'RG, Druckverbrauch in bar/min, Grundzeit vom Verlassen der Oberfläche bis der tiefe Sicherheitsstopp erreicht ist, flacher Sicherheitsstopp in 5 m Tiefe



Der NITROXPLANER kann weder DCS noch Luftmangel ausschließen, tauche mit Computer

NITROX				(Luft)	Flaschendruck in bar															bar
40	36	32	28	Tiefe	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	min
Tiefe in Meter				5	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	2.0
16	15	13	12	▶ 10	56	53	49	45	41	38	34	30	26	23	19	15	11	8	4	2.7
19	17	16	14	▶ 12	51	48	44	41	38	34	31	27	24	20	17	14	10	7	3	2.9
22	20	18	16	▶ 14	47	44	41	38	34	31	28	25	22	19	16	13	9	6	3	3.2
24	22	20	19	▶ 16	43	40	38	35	32	29	26	23	20	17	14	12	9	6	3	3.5
27	25	23	21	▶ 18	40	38	35	32	29	27	24	21	19	16	13	11	8	5	3	3.7
30	27	25	23	▶ 20	38	35	33	30	28	25	23	20	18	15	13	10	8	5	3	4.0
30	27	25	23	▶ 22	35	33	30	28	26	23	21	19	16	14	12	9	7	5	2	4.3
32	30	27		▶ 24	33	31	29	26	24	22	20	18	15	13	11	9	7	4	2	4.5
34	32	30		▶ 26	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	10	8	6	4	2	4.8
34	32	32		▶ 28	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	2	5.1
36	34			▶ 30	28	26	24	23	21	19	17	15	13	11	9	8	6	4	2	5.3
36		39		▶ 32	27	25	23	21	20	18	16	14	13	11	9	7	5	4		5.6
38				▶ 34	26	24	22	20	19	17	15	14	12	10	9	7	5	3		5.9
40				▶ 36	24	23	21	20	18	16	15	13	11	10	8	7	5	3		6.1
43				▶ 38	23	22	20	19	17	16	14	13	11	9	8	6	5	3		6.4
45				▶ 40	23	21	20	18	17	15	14	12	11	9	8	6	5			6.7
47				▶ 42	22	20	19	17	16	14	13	12	10	9	7	6	4			6.9
				▶ 45	20	19	18	16	15	14	12	11	10	8	7	5	4			7.3
				▶ 48	19	18	17	16	14	13	12	10	9	8	6	5	4			7.7
				▶ 51	18	17	16	15	14	12	11	10	9	7	6	5				8.1
▼	▼	▼	▼	Meter	Grundzeiten für Meeressniveau, 20 Liter/min, 50 bar Reserve															
25	29	34	40	▶ 1.4 bar	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	min					
28	32	37	44	▶ 1.5 bar	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	min					
30	34	40	47	▶ 1.6 bar	5	9	14	18	23	27	32	36	41	45	min					
MOD	▶			PO2	▶	CNS	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	%			



Addiere zur Tiefe 10% pro 1000 m Seehöhe, Aufstieg 2000 m, Wartezeit in Tauchplatzhöhe 30 min

Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.
Null	min	6m 3m RG	m	Null	min	9m 6m 3m RG	m
15	95	4 G 0.4	16	36	20	2 4 D 2.6	3.7
83'G	108	8 G 0.8	11'D	25	4 8 F 5.1	5.8	
18	64	4 F 0.7	6.1	28	6 10 F 5.8		
50'F	72	8 G 1.1	39	14	4 D 2.8		
21	46	4 F 1.3	9'D	18	2 6 E 4.3		
34'E	54	8 F 1.9	6.5	22	4 8 F 5.4		
4.1	60	12 G 2.2	25	1 6 9 F 6.3			
4.1	68	16 G 2.6	42	12	4 D 2.9		
24	34	4 E 1.4	8'D	16	2 6 E 4.7		
25'E	43	8 F 2.5	6.9	19	4 8 F 5.7		
4.5	48	1 11 G 3.0	22	1 6 9 F 6.6			
5.3	53	2 14 G 3.4	45	11	1 3 D 3.2		
27	37	4 E 1.7	7'D	14	2 6 E 4.8		
19'E	25	8 F 2.9	7.3	17	1 4 7 F 6.1		
4.9	40	2 10 G 3.6	20	2 5 9 F 7.0			
4.9	43	3 13 G 4.0	48	9	3 D 2.8		
30	22	4 E 1.9	6'D	12	2 5 D 4.8		
16'D	28	1 7 F 3.2	7.7	15	1 4 7 E 6.3		
5.3	33	3 9 F 4.1	18	2 5 9 F 7.5			
5.3	37	5 11 G 4.6	51	8	3 D 2.8		
33	19	4 D 2.4	5'D	11	2 5 D 5.1		
13'D	23	1 7 E 3.3	8.1	13	1 3 7 E 6.3		
5.7	28	3 8 F 4.6	16	2 5 9 F 7.7			
5.7	32	5 11 G 5.3					

Oberflächenintervall	„0“	Pass
min	Std.	Std.
A	20	2
B	25	3
C	30	3
D	35	3
E	40	4
F	45	4
G	50	5

Tiefe	41	29	20	16
15 m	41	29	20	16
18 m	33	25	17	14
21 m	28	22	15	12
24 m	24	20	13	11
27 m	21	18	12	10
30 m	19	16	11	9
33 m	17	14	10	8
36 m	15	12	9	7
39 m	14	11	8	7
42 m	13	10	7	6
45 m	11	9	7	6
48 m	10	8	6	6
51 m	9	7	5	5

15 Liter ZH-L16 B

Tiefe Stickstoff-Restzeit
Berechnet mit 2009-B.BAS

DEKOPLANER 2014

Meeressniveau, Tiefe + 3% + 1 m, Nullzeit 'RG, Druckverbrauch in bar/min, Grundzeit vom Verlassen der Oberfläche bis der tiefe Sicherheitsstopp erreicht ist, flacher Sicherheitsstopp in 5 m Tiefe



Der NITROXPLANER kann weder DCS noch Luftmangel ausschließen, tauche mit Computer

NITROX				(Luft)	Flaschendruck in bar												bar				
40	36	32	28	Tiefe	200	190	180	170	160	150	140	130	120	110	100	90	80	70	60	min	
Tiefe in Meter				5	100	93	87	80	73	67	60	53	47	40	33	27	20	13	7	1.5	
16	15	13	12	▶ 10	75	70	65	60	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10	5	2.0	
19	17	16	14	▶ 12	68	64	59	55	50	45	41	36	32	27	23	18	14	9	5	2.2	
22	20	18	16	▶ 14	63	58	54	50	46	42	38	33	29	25	21	17	13	8	4	2.4	
24	22	20	19	▶ 16	58	54	50	46	42	39	35	31	27	23	19	15	12	8	4	2.6	
27	25	23	21	▶ 18	54	50	46	43	39	36	32	29	25	21	18	14	11	7	4	2.8	
30	27	25	23	▶ 20	50	47	43	40	37	33	30	27	23	20	17	13	10	7	3	3.0	
30	27	25	23	▶ 22	47	44	41	38	34	31	28	25	22	19	16	13	9	6	3	3.2	
32	30	27	25	▶ 24	44	41	38	35	32	29	26	24	21	18	15	12	9	6	3	3.4	
34	32	30	27	▶ 26	42	39	36	33	31	28	25	22	19	17	14	11	8	6	3	3.6	
34	34	32	30	▶ 28	40	37	34	32	29	26	24	21	18	16	13	11	8	5	3	3.8	
36	34	32	30	▶ 30	38	35	33	30	28	25	23	20	18	15	13	10	8	5	3	4.0	
38	36	34	32	▶ 32	36	33	31	29	26	24	21	19	17	14	12	10	7	5	2	4.2	
40	38	36	34	▶ 34	34	32	30	27	25	23	20	18	16	14	11	9	7	5	2	4.4	
40	36	33	30	▶ 36	33	30	28	26	24	22	20	17	15	13	11	9	7	4	2	4.6	
43	38	31	29	▶ 38	31	29	27	25	23	21	19	17	15	13	10	8	6	4	4.8		
45	40	30	28	▶ 40	30	28	26	24	22	20	18	16	14	12	10	8	6	4	5.0		
47	42	29	27	▶ 42	29	27	25	23	21	19	17	15	13	12	10	8	6	4	5.2		
	45	27	25	▶ 45	27	25	24	22	20	18	16	15	13	11	9	7	5	20	5.5		
	48	26	24	▶ 48	26	24	22	21	19	17	16	14	12	10	9	7	5	5.8			
	51	25	23	▶ 51	25	23	21	20	18	16	15	13	11	10	8	7	5	6.1			
▼				Meter	Grundzeiten für Meeresebene, 20 Liter/min, 50 bar Reserve																
25	29	34	40	1.4 bar	▶ 15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	min						
28	32	37	44	1.5 bar	▶ 12	24	36	48	60	72	84	96	108	120	min						
30	34	40	47	1.6 bar	▶ 5	9	14	18	23	27	32	36	41	45	min						
MOD ▶				PO2 ▶	CNS	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	%					



Addiere zur Tiefe 10% pro 1000 m Seehöhe, Aufstieg 2000 m, Wartezeit in Tauchplatzhöhe 30 min

Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Tiefe	Zeit	Deko	Ceil.	Oberflächenintervall				„0“	Pass
Null	min	6m	3m	RG	Null	9m	6m	3m	RG	min	Std.	Std.	Std.
15	95	4	G	0.4	16			4	D	2.6			
83'G	108	8	G	0.8	36			2	E	3.7			
18	64	4	F	0.7	11'D	25	4	8	F	5.1			
50'F	72	8	G	1.1	4.6	28	6	10	F	5.8			
21	46	4	F	1.3	39	14		4	D	2.8			
34'E	54	8	F	1.9	9'D	18	2	6	E	4.3			
3.7	60	12	G	2.2	4.9	22	4	8	F	5.4			
	68	16	G	2.6		25	1	6	F	6.3			
24	34	4	E	1.4	42	12		4	D	2.9			
25'E	43	8	F	2.5	8'D	16	2	6	E	4.7			
3.4	48	1	11	G	3.0	5.2	19	4	8	F	5.7		
	53	2	14	G	3.4		22	1	6	F	6.6		
27	27	4	E	1.7	45	11	1	3	D	3.2			
19'E	35	8	F	2.9	7'D	14	2	6	E	4.8			
3.7	40	2	10	G	3.6	5.5	17	1	4	F	6.1		
	43	3	13	G	4.0		20	2	5	F	7.0		
30	22	4	E	1.9	48	9		3	D	2.8			
16'D	28	1	7	F	3.2	6'D	12	2	5	D	4.8		
4.0	33	3	9	F	4.1	5.8	15	1	4	F	6.3		
	37	5	11	G	4.6		18	2	5	F	7.5		
33	19	4	D	2.4	51	8		3	D	2.8			
13'D	23	1	7	E	3.3	5'D	11	2	5	D	5.1		
4.3	28	3	8	F	4.6	6.1	13	1	3	F	6.3		
	32	5	11	G	5.3		16	2	5	F	7.7		

Tiefe	41	29	20	16
15 m	41	29	20	16
18 m	33	25	17	14
21 m	28	22	15	12
24 m	24	20	13	11
27 m	21	18	12	10
30 m	19	16	11	9
33 m	17	14	10	8
36 m	15	12	9	7
39 m	14	11	8	7
42 m	13	10	7	6
45 m	11	9	7	6
48 m	10	8	6	6
51 m	9	7	5	5

20 Liter, ZH-L16 B

Tiefe Stickstoff-Restzeit
Berechnet mit 2009-B.BAS

DEKOPLANER 2014

Meeresebene, Tiefe + 3% + 1 m, Nullzeit + RG, Druckverbrauch in bar/min, Grundzeit vom Verlassen der Oberfläche bis der tiefe Sicherheitsstopp erreicht ist, flacher Sicherheitsstopp in 5 m Tiefe

Damit eine schnelle, **alltagstaugliche Planung** möglich ist, stelle ich die Tabellen für den **persönlichen Gebrauch** (nicht für gewinnorientierte Zwecke) zur Verfügung.