

Formelsammlung für Taucher

Bernd Nies / www.nies.ch

7. Oktober 2014

Zusammenfassung

Dieses Dokument beschreibt die für das Tauchen wichtigsten Formeln, samt physikalischer Herleitung. Es richtet sich an Tauchanfänger, sowie erfahrene Taucher, die ihren Wissensstand auffrischen wollen. Dies ersetzt keine zertifizierte Tauchausbildung. Jegliche Haftung von Unfällen aufgrund von Rechenfehlern wird abgelehnt.

Inhaltsverzeichnis

1	Schweredruck und Auftrieb	2
1.1	Absoluter Druck unter Wasser	2
1.2	Statischer Auftrieb	4
2	Gasgesetze	6
2.1	Gesetz von Boyle-Mariotte	6
2.2	Gesetz von Gay-Lussac	7
2.3	Gesetz von Amontons	7
2.4	Gesetz der Homogenität	8
2.5	Gesetz von Avogadro	9
2.6	Thermische Zustandsgleichung	9
2.7	Gesetze realer Gase (van der Waals)	9
2.8	Joule-Thomson-Effekt	12
2.9	Partialdruckgesetz	12
2.10	Nitrox mischen	13
3	Luftverbrauch	15
3.1	Luftverbrauch an der Oberfläche	15
3.2	Luftverbrauch bei erhöhtem Druck	15
3.3	Luftverbrauch bei Auf- und Abstieg	16
4	Wirkung der Atemgase auf den Menschen	19
4.1	Sauerstoffpartialdruck	19
4.2	Beste Nitrox-Mischung	21
4.3	Maximale Tauchtiefe	21
4.4	ZNS Sauerstoffsättigung	23
5	Tabellen	24

1 Schweredruck und Auftrieb

In der Hydrostatik¹ ist der Druck per Definition die senkrechte Kraftwirkung pro Fläche auf ein kleines Flächenelement innerhalb einer Flüssigkeit. Da die Moleküle in einer Flüssigkeit leicht beweglich sind, breitet eine an einer Stelle wirkende Kraft sofort über die gesamte Flüssigkeit aus.

Die SI-Einheit des Druckes p ist Pascal (Pa) und per Definition der Druck, welcher eine Kraft von 1 Newton auf eine Fläche von einem Quadratmeter ausübt.

$$1 \text{ Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m s}^2} = 10^{-5} \text{ bar} \quad (1)$$

Die im Sprachgebrauch übliche und gesetzlich festgelegte Einheit Bar unterscheidet sich davon nur um fünf Zehnerpotenzen. Ein Bar entspricht ungefähr dem Luftdruck auf der Erdoberfläche. Die früher gebräuchlichen und verwirrenden Masseinheiten wie physikalische Atmosphäre (atm), technische Atmosphäre (at), Atmosphäre Überdruck (atü) dürfen nicht mehr verwendet werden. Die USA (zusammen mit Liberia und Myanmar) haben es noch nicht geschafft, das metrische System einzuführen, weshalb dort der Druck in psi (pound force per square inch) angegeben wird.

1.1 Absoluter Druck unter Wasser

Der absolute Druck p_h auf Tauchtiefe h ist die Summe des atmosphärischen Druckes p_a an der Oberfläche und des Druckes $p_w = g\rho h$ der sich über dem Taucher befindlichen Wassersäule. Mit steigender Tiefe steigt der Druck linear. Zehn Meter Wassersäule entspricht etwa dem Druck unserer Atmosphäre. Die ungefähre Dichte für Meerwasser beträgt 1020 kg/m^3 bis 1030 kg/m^3 , für Süßwasser rund 1000 kg/m^3 . Der Dichteunterschied des Wassers bei unterschiedlichen Temperaturen bewegt sich im Promillebereich und kann für unsere Berechnungen vernachlässigt werden.

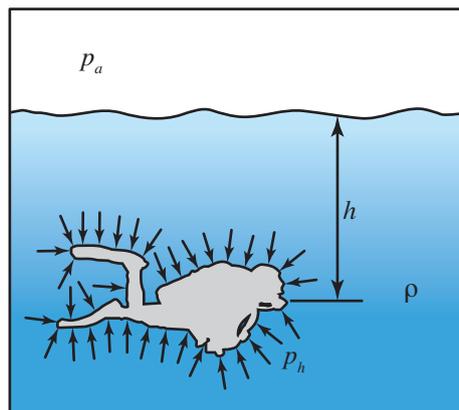


Abbildung 1: Der auf einen Taucher in der Tiefe h einwirkende Schweredruck p_h setzt sich aus dem Atmosphärendruck p_a und dem Druck p_w der darüber liegenden Wassersäule zusammen.

Der Umgebungsdruck p_h auf Tauchtiefe h in Abhängigkeit vom Atmosphärendruck p_a und der Dichte ρ des Wassers wird wie folgt berechnet:

¹Lehre von Flüssigkeiten und Gasen in ruhendem Zustand.

$$p_h = p_a + p_w = p_a + g\rho h \quad (2)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_h	Pa	Umgebungsdruck abhängig von Tauchtiefe h
p_a	Pa	Atmosphärendruck
ρ	kg/m ³	Dichte von Wasser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
h	m	Tauchtiefe

Näherung für Kopfrechnung

Eine gebräuchliche Näherung und Vereinfachung für die Berechnung des Umgebungsdruckes p_h (in Bar) auf Tauchtiefe h (in Metern) vernachlässigt die unterschiedliche Dichten von Salzwasser und Süßwasser, sowie den Atmosphärendruck, ist aber dennoch für die meisten Anwendungen genügend genau:

$$p_h \approx 1 \text{ bar} + \frac{h}{10 \frac{\text{m}}{\text{bar}}} \quad (3)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_h	bar	Umgebungsdruck abhängig von Tauchtiefe h
h	m	Tauchtiefe

Auf Meereshöhe im Salzwasser heben sich die beiden Fehler etwa gegenseitig auf. Für Süßwasser und grosse Höhen über Meer ergeben sich Unterschiede. Allerdings gibt es kaum Tauchcomputer, welche die Dichte des Wassers mitberücksichtigen. Stattdessen wird eine Toleranz von 3% der angezeigten Tiefe in Kauf genommen. In Bergseen ist statt des Anfangsdruckes von 1 bar der jeweilige Luftdruck aus Tabelle 2 in Bar zu verwenden.

Beispiel 1.1. Wie hoch ist der Unterschied des absoluten Druckes auf 40 Metern Tiefe im Meer (Dichte Salzwasser $\rho = 1030 \text{ kg/m}^3$) und in einem 4 °C kalten Bergsee auf 2000 m Höhe (Luftdruck siehe Tabelle 2 auf Seite 24)?

$$\begin{aligned}
 p_1 &= p_a + g\rho h \\
 &= 101\,325 \text{ Pa} + 9.806\,65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 40 \text{ m} \\
 &= 505\,538.98 \text{ Pa} \times \frac{1 \text{ bar}}{100\,000 \text{ Pa}} \\
 &\approx \underline{5.05 \text{ bar}}
 \end{aligned}$$

$$p_2 = 79\,498 \text{ Pa} + 9.806\,65 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 40 \text{ m}$$

$$\approx \underline{4.72 \text{ bar}}$$

1.2 Statischer Auftrieb

Die statische Auftriebskraft ist eine in Flüssigkeiten oder Gasen der Schwerkraft entgegengesetzte Kraft. Sie wird durch die Verdrängung des umgebenden Mediums hervorgerufen und sorgt dafür, dass Schiffe schwimmen, Heissluftballone fliegen oder eben Gegenstände und Taucher unter Wasser leichter oder gar schwerelos erscheinen.

Die Ursache für die Auftriebskraft liegt darin, dass der hydrostatische Druck von der Höhe des betrachteten Ortes abhängt. An der Unterseite eines Körpers wirkt ein höherer Druck als an der Oberseite und drückt deshalb den Körper nach oben.

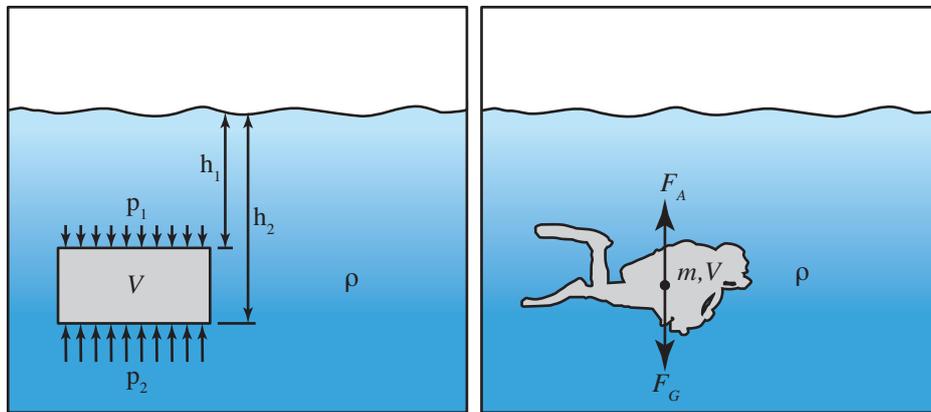


Abbildung 2: Links: Der Auftrieb resultiert daraus, dass der hydrostatische Druck p_2 auf der Unterseite eines Körpers grösser ist, als der Druck p_1 auf der Oberseite, weil er tiefer liegt. Die seitwärts gerichteten Kräfte heben sich gegenseitig auf. Rechts: Graphische Darstellung der daraus auf einen Taucher im Wasser mit der Dichte ρ wirkenden Kräfte für Auftrieb F_A und Gewicht F_G , welche sich aus der Masse m und dem Volumen V des Tauchers ergeben.

Die statische Auftriebskraft F_A errechnet sich aus Dichte ρ des umgebenden Fluids und das vom Körper verdrängte Volumen V , wobei ρV der Masse des verdrängten Fluids entspricht und $g\rho V$ dessen Gewichtskraft.

$$F_A = g\rho V \quad (4)$$

Umgangssprachlich vernimmt man oft Begriffe wie positiver, neutraler oder negativer Auftrieb oder auch Abtrieb. Die Auftriebskraft ist aber stets positiv. Was hier noch dazu kommt, ist die Gewichtskraft F_G (auch Schwerkraft genannt), welche den Körper nach unten in Richtung Erdmittelpunkt zieht.

$$F_G = gm \quad (5)$$

Da die Gewichtskraft F_G der Auftriebskraft F_A entgegen wirkt, muss sie subtrahiert werden.

$$F = F_A - F_G = g(\rho V - m) \quad (6)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
F_A	N	Auftriebskraft
F_G	N	Gewichtskraft
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
ρ	kg/m ³	Dichte des umgebenden Mediums
m	kg	Masse des Körpers
V	m ³	Volumen des Körpers

Jetzt wird ersichtlich, dass wenn die Masse des durch den Körper verdrängten Fluids gleich gross ist, wie die Masse des Körpers selbst, sich die beiden Kräfte F_A und F_G auslöschen, d. h. der Körper einen neutralen Auftrieb besitzt, bzw. schwerelos ist. Dieses Gesetz wurde schon vor über 2200 Jahren vom griechischen Gelehrten Archimedes von Syrakus entdeckt und nach ihm benannt.

Für einen Taucher ist der statische Auftrieb besonders für die Tarierung interessant und hieraus ergeben sich folgende praktische Erkenntnisse:

- Sinkt ein Taucher, so ist er schwerer als das von ihm verdrängte Wasser. Er muss sein Volumen vergrössern, um wieder eine neutrale Tarierung zu erlangen. Hierfür wird die notwendige Menge Luft in die Tarierweste geblasen, welche sich dadurch aufbläht und das Volumen vergrössert.
- Steigt ein Taucher, so ist er leichter als das von ihm verdrängte Wasser. Er muss sein Volumen verringern, um wieder eine neutrale Tarierung zu erlangen. Hierzu muss Luft aus der Tarierweste und ggf. dem Trockentauchanzug abgelassen werden.
- Ein- und ausatmen verändert schon das Volumen des Tauchers und sorgt kurzzeitig für geringe Tarierungsänderung.
- In einem Fluid mit höherer Dichte (Salzwasser gegenüber Süsswasser) benötigt ein Taucher mehr Masse, um eine neutrale Tarierung zu erlangen.

2 Gasgesetze

Bei Gasen sind Druck p , Volumen V und Temperatur T direkt voneinander abhängig. Diese Gesetze wurden von unterschiedlichen Personen bei experimentellen Untersuchungen unabhängig voneinander entdeckt:

2.1 Gesetz von Boyle-Mariotte

Bei konstanter Temperatur (isotherme Zustandsänderung) und konstanter Stoffmenge ist der Druck umgekehrt proportional zum Volumen.

$$p \sim \frac{1}{V} \quad pV = \textit{konstant} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} \quad (7)$$

Verdoppelt sich also der Druck, so reduziert sich das Volumen auf die Hälfte. Ist der Druck dreimal so hoch, so ist das Volumen nur noch ein Drittel. Ein paar Beispiele aus der Tauchpraxis:

- Steigt der Druck bei konstanter Temperatur, so verringert sich das Volumen. Die Luftbläschen im Neopren-Anzug werden zusammen gequetscht und der Anzug verliert an Auftrieb. Deshalb muss das Jacket beim Abtauchen mit Luft gefüllt werden, um den Taucher schwerelos zu tarieren.
- Sinkt der Druck bei konstanter Temperatur, so vergrößert sich das Volumen. Auch dies sollte Tauchern bekannt sein, dass sich beim Auftauchen die Luft im Jacket und Trockenanzug ausdehnt. Dies gilt ebenfalls für die Luft in der Lunge (darum beim Auftauchen nie den Atem anhalten), Gase in den Eingeweiden (wer furzt überlebt) und am allerwichtigsten der in den Körperflüssigkeiten und Geweben gelöste während dem Tauchen angereicherte Stickstoff.

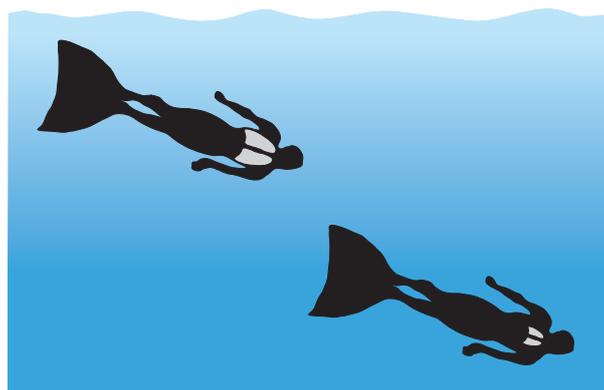


Abbildung 3: Bei einem Apnoe-Taucher schrumpft die Lunge mit zunehmender Tiefe. Gefährlich wirds, wenn der Apnoe-Taucher in der Tiefe einem Scuba-Taucher begegnet, einen Atemzug aus der Flasche nimmt und beim Auftauchen wie gewohnt die Luft anhält. Dann platzt die Lunge.

2.2 Gesetz von Gay-Lussac

Bei konstantem Druck (isobare Zustandsänderung) und gleichbleibender Stoffmenge ist das Volumen direkt proportional zur Temperatur. Dies wird auch oft das Gesetz von Charles genannt.

$$V \sim T \qquad \frac{V}{T} = \textit{konstant} \qquad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (8)$$

Erhöht sich die Temperatur, so dehnt sich das Gas gleichermassen aus und das Volumen vergrößert sich. Wird die Temperatur verringert, so zieht sich das Gas zusammen. Die Temperatur bezieht sich dabei auf den absoluten Nullpunkt von -273.15°C und wird in Kelvin gemessen.

Ein Beispiel, nicht direkt aus der Taucherpraxis: Wer an einem heissen Sommertag das Planschbecken seiner Kinder mit Druckluft aus der Tauchflasche füllen will, soll es anfangs nicht zu prall füllen. Das ausströmende Gas ist kalt und wenn es sich in der Sonne erwärmt, dehnt es sich aus und füllt dann die Luftkammern des Planschbeckens prallvoll.

2.3 Gesetz von Amontons

Bei konstantem Volumen (isochore Zustandsänderung) und gleichbleibender Stoffmenge ist der Druck direkt proportional zur Temperatur. Dies wird auch oft als das zweite Gesetz von Gay-Lussac bezeichnet.

$$p \sim T \qquad \frac{p}{T} = \textit{konstant} \qquad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \qquad (9)$$

Wird ein Gas in einem Behälter erwärmt, so erhöht sich der Druck. Wird ein Gas gekühlt, so sinkt der Druck. Es gilt ausserdem: Wird ein Gas komprimiert, so erwärmt es sich. Wird es dekomprimiert, so kühlt es sich ab. Ein paar Beispiele aus der Taucherpraxis:

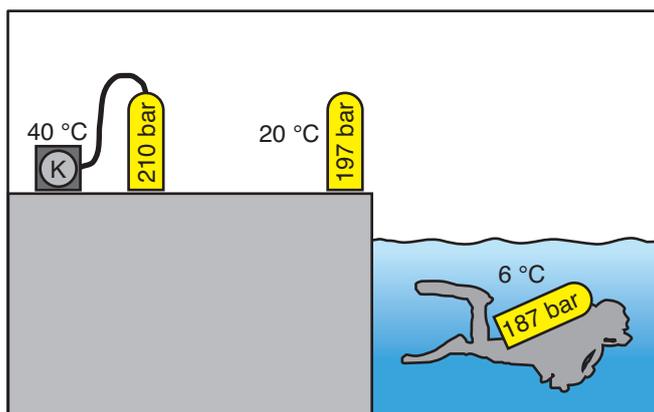


Abbildung 4: Eine Tauchflasche wird schnell auf 210 bar gefüllt und wird 40°C warm. Danach kühlt sie auf 20°C ab und es der Druck sinkt auf 197 bar. Im 6°C kalten Wasser ist bei Tauchbeginn der Druck nur noch 187 bar.

- Beim Füllen einer Flasche am Kompressor wird die Flasche spürbar warm. Die entstehende Wärme stammt von der Arbeit des Kompressors. Wenn sich die Flasche dann einmal abgekühlt hat, ist der Druck leicht gesunken. Wer die Kapazität seiner Flasche optimal nutzen will, der füllt sie das erste mal unmittelbar nach dem Tauchgang, lagert die Flasche an einem kühlen Ort und füllt vor dem nächsten Tauchgang noch den Rest nach.
- Wer mit einer noch warmen Flasche direkt ins kalte Wasser springt, der wird feststellen, dass von den beim Check gemessenen 210 bar auf einmal nur noch etwa 187 bar übrig sind. Die Druckänderung stammt von der Abkühlung des Gases. Das muss bei der Luftvorratberechnung für die Tauchgangsplanung berücksichtigt werden.

Beispiel 2.1. Eine gefüllte Flasche ($p_1 = 210$ bar) wird im Winter aus dem geheizten Auto ($T_1 = 20^\circ\text{C}$) ins kalte Wasser ($T_2 = 4^\circ\text{C}$) genommen. Wieviel Luft (p_2) ist noch in der Flasche?

$$\begin{aligned}
 p_2 &= p_1 \frac{T_2}{T_1} \\
 &= 210 \text{ bar} \times \frac{277.15 \text{ K}}{299.15 \text{ K}} \\
 &\approx 195 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

Von den anfänglich 210 Bar sind nur noch 195 Bar übrig. Dies ist bei der Berechnung des Luftverbrauchs für die Tauchgangsplanung zu berücksichtigen.

Beispiel 2.2. Eine bei Raumtemperatur gefüllte Flasche ($p_1 = 210$ bar, $T_1 = 20^\circ\text{C}$) wird im Hochsommer ins Auto gelegt. Das Auto steht in der prallen Sonne und heizt sich auf $T_2 = 70^\circ\text{C}$ auf. Besteht die Gefahr, dass die Flasche explodieren kann?

$$\begin{aligned}
 p_2 &= p_1 \frac{T_2}{T_1} \\
 &= 210 \text{ bar} \times \frac{349.15 \text{ K}}{299.15 \text{ K}} \\
 &\approx 245 \text{ bar}
 \end{aligned}$$

Tauchflaschen werden in der Regel bis zum doppelten Druck geprüft.

2.4 Gesetz der Homogenität

Ein ideales Gas besitzt überall dieselbe Dichte und das Volumen ist bei konstantem Druck und konstanter Temperatur proportional zur Stoffmenge n .

$$V \sim n \qquad \frac{V}{n} = \textit{konstant} \qquad \frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \qquad (10)$$

Ein Beispiel aus der Taucherpraxis: Bei Gasgemischen (Luft, Nitrox, Trimix) sind die einzelnen Gase überall in der Flasche gleichförmig verteilt. Der Sauerstoff sinkt nicht mit der Zeit auf den Flaschenboden, weil er schwerer als Stickstoff ist. Die Tauchflasche muss also nicht vor Gebrauch geschüttelt werden. Dennoch ist es empfehlenswert, nachdem Mischgas mit der Partialdruckmethode erstellt wurde, die Flasche einige Stunden ruhen zu lassen, bis sich die Gase gut durchmischt haben.

2.5 Gesetz von Avogadro

Die Stoffmenge ist bei unterschiedlichen Gasen mit bei gleichem Volumen, gleichem Druck und gleicher Temperatur ebenfalls dieselbe. Woraus sich R , die universelle Gaskonstante ergibt.

$$\frac{p_1 V_1}{T_1 n_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2 n_2} = \textit{konstant} = R \quad (11)$$

Ein Beispiel aus der Taucherpraxis: In zwei Flaschen gleicher Grösse und gleichem Druck und bei gleicher Temperatur befinden sich dieselbe Anzahl Gasmoleküle, unabhängig davon, um welches Gas es sich dabei handelt. Dies ist wichtig für die Berechnung des Verhältnisses beim Mischen von Gasen.

2.6 Thermische Zustandsgleichung

Die zuvor aufgeführten einzelnen Gasgesetze werden in thermischen Zustandsgleichung idealer Gase vereint:

$$pV = nRT \quad (12)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p	Pa	Druck
V	m ³	Volumen
n	mol	Stoffmenge
R	J/(mol K)	universelle Gaskonstante (8.314 462 1 J/(mol K))
T	K	Temperatur (0 °C = 273.15 K)

Wie der Name schon vermuten lässt, gilt diese Gleichung nur für “ideale Gase”, bei denen die Moleküle als ausdehnungslose Massepunkte angenommen werden, welche ausser elastischen Stößen keinerlei Wechselwirkung miteinander eingehen. Ein Gas mit niedriger Dichte bzw. Druck und bei nicht zu niedrigen Temperatur verhält sich beinahe wie ein ideales Gas. Je höher die Temperatur ist, desto mehr nähert es sich ein reales Gas diesem Grenzwert an.

2.7 Gesetze realer Gase (van der Waals)

In der Realität bestehen Gase aus Atomen oder Molekülen mit einer definierten Ausdehnung, sind also nicht beliebig kompressibel. Die einzelnen Atome oder Moleküle üben gegenseitig weitere Kräfte aufeinander aus. Bei niedrigen Temperaturen verflüssigen sich Gase (z. B.

Stickstoff bei $-196\text{ }^\circ\text{C}$) andere verflüssigen oder verfestigen sich unter hohem Druck (z. B. Kohlendioxid bei 57.3 bar und $20\text{ }^\circ\text{C}$). Gase, welche aus komplexeren Molekülen bestehen, verflüssigen sich bereits bei geringem Druck (z. B. n-Butan bei 2 bar).

Um diese Zustände zu beschreiben, sind komplexere Berechnungen für jedes einzelne Gas notwendig. Die van der Waals Gleichung ist eine empirisch ermittelte Erweiterung des idealen Gasgesetzes, welche man wieder erhält, wenn a und b auf null gesetzt werden. Sie ist während der Verdampfungs und Verflüssigungsphase von Gasen aber auch ungenau.

$$p(V) = \frac{nRT}{V - nb} - a\left(\frac{n}{V}\right)^2 \quad (13)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$p(V)$	Pa	Druck in Abhängigkeit vom Volumen V
n	mol	Stoffmenge
R	J/(mol K)	universelle Gaskonstante (8.314 462 1 J/(mol K))
T	K	Temperatur
V	m^3	Volumen
a	$\text{Pa m}^6/\text{mol}^2$	Kohäsionsdruck des Gases
b	m^3/mol	Kovolumen des Gases

Die für Taucher relevanten Gase (Stickstoff N_2 , Sauerstoff O_2) verhalten sich bei denen unter Wasser herrschenden Drücken und Temperaturen genügend linear, weshalb die thermische Zustandsgleichung idealer Gase für diesen Verwendungszweck genügend genau ist.

Bei den hohen Drücken, welche in Tauchflaschen auftreten, ergeben sich für die verschiedenen Gase jedoch bereits signifikante Unterschiede. Siehe pV-Diagramm in Abbildung 5 auf Seite 11. Da normale Atemluft ein Gasgemisch von 78 % N_2 und 21 % O_2 ist und sich gemäss Gesetz von Dalton sich dieses bei 200 bar aus den Partialdrücken 156 bar N_2 und 42 bar O_2 (2 bar Spurengase) zusammensetzt, bewegen sich die einzelnen Gase innerhalb ihrer Partialdrücke wieder im linearen Bereich. Somit ist die Taucherwelt wieder in Ordnung, schön brav linear und einfach berechenbar, weshalb in der Tauchpraxis nur die einfachen Gesetze für ideale Gase Anwendung finden. Die Abweichungen liegen innerhalb der Messtoleranzen von Finimetern.

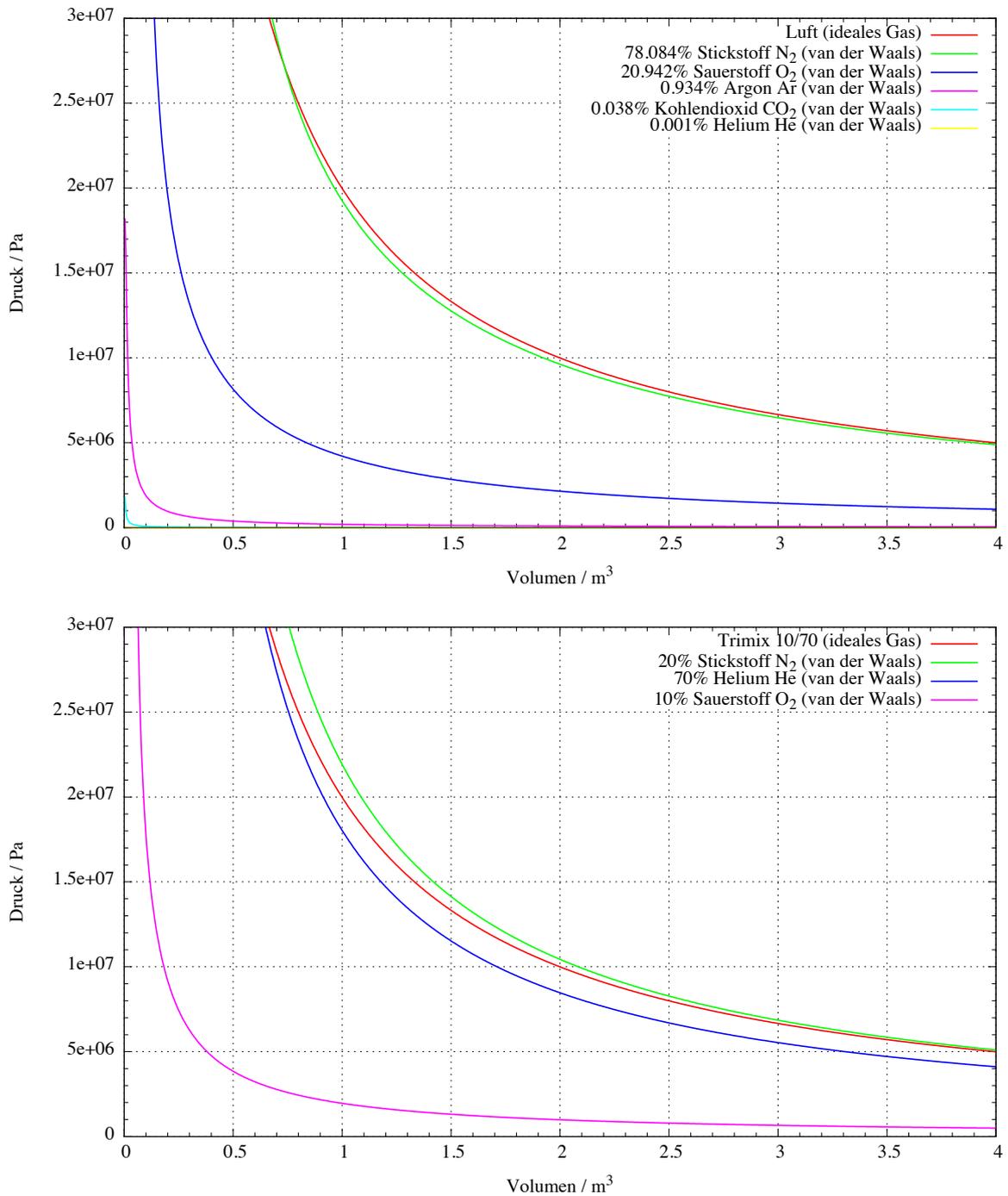


Abbildung 5: pV-Diagramm mit Isothermen der in normaler Atemluft (oben) enthaltenen realen Gase, sowie eines Trimix 10/70 Gemisches (unten) berechnet nach van der Waals. Im Vergleich zur Kurve eines idealen Gases (rote Linie). Die einzelnen Kurven der Partialdrücke sind aufaddiert. Temperatur von 293.15 K (20 °C) und Stoffmenge 8200 mol. Man erkennt gut, dass bei der Trimix-Mischung die Unterschiede der Berechnungsmethode bereits stärker ins Gewicht fallen.

2.8 Joule-Thomson-Effekt

Der Joule-Thomson-Effekt tritt auf, wenn ein strömendes reales Gas durch Drosselung (z. B. durch eine Blende oder ein anderes Hindernis) eine Expansion und dadurch eine Temperaturveränderung erfährt. Die Ursache liegt in der Wechselwirkung der Gasteilchen:

- Ziehen sich die Teilchen an, so muss bei der Vergrößerung des Teilchenabstandes Arbeit gegen diese Anziehung geleistet werden. Die Energie dazu kommt aus der kinetischen Energie der Gasteilchen – das Gas kühlt ab.
- Stossen sich die Teilchen ab, so ist im gepressten Zustand mehr Energie vorhanden. Wenn die Teilchen sich voneinander weg bewegen können, wird diese Energie frei. Der kinetische Anteil vergrößert sich also – die Temperatur des Gases steigt.

Ob sich die Teilchen eines Gases anziehen oder abstossen, hängt von der Temperatur des Gases ab. Für reale Gase ändert sich dieses Verhalten bei der Inversionstemperatur. Diese beträgt für Luft 659 K. Oberhalb dieser Temperatur führt der Joule-Thomson-Effekt zu Erwärmung; unterhalb tritt Abkühlung auf.

Ein Beispiel aus der Taucherpraxis: In der ersten Stufe eines Lungenautomaten, wo die Luft von Flaschendruck auf etwa 10 bar über den Umgebungsdruck gemindert wird, sowie in der zweiten Stufe, bei der eine weitere Reduzierung auf den Umgebungsdruck stattfindet, kühlt das Gas bei Expansion ab. Bei hohem Luftverbrauch und Feuchtigkeit in der Luft kann es deshalb in sehr kaltem Wasser zur Vereisung führen und der Automat bläst ab.

2.9 Partialdruckgesetz

Der Partialdruck eines Gasgemisches ist der Druck, der der einzelnen Komponente zugeteilt ist. Er entspricht dem Druck, welcher die einzelne Komponente bei alleinigem Vorhandensein im betreffenden Volumen ausüben würde. Das Daltonsche Gesetz besagt, dass die Summe aller Partialdrücke p_i gleich dem Gesamtdruck p_{tot} des Gemisches ist.

$$p_{tot} = \sum_{i=1}^k p_i \quad (14)$$

Das Σ bedeutet, dass die einzelnen Partialdrücke p_i aufaddiert werden müssen. Für Luft folgert daraus, dass der Druck von Luft gleich der Summe der Drücke von Stickstoff p_{N_2} , Sauerstoff p_{O_2} , Argon p_{Ar} , Kohlendioxid p_{CO_2} und anderer Spurengase p_x ist:

$$p_a = p_{N_2} + p_{O_2} + p_{Ar} + p_{CO_2} + p_x \quad (15)$$

Da die Anteile von Argon, Kohlendioxid und anderer Spurengase zusammen weniger als 1% Volumenanteil der Atemluft ausmachen, werden sie für die Berechnung von Tauchgängen vernachlässigt. Die Zusammensetzung von Luft vereinfacht sich dazu auf den gerundeten Anteil von Stickstoff $f_{N_2} = 0.79$ und den von Sauerstoff $f_{O_2} = 0.21$:

$$p_a = p_{N_2} + p_{O_2} = p_a(f_{N_2} + f_{O_2}) \quad (16)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_a	Pa	Atmosphärendruck
p_{N_2}	Pa	Partialdruck Stickstoff
p_{O_2}	Pa	Partialdruck Sauerstoff
f_{N_2}		Anteil Stickstoff
f_{O_2}		Anteil Sauerstoff

Die Anteil der einzelnen Gase und Partialdrücke in der Erdatmosphäre sind in Tabelle 3 auf Seite 24 wiedergegeben. Bei anderen Atemgasgemischen (Nitrox, Trimix, Heliox, Hydrox, Hydreliox) muss die Gleichung um die jeweiligen Gasanteile entsprechend erweitert werden.

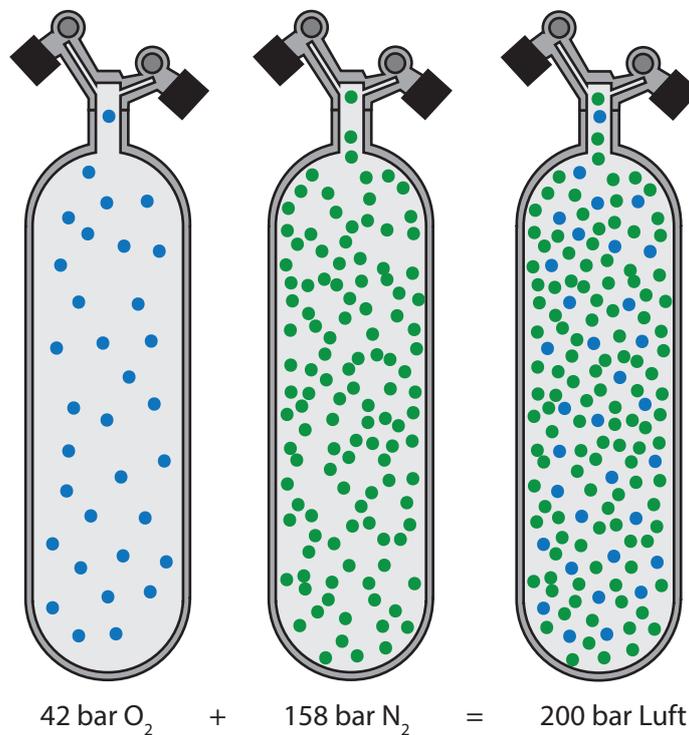


Abbildung 6: Die Summe der Partialdrücke der verschiedenen Gase eines Gasgemisches entsprechen dem Gesamtdruck des Gasgemisches. Der Druck jeder einzelne Komponente bei alleinigem Vorhandensein im Volumen entspricht dem Partialdruck. Gemäss dem Gesetz der Homogenität, sind die einzelnen Gaskomponenten auch gleichmässig verteilt.

2.10 Nitrox mischen

Dieser Abschnitt beschreibt das Mischen von Nitrox nach der Partialdruckmethode. Eine Flasche wird mit reinem Sauerstoff bis auf den Druck p_{O_2} vorgefüllt und dann mit Luft p_1 (bzw. ein anderes Nitrox-Gemisch mit Sauerstoffanteil f_1) aufgefüllt (getoppt), um den Nitrox-Zieldruck p_2 mit Sauerstoffanteil f_2 zu erreichen.

$$p_2 = p_{O_2} + p_1 \quad (17)$$

Setzt man die Partialdrücke des Topping-Gases ($f_1 p_1 + p_{N_2}$) und des Zielgemisches ($f_2 p_2 + p_{N_2}$) in die Gleichung ein, so ergibt sich:

$$f_2 p_2 + p_{N_2} = p_{O_2} + f_1 p_1 + p_{N_2} \quad (18)$$

Der Partialdruck von Stickstoff bleibt unverändert und kann beidseits aus der Gleichung subtrahiert werden. Unbekannte Grössen sind p_{O_2} und p_1 . Die Menge an Topping-Gas p_1 ergibt sich gemäss Gleichung (17) aus der Differenz vom Zieldruck und der Menge reinen Sauerstoffs ($p_2 - p_{O_2}$). Damit lässt sich die Gleichung wie folgt umformen und auflösen:

$$\begin{aligned} f_2 p_2 &= p_{O_2} + f_1 (p_2 - p_{O_2}) \\ f_2 p_2 &= p_{O_2} + f_1 p_2 - f_1 p_{O_2} \\ f_2 p_2 - f_1 p_2 &= p_{O_2} - f_1 p_{O_2} \\ p_2(f_2 - f_1) &= p_{O_2}(1 - f_1) \\ \frac{p_2(f_2 - f_1)}{1 - f_1} &= p_{O_2} \end{aligned}$$

Somit lautet die Formel zur Berechnung eines Nitroxgemisches nach der Partialdruckmethode wie folgt:

$$p_{O_2} = p_2 \frac{f_2 - f_1}{1 - f_1} \quad (19)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_{O_2}	bar	benötigte Menge reiner Sauerstoff
p_2	bar	gewünschter Zieldruck (z. B. 200 bar)
f_2		Sauerstoffanteil des Zielgemisches
f_1		Sauerstoffanteil des Topping-Gases (z. B. 0.21)

Beispiel 2.3. Wieviel reiner Sauerstoff wird benötigt, um zusammen mit Luft 200 bar Nitrox EAN32 herzustellen?

$$\begin{aligned} p_{O_2} &= p_2 \frac{f_2 - f_1}{1 - f_1} \\ &= 200 \text{ bar} \times \frac{0.32 - 0.21}{1 - 0.21} \\ &\approx 27.8 \text{ bar} \end{aligned}$$

Also eine leere Flasche erst langsam mit 27.8 bar reinem Sauerstoff füllen und dann mit normaler Luft langsam bis 200 bar auffüllen.

3 Luftverbrauch

Das Lungenvolumen eines Menschen beträgt im Schnitt drei bis vier Liter. Weltrekordler im Apnoetauchen können sogar ein Lungenvolumen bis zehn Liter erreichen. Ein Mensch atmet im Ruhezustand etwa 12 bis 18 mal pro Minute und pro Atemzug etwa einen halben Liter Luft, ungefähr sechs bis neun Liter pro Minute. Bei leichten körperlichen Tätigkeiten (z. B. gehen) steigt der Luftverbrauch auf etwa 25 Liter pro Minute. Bei sehr starker körperlicher Anstrengung kann der Luftverbrauch auf etwa 80 Liter pro Minute ansteigen.

3.1 Luftverbrauch an der Oberfläche

Die verbrauchte Luftmenge ΔV ergibt sich, wenn die Atemleistung Q_a mit dem zu betrachtenden Zeitintervall t multipliziert wird.

$$\Delta V = Q_a t \quad (20)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔV	m^3	Verbrauchte Luftmenge bei Normaldruck
Q_a	m^3/s	Atemleistung an der Oberfläche
t	s	Zeitintervall

Beispiel 3.1. Wieviel Luft verbraucht ein Mensch während acht Stunden Schlaf (Atemleistung 9 l/min)?

$$\begin{aligned} \Delta V &= Q_a t \\ &= 9 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 8 \text{ h} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{h}} \\ &= 4320 \text{ l} \\ &= 4.32 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

3.2 Luftverbrauch bei erhöhtem Druck

Unter erhöhtem Umgebungsdruck ist die Atemleistung Q_p auf Tauchtiefe h direkt proportional zum Druck, da komprimierte Luft geatmet wird. Doppelter Umgebungsdruck resultiert in doppelter Atemleistung, bzw. Luftverbrauch. Die Atemleistung Q_a an der Oberfläche wird mit dem Druckverhältnis von Umgebungsdruck p_h auf Tauchtiefe h zu Atmosphärendruck p_a multipliziert:

$$Q_p = Q_a \frac{p_h}{p_a} = Q_a \left(1 + \frac{g\rho h}{p_a} \right) \quad (21)$$

Die tatsächlich unter Wasser verbrauchte Luftmenge umgerechnet auf Normaldruck erhält man, wenn die erhöhte Atemleistung mit dem Zeitintervall t multipliziert wird.

$$\Delta V_p = Q_p t = Q_a \frac{p_h}{p_a} t = Q_a t \left(1 + \frac{g\rho h}{p_a} \right) \quad (22)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔV_p	m ³	Verbrauchte Luftmenge auf Tauchtiefe h über Zeitintervall t
Q_a	m ³ /s	Atemleistung an der Oberfläche
Q_p	m ³ /s	Atemleistung unter erhöhtem Druck
t	s	Zeitintervall
p_a	Pa	Atmosphärendruck
p_h	Pa	Absoluter Umgebungsdruck auf Tauchtiefe h
ρ	kg/m ³	Dichte von Wasser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
h	m	Tauchtiefe

Näherung für Kopfrechnung

Häufig findet man in der Tauchliteratur nur die Näherung der Formel (22), welche statt des Druckverhältnisses den absoluten Druck in Bar verwendet. Da der Druck an der Oberfläche auf Meereshöhe 1 bar beträgt, stimmt dies zufällig und für die meisten Anwendungen ist die Näherung genügend genau. Da pro 10 m Wassertiefe der Druck um ungefähr 1 bar steigt, ist die Verwendung des absoluten Umgebungsdruckes anstatt der Tiefe viel einfacher für Kopfrechnung.

Es werden keine SI-Einheiten, sondern abgeleitete praktischere Einheiten verwendet: Die Atemleistung wird mit Litern pro Minute, das Zeitintervall in Minuten und der Druck mit Bar angegeben. Das Ergebnis ist eine etwas unsinnige Einheit "Bar Liter", welche den Verbrauch komprimierter Luft symbolisieren soll.

$$\Delta V_p \approx Q_a t p_h \quad (23)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔV_p	bar l	Verbrauchte Luftmenge auf Tauchtiefe h über Zeitintervall t
Q_a	l/min	Atemleistung an der Oberfläche
t	min	Zeitintervall
p_h	bar	Absoluter Umgebungsdruck auf Tauchtiefe h

3.3 Luftverbrauch bei Auf- und Abstieg

Der Luftverbrauch beim auf- oder abtauchen mit konstanter Geschwindigkeit errechnet sich aus dem mittleren Druck \bar{p} zwischen den beiden Tauchtiefen h_1 und h_2 :

$$\bar{p} = \frac{p_1 + p_2}{2} = p_a + \frac{g\rho(h_1 + h_2)}{2} \quad (24)$$

Eingesetzt in Gleichung (22) errechnet sich der Luftverbrauch wie folgt:

$$\Delta V_p = Q_a t \frac{\bar{p}}{p_a} = Q_a t \left(1 + \frac{g\rho(h_1 + h_2)}{2p_a} \right) \quad (25)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔV_p	m ³	Verbrauchte Luftmenge auf Tauchtiefe h über Zeitintervall t
Q_a	m ³ /s	Atemleistung an der Oberfläche
t	s	Zeitintervall
p_a	Pa	Atmosphärendruck
\bar{p}	Pa	Mittlerer Druck
ρ	kg/m ³	Dichte von Wasser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
h_1	m	Starttiefe
h_2	m	Zieltiefe

Näherung für Kopfrechnung

Die Gleichung (25) kann mit einer Näherung für Kopfrechnung vereinfacht werden, wenn die Unterschiedlichen Dichten von Meerwasser wie auch Süßwasser, sowie der Atmosphärendruck vernachlässigt werden.

Es werden keine reinen SI-Einheiten, sondern abgeleitete praktischere Einheiten verwendet. Die Atemleistung wird mit Litern pro Minute, das Zeitintervall in Minuten und der Druck mit Bar angegeben.

$$\Delta V_p \approx Q_a t \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (26)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ΔV_p	bar l	Verbrauchte Luftmenge auf Tauchtiefe h über Zeitintervall t
Q_a	l/min	Atemleistung an der Oberfläche
t	min	Zeitintervall
p_1	bar	absoluter Umgebungsdruck am Anfang
p_2	bar	absoluter Umgebungsdruck am Ende

Beispiel 3.2. Wieviel Luft wird für den Aufstieg von 40 Metern zur Oberfläche benötigt, inklusive 3 Minuten Sicherheitsstop in 5 Metern Tiefe? Aufstiegs geschwindigkeit 10 m/s, Atemleistung 20 l/min.

Aufstieg von 40 Metern auf 5 Metern in 3.5 Minuten:

$$\begin{aligned}
\Delta V_{p1} &= Qa t \frac{p_1 + p_2}{2} \\
&= 20 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 3.5 \text{ min} \times \frac{5 \text{ bar} + 1.5 \text{ bar}}{2} \\
&= 227.5 \text{ bar l}
\end{aligned}$$

Luftverbrauch bei 3 Minuten Sicherheitsstop auf 5 Metern:

$$\begin{aligned}
\Delta V_{p2} &= Qa t p_2 \\
&= 20 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 3 \text{ min} \times 1.5 \text{ bar} \\
&= 90 \text{ bar l}
\end{aligned}$$

Luftverbrauch für den restlichen Aufstieg ab Sicherheitsstop bis zur Oberfläche, Aufstiegszeit 30 Sekunden:

$$\begin{aligned}
\Delta V_{p3} &= Qa t \frac{p_1 + p_2}{2} \\
&= 20 \frac{\text{l}}{\text{min}} \times 0.5 \text{ min} \times \frac{1.5 \text{ bar} + 1 \text{ bar}}{2} \\
&= 12.5 \text{ bar l}
\end{aligned}$$

Für den gesamten Aufstieg wird also folgende Luftmenge benötigt:

$$\begin{aligned}
\Delta V_p &= \Delta V_{p1} + \Delta V_{p2} + \Delta V_{p3} \\
&= 227.5 \text{ bar l} + 90 \text{ bar l} + 12.5 \text{ bar l} \\
&= 330 \text{ bar l}
\end{aligned}$$

Es wird für den gesamten Aufstieg also 330 Liter Luft benötigt. In einer 12 Liter Flasche entspricht dies einer Druckminderung um

$$\frac{330 \text{ bar l}}{12 \text{ l}} = 27.5 \text{ bar}$$

Wie sieht das nun aber aus, wenn dem Tauchbuddy auf 40 Metern die Flasche abbläst und beide aus derselben Flasche atmen und durch den Vorfall so nervös sind, dass sie die doppelte Luftmenge verbrauchen? Der Luftverbrauch vervierfacht sich und die verbrauchte Luft steigt auf 1320 Liter an, was bei einer 12 Liter Flasche einer Druckminderung um 110 Bar entspricht. Wenn beim Vorfall nur noch 100 Bar in der Flasche waren, dann reicht der Luftvorrat nicht. Es muss entweder etwas schneller aufgestiegen werden oder der Sicherheitsstop ausgelassen werden oder besser sich beruhigen und die Atemfrequenz verringern. Die beste Vorsorge ist genügend Luftreserve für sich und seinen Tauchbuddy einzuplanen.

4 Wirkung der Atemgase auf den Menschen

Der menschliche Organismus hat sich über viele Generationen der Zusammensetzung der Erdatmosphäre und dem in der gewohnten Umgebung herrschenden Drücke angepasst. Wird von diesen abgewichen, kann zu Komplikationen kommen:

- In grossen Höhen ist der Atmosphärendruck und somit auch Sauerstoffpartialdruck niedriger, was zur Höhenkrankheit führen kann. Aus diesem Grunde müssen sich Bergsteiger erst anklimateisieren.
- Einatmung von Luft unter erhöhtem Umgebungsdruck führt zu einer Sättigung der Körperflüssigkeiten und des Gewebes mit Stickstoff. Wird der Umgebungsdruck zu schnell vermindert, so perlt der gelöste Stickstoff aus. Die entstehenden Gasblasen können im Gewebe zu mechanischen Schäden oder in den Blutgefässen zu einer Gasembolie führen und die lokale Blutzufuhr unterbrechen (Dekompressionskrankheit). Darum darf ein Taucher keinesfalls zu schnell an die Oberfläche steigen und muss Dekompressionsstops einhalten – es sei denn, er hat nur die allerletzt Wahl zwischen dem eigenen Tod oder einer Dekompressionskrankheit.
- Ist der Stickstoffpartialdruck zu gross, so kann dieser narkotisch wirken (Tiefenrausch). Erste Anzeichen einer Stickstoffnarkose können schon bei einem Stickstoffpartialdruck von 3-4 bar auftreten, doch jeder Mensch reagiert unterschiedlich darauf. Allgemein gilt, dass 5 bar nicht überschritten werden soll.

Um die oben genannten Nebeneffekte zu reduzieren werden für das Tauchen je nach Anwendung und Tiefe unterschiedliche Gasmischungen verwendet. Das am häufigsten verwendete is Nitrox, welches mit Sauerstoff angereicherte Luft ist, um durch den geringeren Anteil von Stickstoff die Stickstoffsättigung und somit das Risiko einer Dekompressionskrankheit zu verringern. Der erhöhte Sauerstoffanteil führt jedoch zu erneuten Problemen, denn Sauerstoff wirkt toxisch, wenn er über einen längeren Zeitraum unter erhöhtem Druck eingeatmet wird. Er wirkt als erstes auf das zentrale Nervensystem (ZNS). Die Symptome einer Sauerstoffvergiftung sind Augenflimmern, Übelkeit, Muskelzuckungen, Epileptische Anfälle bis zur Bewusstlosigkeit. Sie können schleichend auftreten oder aber auch plötzlich.

Aus diesem Grunde darf bei der Verwendung von Nitrox als Atemgas der maximal zulässige Sauerstoffpartialdruck und daraus resultierend die maximale Tauchtiefe nicht überschritten werden.

4.1 Sauerstoffpartialdruck

Die allgemeine Empfehlung für den maximal zulässigen Sauerstoffpartialdruck lautet:

- $p_{O_2} = 1.6$ bar für gemütliche Tauchgänge im warmen Wasser ohne körperliche Anstrengung oder Stress oder für Atemgemische während eines Dekompressionsstops.
- $p_{O_2} = 1.4$ bar für anspruchsvolle Tauchgänge im kaltem Wasser oder ohne ausreichenden Wärmeschutz, mit körperlicher Anstrengung und Stress. Dies ist der für die meisten Situationen empfohlene Grenzwert.
- $p_{O_2} = 1.2$ bar für konservative Tauchgangsplanung und für in grosser Tiefe eingesetzte Gasmischungen.

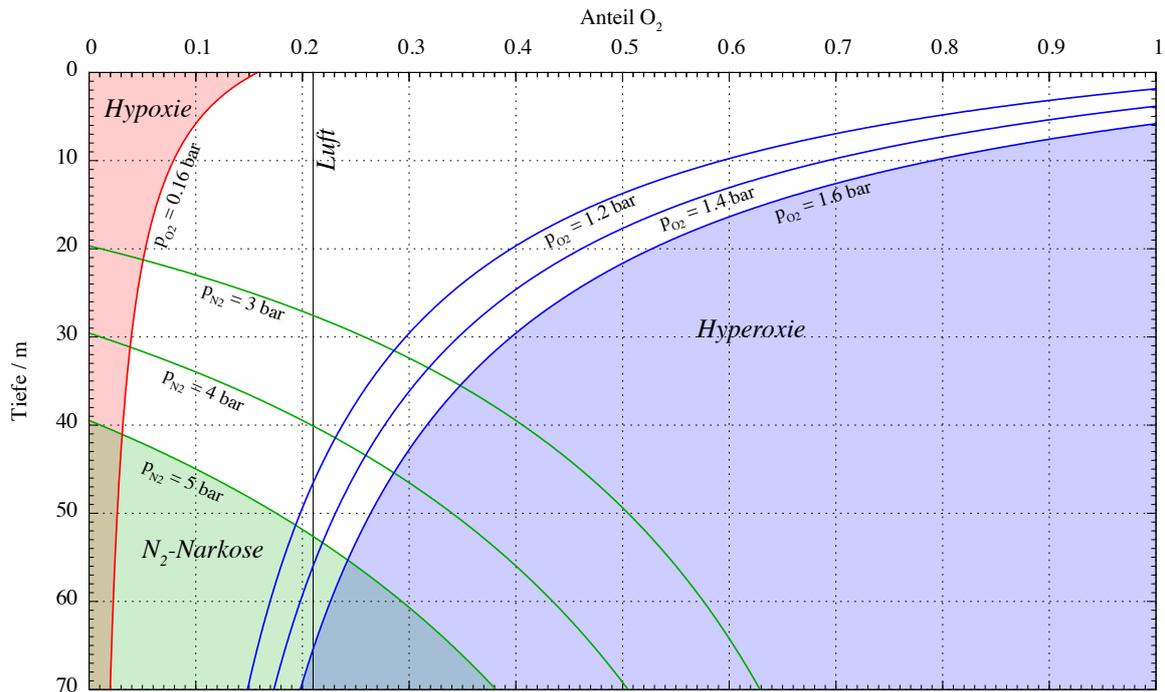


Abbildung 7: Die Grafik zeigt den Zusammenhang der verschiedenen Grenzbereiche der einzelnen Gase im Atemgemisch und ihre Auswirkungen auf einen Taucher. Sauerstoff wirkt ab einem Partialdruck von 1.2 bar bis 1.6 bar toxisch (Hyperoxie) und unterhalb von 0.16 bar erhält der Körper eine Sauerstoffunterversorgung (Hypoxie). Stickstoff kann ab einem Partialdruck von 3 bar bis 4 bar anfangen narkotisch zu wirken. 5 bar sollten nicht überschritten werden. Innerhalb des weissen Bereiches kann sicher getaucht werden. Tauchgänge im Grenzbereich sind mit Vorsicht zu genießen.

Der Sauerstoffpartialdruck berechnet sich aus dem Schweredruck aus Gleichung (2) multipliziert mit dem Sauerstoffanteil des Atemgemisches.

$$p_{O_2} = f_{O_2}(p_a + g\rho h) \quad (27)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_{O_2}	Pa	Sauerstoffpartialdruck
f_{O_2}		Sauerstoffanteil des Atemgases
p_a	Pa	Atmosphärendruck
ρ	kg/m ³	Dichte von Wasser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
h	m	Tauchtiefe

4.2 Beste Nitrox-Mischung

Durch Auflösung der Gleichung (27) nach f_{O_2} erhält man die Formel für die beste Nitrox-Mischung für eine gegebene maximale Tauchtiefe h_{max} , auch als MOD² bezeichnet. Das beste Mischverhältnis entspricht dem Verhältnis vom maximal tolerierbaren Sauerstoffpartialdruck p_{O_2} zum maximal unter Wasser auftretenden Druck p_{max} , sprich der grössten Tauchtiefe.

$$f_{O_2} = \frac{p_{O_2}}{p_{max}} = \frac{p_{O_2}}{p_a + g \rho h_{max}} \quad (28)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_{O_2}	Pa	erlaubter Sauerstoffpartialdruck
p_{max}	Pa	Umgebungsdruck auf maximaler Tauchtiefe
f_{O_2}		Sauerstoffanteil des Atemgases
p_a	Pa	Atmosphärendruck
ρ	kg/m ³	Dichte von Wasser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
h_{max}	m	maximale Tauchtiefe (MOD)

4.3 Maximale Tauchtiefe

Löst man die Gleichung (27) nach dem maximalen Umgebungsdruck p_{max} , bzw. der maximalen Tauchtiefe h_{max} auf, so erhält man die Formel zur Berechnung der maximalen Tauchtiefe (MOD) für ein bestimmtes Nitrox-Gemisch:

$$p_{max} = \frac{p_{O_2}}{f_{O_2}} \quad (29)$$

$$h_{max} = \frac{1}{g \rho} \left(\frac{p_{O_2}}{f_{O_2}} - p_a \right) \quad (30)$$

Symbol	Einheit	Bezeichnung
p_{O_2}	Pa	erlaubter Sauerstoffpartialdruck
f_{O_2}		Sauerstoffanteil des Atemgases
p_a	Pa	Atmosphärendruck
ρ	kg/m ³	Dichte von Wasser
g	m/s ²	Erdbeschleunigung (9.806 65 m/s ²)
h_{max}	m	maximale Tauchtiefe (MOD)

²MOD: Maximum Operating Depth

Beispiel 4.1. Welches ist die Maximaltiefe, welches mit einem EAN 32 Nitroxgemisch und einem maximal zulässigen Sauerstoffpartialdruck von 1.4 bar (140 000 Pa) getaucht werden darf? Einmal für Meereshöhe (Atmosphärendruck $p_a = 101\,325$ Pa) und Salzwasser ($\rho = 1030$ kg/m³) gerechnet:

$$\begin{aligned} h_{max} &= \frac{1}{g \rho} \left(\frac{p_{O_2}}{f_{O_2}} - p_a \right) \\ &= \frac{1}{9.806\,65 \text{ m/s}^2 \times 1030 \text{ kg/m}^3} \times \left(\frac{140\,000 \text{ Pa}}{0.32} - 101\,325 \text{ Pa} \right) \\ &\approx 33.2 \text{ m} \end{aligned}$$

Und einmal für einen Bergsee auf 2500 m über Meeresebene gerechnet ($p_a = 73\,510$ Pa, $\rho = 1000$ kg/m³):

$$\begin{aligned} h_{max} &= \frac{1}{9.806\,65 \text{ m/s}^2 \times 1000 \text{ kg/m}^3} \times \left(\frac{140\,000 \text{ Pa}}{0.32} - 73\,510 \text{ Pa} \right) \\ &\approx 37.1 \text{ m} \end{aligned}$$

Der maximale Sauerstoffpartialdruck wird in einem Bergsee in einer grösseren Tiefe erreicht. Dies gilt auch für alle anderen Drücke, weshalb in Bergseen Dekompressionsstufen entsprechend früher beginnen müssen.

4.4 ZNS Sauerstoffsättigung

Massgebend für eine Sauerstoffvergiftung ist nicht nur der Sauerstoffpartialdruck, sondern auch die Zeitdauer, während der Körper dem Überangebot von Sauerstoff ausgesetzt ist. Dieses wirkt sich als erstes auf das zentrale Nervensystem (ZNS bzw. CNS³). Eine physikalisch oder mathematische Formel, welche die Sättigung beschreibt, gibt es nicht, sondern nur empirisch ermittelte Werte, welche von der NOAA⁴ als Tabelle publiziert worden sind und als Richtlinien gelten.

In Abbildung 8 ist die ZNS O₂-Sättigungsrate in Abhängigkeit des O₂-Partialdruckes aus Tabelle 4 dargestellt. Möchte man den während eines Tauchganges aufgesammelte ZNS O₂-Sättigung berechnen, so muss die Tauchzeit in Minuten mit dem entsprechenden ZNS Wert für den O₂-Partialdruck multipliziert werden.

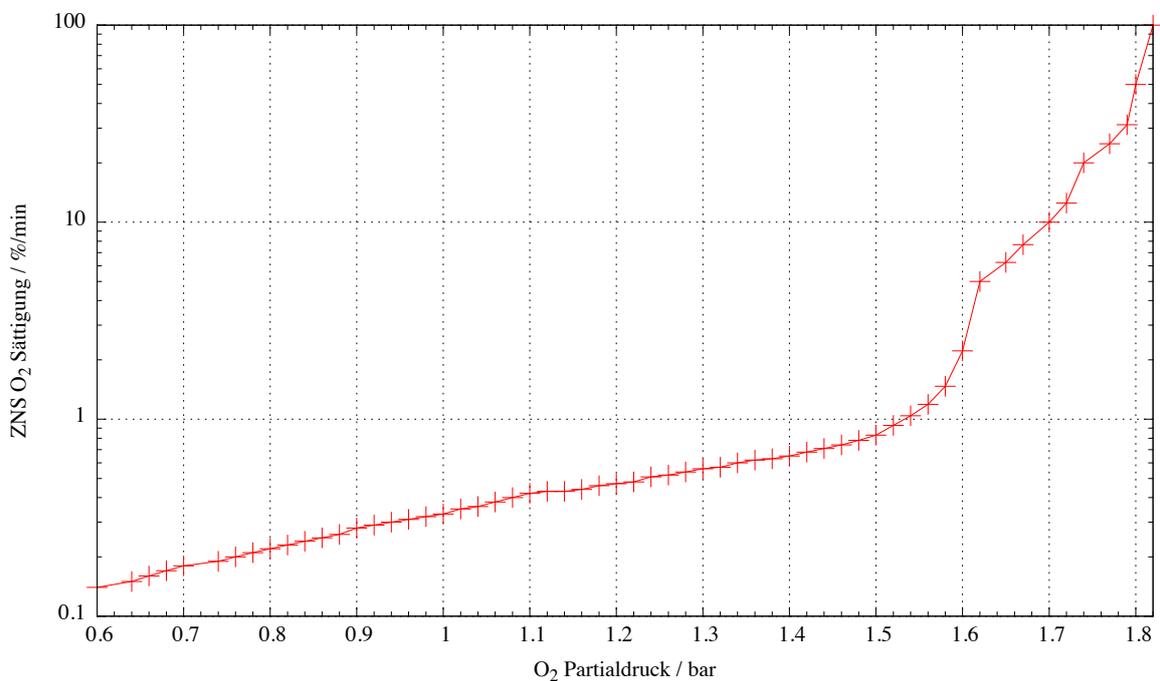


Abbildung 8: Graphische Darstellung der NOAA Sauerstofftoxizität ZNS Tabelle mit logarithmisch dargestellter y-Achse mit der minütlichen ZNS O₂ Sättigungsrate. Man erkennt schön, dass bis zu einem Sauerstoffpartialdruck von etwa 1.5 bar die Sättigungsrate relativ konstant ist und bei höheren Drücken rapide ansteigt.

³CNS: Central Nervous System

⁴NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration

5 Tabellen

	Pa	bar	psi
1 Pa	1	1×10^{-5}	1.4504×10^{-4}
1 bar	1×10^5	1	1.4504×10^1
1 psi	6.8948×10^3	6.8948×10^{-2}	1

Tabelle 1: Umrechnungstabelle für die verschiedenen heute gebräuchlichen Druckeinheiten

Höhe m	hPa	Normaldruck	
		bar	%
0	1013.25	1.013 25	100
100	1000.30	1.000 30	98.7
200	987.60	0.987 60	97.5
300	975.00	0.975 00	96.2
400	962.50	0.962 50	95.0
500	950.30	0.950 30	93.8
600	938.10	0.938 10	92.6
700	926.20	0.926 20	91.4
800	914.40	0.914 40	90.2
900	902.70	0.902 70	89.1
1000	891.20	0.891 20	88.0
1500	835.80	0.835 80	82.5
2000	783.80	0.783 80	77.4
2500	735.10	0.735 10	72.5
3000	689.40	0.689 40	68.0
3500	646.50	0.646 50	63.8
4000	606.30	0.606 30	59.8

Tabelle 2: Abhängigkeit des normierten Luftdrucks von der Höhe über Meer und relativ zum Luftdruck auf Meereshöhe.

Komponente	Volumenanteil %	Partialdruck	
		hPa	bar
Luft	100.000	1013.25	1.013 25
Stickstoff	78.090	791.25	0.791 25
Sauerstoff	20.950	212.28	0.212 28
Argon	0.927	9.39	0.009 39
Kohlenstoffdioxid	0.039	0.39	0.000 39

Tabelle 3: Übersicht der Partialdrücke von trockener Luft in Meereshöhe

ppO ₂ bar	ZNS O ₂ %/min	max. Tauchzeit min	ppO ₂ bar	ZNS O ₂ %/min	max. Tauchzeit min
0.50	0.00	∞	1.22	0.48	208
0.60	0.14	714	1.24	0.51	196
0.64	0.15	667	1.26	0.52	192
0.66	0.16	625	1.28	0.54	185
0.68	0.17	588	1.30	0.56	179
0.70	0.18	556	1.32	0.57	175
0.74	0.19	526	1.34	0.60	167
0.76	0.20	500	1.36	0.62	161
0.78	0.21	476	1.38	0.63	159
0.80	0.22	455	1.40	0.65	154
0.82	0.23	435	1.42	0.68	147
0.84	0.24	417	1.44	0.71	141
0.86	0.25	400	1.46	0.74	135
0.88	0.26	385	1.48	0.78	128
0.90	0.28	357	1.50	0.83	120
0.92	0.29	345	1.52	0.93	108
0.94	0.30	333	1.54	1.04	96
0.96	0.31	323	1.56	1.19	84
0.98	0.32	313	1.58	1.47	68
1.00	0.33	303	1.60	2.22	45
1.02	0.35	286	1.62	5.00	20
1.04	0.36	278	1.65	6.25	16
1.06	0.38	263	1.67	7.69	13
1.08	0.40	250	1.70	10.00	10
1.10	0.42	238	1.72	12.50	8
1.12	0.43	233	1.74	20.00	5
1.14	0.43	233	1.77	25.00	4
1.16	0.44	227	1.79	31.25	3
1.18	0.46	217	1.80	50.00	2
1.20	0.47	213	1.82	100.00	1

Tabelle 4: Sauerstofftoxizität (O₂-Toxicalscan) – ZNS Tabelle nach NOAA

Oberflächenintervall h	Faktor
0.5	0.8
1.0	0.63
1.5	0.5
2.0	0.4
2.5	0.31
3.0	0.25
3.5	0.2
4.0	0.16
5.0	0.1
6.0	0.06
9.0	0

Tabelle 5: Reduktionsfaktoren der ZNS Sauerstoffsättigung aufgrund des Oberflächenintervalls (Halbwertszeit 1.5 Stunden)

Gas	Dichte kg/m ³	Kohäsionsdruck a Pa m ⁶ /mol ²	Kovolumen b m ³ /mol
Argon	1.784	136.3×10^{-3}	3.22×10^{-5}
Helium	0.1785	3.45×10^{-3}	2.37×10^{-5}
Kohlendioxid	1.98	363.7×10^{-3}	4.27×10^{-5}
Sauerstoff	1.429	137.8×10^{-3}	3.18×10^{-5}
Stickstoff	1.250	140.8×10^{-3}	3.91×10^{-5}

Tabelle 6: Dichte bei 0 °C und 1013 hPa, sowie van der Waals Konstanten verschiedener Gase