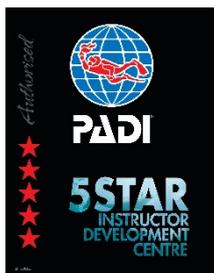




Die Tauchtheorie

Eine
Zusammenfassung
für Freizeittaucher

Zusammengestellt von
Kai Born und Xenia Kuzelka



Die Airbubble-Skriptenreihe Band 1

Über die Autoren

Dr. Kai Born. Facharzt für Psychosomatische Medizin und Psychotherapie, Taucher seit 1992, professioneller Taucher seit 2015, PADI-IDC-Staff-Instructor (#377715) und SSI-AOWD-Instructor (#85538), ERF-Instructor-Trainer, tätig im Airbubble Divecenter (PADI-5-Star-IDC-Center, Bischofsheim).

Kontakt über das IKVT-Hessen, Bahnhofstraße 27-33, 65185 Wiesbaden und über das Airbubble Dive Center: info@airbubble.de.

Xenia Kuzelka. Key Account Managerin, Taucherin seit 1992, professionelle Taucherin seit 1999, PADI-Course-Director (#939265) seit 2014, Speciality-Instructor-Trainerin, EFR-Instructor-Trainerin, tätig im Airbubble Dive Center (PADI-5-Star-IDC-Center, Bischofsheim) und bei Schwerelos (PADI-5-Star-IDC-Center, Ingolstadt).

Kontakt über das Airbubble-Dive Center: info@airbubble.de.

Unter Mitarbeit von

Prof. Dr. Alexander Noyon, PADI-Divemaster, Frankfurt

Dr. Ralf Künzel, PADI- und EFR-Instructor, Bruchköbel

Die Airbubble-Skriptenreihe

Die Airbubble-Skripten-Reihe veröffentlichen wir kostenfrei nach dem Open Access Prinzip. Wir verwenden eigene Bilder oder Bilder mit einer freien Lizenz. Der Zweck ist, dass Wissen allen Menschen kostenfrei zur Verfügung gestellt wird. Unsere Skripte können damit privat genutzt werden. Das Copyright bleibt aber bestehen.

Version 1.1 2022

Copyright K. Born & X. Kuzelka

Airbubble Divecenter
PADI-5-Star-IDC-Center

Neben dem Mühlweg 10
65474 Bischofsheim
Deutschland

Inhaltsverzeichnis

Einführung	5
-------------------------	----------

Kapitel 1

A Materie	7
1. Hintergrund	7
2. Physik.....	7
3. Konsequenzen für das Tauchen	8
B Temperatur und Wärme	8
1. Hintergrund	9
2. Physik.....	9
3. Konsequenzen für das Tauchen	10
C Druck und Gasgesetze	10
1. Hintergrund	11
2. Physik.....	11
3. Konsequenzen für das Tauchen	13
D Licht	16
1. Hintergrund	17
2. Physik.....	17
3. Konsequenzen für das Tauchen	18
E Schall.....	18
1. Hintergrund	19
2. Physik.....	19
3. Konsequenzen für das Tauchen	19
F Wasser	19
1. Hintergrund	20
2. Physik.....	20
3. Konsequenzen für das Tauchen	21

Kapitel 2

A Das Herz-Kreislauf-System.....	23
1. Anatomie und Physiologie.....	23
2. Konsequenzen für das Tauchen	24
B Das Atmungssystem	25
1. Anatomie und Physiologie.....	25
2. Konsequenzen für das Tauchen	26
C Die Ohren.....	28
1. Anatomie und Physiologie.....	28
2. Konsequenzen für das Tauchen	28
D Der Wasserhaushalt	29
E Die Wärmeregulation	31

Anhang

Literatur und Theorie-Kurse	33
1. Literatur.....	33
2. Theorie-Kurse	33

Einführung

Der Tauchsport erfreut sich einer breiten Beliebtheit, was sich in den steigenden Tauchkursen in den letzten Jahren zeigt. Viele machen die Grundkurse und tauchen in der Freizeit. Häufig werden auch weiterführende Kurse besucht. Der Fokus liegt aber in erster Linie meistens auf dem praktischen Tauchen in den vielen wunderschönen Tauchgebieten unserer Erde. Die gelernte Theorie wird dann mit der Zeit wieder teilweise vergessen, wenn Taucherinnen und Taucher diese nicht mehr ab und zu auffrischen. »Es gibt nichts Praktischeres als eine gute Theorie« (Kurt Lewin, 1943, Organisationsspezialist), eine Theorie, von der spezifische Handlungen abgeleitet werden können. Das heißt, dass alles, was wir über und vor allem unter Wasser machen, wird von den theoretischen Grundlagen abgeleitet. Die Forschung hat viel Wissen über die Physik und die Physiologie des Tauchens gewonnen, anhand dessen die Tauchorganisationen die Prozeduren und die Techniken die Produkte angepasst haben.

Wir Menschen tun Dinge in der Regel nur, wenn wir sie uns gut begründen können. Daher sollten wir Taucher die tauchtheoretischen Grundlagen im Kopf haben und uns selbst oder ggf. anderen Tauchern unsere Handlungen erklären können. Auch wenn wir die von uns benutzte Technik besser verstehen, können wir sie besser einsetzen, ihr vertrauen und sicherer tauchen.

Das vorliegende Skript fasst die wesentlichen tauchtheoretischen Grundlagen zusammen, um diese schnell nachschlagen und wieder lernen zu können. Auf ausführliche Erklärungen und Herleitungen wird dabei oftmals verzichtet. Diese sind in den Kursbüchern und in den Tauchtheorie-Kursen zu finden (siehe Literatur- und Kursverzeichnis). Das grundlegende Verständnis der Zusammenhänge setzen wir hier also voraus. Wenn Du, liebe Leserin und lieber Leser, jedoch etwas nicht genau verstehst, bist Du herzlich eingeladen, nachzuschlagen, im Internet zu recherchieren, eine Tauchlehrerin bzw. einen Tauchlehrer zu fragen oder einen Theorie-Kurs zu besuchen. Wir erklären Dir die Dinge gerne.

Wir wünschen nun allen interessierten Taucherinnen und Tauchern viel Spaß beim Auffrischen Ihres Wissens. Wir freuen uns über konstruktive Rückmeldungen, um das Skript kontinuierlich zu verbessern.

Kapitel 1

Die physikalischen Grundlagen

A Materie

1. Hintergrund

Wir leben in der physikalischen Welt der Körper. Alle Körper und Substanzen werden als »**Materie**« zusammengefasst. Daher müssen wir einiges über die Materie, die uns umgibt und aus der wir bestehen, und deren Eigenschaften wissen. Hier fassen wir zusammen, was für das Freizeittauchen wichtig ist.

2. Physik

Grundelemente der Materie. Es gibt verschiedene **Grundelemente**, aus denen alle Materie aufgebaut sind. Diese Grundelemente können nicht in weitere Substanzen aufgespalten werden. Die Grundbausteine dieser Grundelemente sind die so genannten **Atome**. Atome galten über Jahrhunderte als die letzten, unteilbaren Teilchen. Heute wissen wir aber, dass auch die Atome wiederum aus kleineren Bestandteilen bestehen. Wir haben zunächst die **Elektronen, Protonen** und **Neutronen** entdeckt. Die Protonen und Neutronen bilden den Atomkern und die Elektronen bewegen sich um den Kern herum. Die Atome der Grundelemente unterscheiden sich in deren Zusammensetzung: Die Anzahl der Atomteilchen, also die **Anzahl** an Protonen, Neutronen und Elektronen in einem Atom, bestimmt, um welches Grundelement es sich handelt.

Moleküle. Die Atomteilchen bestehen wiederum aus noch kleineren Teilchen, was aber für uns hier keine Rolle spielt. Für uns ist nur wichtig, dass sich Atome zu Atomverbänden, den so genannten **Molekülen**, zusammenschließen können. Diese Moleküle bilden die verschiedenen Substanzen, mit denen wir es zu tun haben. Wasser beispielsweise ist kein Grundelement. Wassermoleküle bestehen aus den Grundelementen Wasserstoff und Sauerstoff.

Physikalische Eigenschaften. Die Grundelemente haben bestimmte physikalische Eigenschaften. Die Moleküle haben interessanterweise andere Eigenschaften als die Grundelemente, aus denen sie bestehen. Wir müssen also jede Substanz auf ihre Eigenschaften prüfen, um zu verstehen, wie sie auf uns oder andere Substanzen wirkt. Beim Tauchen haben wir es hauptsächlich mit *Wasser* und mit den *Gasen* der Luft (Sauerstoff und Stickstoff) zu tun. Aber auch andere Gase spielen eine Rolle. Zudem haben wir auch mit der Schutzkleidung und der Technik, die es uns unter Wasser ermöglicht zu atmen, zu tun. Daher müssen wir deren physikalischen Eigenschaften kennen, um sie optimal einsetzen zu können.

Masse (m). Die physikalische Definition ist hier zu kompliziert. Für uns ist wichtig, dass eine definierte Menge einer Substanz auf der Erdoberfläche ein bestimmtes **Gewicht** hat, was wir bekanntermaßen in **Kilogramm** (kg) messen. Je mehr Masse eine Substanz hat, desto schwerer ist sie und umgekehrt.

Volumen (V). Beim Volumen handelt es sich um ein definiertes **Raummaß**. Wir messen den Raum in der Einheit **Liter**.

Dichte. Die Dichte beschreibt die Menge an Masse innerhalb eines definierten Raumes. Ist die Dichte hoch, erfüllt viel Masse den Raum und umgekehrt.

Zustandsformen der Materie. Materie kann in drei Zustandsformen auftauchen: **Fest, flüssig** oder **gasförmig**. Der Zustand hängt grundsätzlich von den **Eigenschaften der Moleküle** ab, aber auch von der **Temperatur** der Substanz. Wasser ist beispielsweise unter 0° Celsius als Eis fest, von 4 bis 99° flüssig und ab 100° gasförmig. **Druck** wirkt sich auch auf die Zustandsform aus: Je höher der Druck, desto mehr widersteht die Substanz in einen anderen Zustand zu wechseln. Es ist also mehr Energie notwendig, um den Zustand zu verändern. Die Zustandsveränderung kommt zustande, indem sich die Moleküle bei steigender Temperatur mehr bewegen und voneinander wegstreben. Die Struktur, die die Moleküle bilden, lockert sich somit, und die Substanz wird flüssig oder gasförmig. Sobald sie sich abkühlt, finden die Moleküle wieder zueinander und die feste Struktur wird wieder aufgebaut.

Energie. Energie ist die **Fähigkeit, Arbeit zu leisten** und wird in **Joule** gemessen. Es gibt verschiedene **Energieformen**: potentielle, kinetische, elektrische, chemische Energie, Strahlungsenergie und Wärmeenergie. Energie kann weder erzeugt noch verbraucht werden. Energie wird nur umgewandelt (**Energieerhaltungsprinzip**).

3. Konsequenzen für das Tauchen

Wir müssen über die physikalischen bzw. chemischen Eigenschaften der Substanzen, mit denen wir beim Tauchen zu tun haben, Bescheid wissen, um sicher zu tauchen. Relevant sind für uns die Eigenschaften des Wassers, bestimmter Gase, der Materialien unserer Tauchausrüstung und unseres Körpers.

B Temperatur und Wärme

1. Hintergrund

Wenn wir ins Wasser gehen, wird uns relativ schnell kalt, und zwar viel schneller, als wenn wir uns bei derselben Lufttemperatur aufhalten. Wenn Wasser sehr kalt ist, führt der Aufenthalt in diesem Wasser schnell zur Unterkühlung und dann auch zum Tod, wenn das Wasser nicht verlassen wird. Daher ist die Aufenthaltsdauer in kaltem Wasser für uns Menschen begrenzt.

2. Physik

Wärme. Mit dem Begriff Wärme wird die **Bewegungsenergie** aller Moleküle einer Substanz bezeichnet. Die physikalische Einheit für diese Energie ist **Joule**.

Wärmekapazität. Dies ist ein Maß für die Menge an Energie, die einer Substanz zugeführt werden muss, um sie um 1 Grad Kelvin/Celsius zu erhöhen. Luft hat eine geringe Wärmekapazität und ist daher schnell aufwärmbar, wohingegen Wasser eine hohe Wärmekapazität hat und viel Energie benötigt, um aufgeheizt zu werden. Dadurch puffert Wasser Temperaturunterschiede sehr gut und hält die Temperaturen auf der Erde relativ konstant.

Temperatur (T). Durchschnittlicher **Grad der Bewegung** der Moleküle einer Substanz. Wir messen die Temperatur in Grad Celsius (0°C = Gefrierpunkt des Wassers, 100°C = Siedepunkt des Wassers) und in Kelvin (0 K = absoluter Nullpunkt im Universum [-273°C]).

Wärmeübertragung. Wärmeenergie kann über drei Mechanismen übertragen werden, die nachfolgenden erklärt werden: **Wärmeleitung**, **Wärmeströmung** und **Wärmestrahlung**.

Wärmeleitung. Substanzen können Wärme leiten, manche besser, manche schlechter. Die Wärmeleitung wird **Konduktion** genannt. Wasser ist ein sehr guter Wärmeleiter, deshalb wird meistens Wasser zur Kühlung von Anlagen genutzt. Wasser **leitet Wärme circa 20mal besser** als Luft. Dies ist Grund, weshalb wir im Wasser schnell auskühlen. Wenn wir schwimmen, wird durch den Wasserfluss auf der Haut viel mehr Wärme abgeleitet, als wenn wir nur schwebend im Wasser liegen.

Wärmeströmung. Beim Schweben entstehen auch kleine Wasserflüsse, indem sich das Wasser, das mit der Haut Kontakt hat, erwärmt und dadurch Richtung Oberfläche aufsteigt (**»Konvektion«**). Dadurch kommt kälteres Wasser wieder nach. Diese Mikroströme tragen beim Schweben zum Wärmeverlust bei, beim normalen Schwimmen spielt dieser Mechanismus jedoch keine Rolle.

Wärmestrahlung. Warme Körper geben Wärmeenergie durch elektromagnetische Strahlung im Infrarotbereich an die Umgebung ab. Dies können wir mit einer Infrarotkamera nachweisen. Wenn wir vor einem Feuer stehen und die Wärme auf der Haut spüren, handelt es sich hierbei um die Wärmestrahlung des Feuers. Diese Abstrahlung erfolgt kontinuierlich,

also unabhängig, ob wir uns an Land oder unter Wasser befinden. Dieser Wärmeverlust durch Abstrahlung kann durch eine Isolierung reduziert werden. Insgesamt spielt diese Art von Wärmeübertragung beim Tauchen keine wesentliche Rolle.

3. Konsequenzen für das Tauchen

Wir müssen uns gegen Wärmeverlust schützen. Dazu dienen Tauchanzüge in verschiedenen Ausführungen (Formen und Materialien), Schuhe, Kopfhäuben und Handschuhe. Je kälter das Wasser ist, desto dicker müssen wir uns anziehen. Sehr kaltes Wasser begrenzt jeden Tauchgang zeitlich, weil wir uns im Wasser nicht unendlich warmhalten können. Die Schutzmaßnahmen verlangsamen also die Auskühlung deutlich, können diese jedoch nicht vollständig verhindern. Die Schutzkleidung wird im *Airbubble-Skript Tauchausrüstung* ausführlich beschrieben.

C Druck und Gasgesetze

1. Hintergrund

Wir haben mit der Physik der Gase unter Wasser intensiv zu tun, denn wir atmen Gase ein. In der Regel atmen wir Pressluft oder sauerstoffangereicherte Pressluft (Sauerstoffanteil bis 40%). Tech-Taucher atmen auch andere Gase bzw. Gasmischungen ein (z. B. Helium). Mit steigender Tiefe nehmen der Druck des Wassers und der Druck der Atemgase zu. Daher ist das Verstehen der physikalischen Zusammenhänge wesentlich, um sicher zu tauchen.

2. Physik

Druck (P). Druck ist die **Kraft**, die auf eine bestimmte Fläche ausgeübt wird. Gemessen wird sie daher in **kg pro Fläche**. Es werden aber auch andere Einheiten benutzt, hier vor allem **Bar**.

$$1 \text{ bar} = 1,02 \text{ kg/cm}^2$$

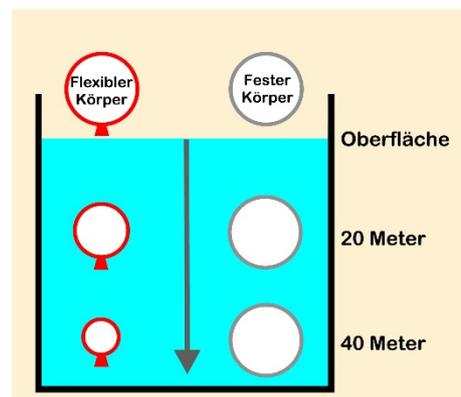
Druck der Atmosphäre. Der Druck in der Tauchgemeinschaft wird in der Regel in Bar angegeben. Im Durchschnitt übt die Atmosphäre auf Meereshöhe einen Druck von näherungsweise 1 bar aus, der unseren Berechnungen für den Druck in der Tiefe zugrunde gelegt wird.

Druck des Wassers. Wasser hat Masse und übt Druck auf Gegenstände aus. Der Druck steigt mit zunehmender Tiefe an. Salzwasser hat eine höhere Dichte und damit eine höhere Masse als Süßwasser und übt dadurch höheren Druck aus.

$$1 \text{ m Salzwasser} = 0,1 \text{ bar} \quad \rightarrow \text{Druckerhöhung: } 0,1 \text{ bar / m}$$

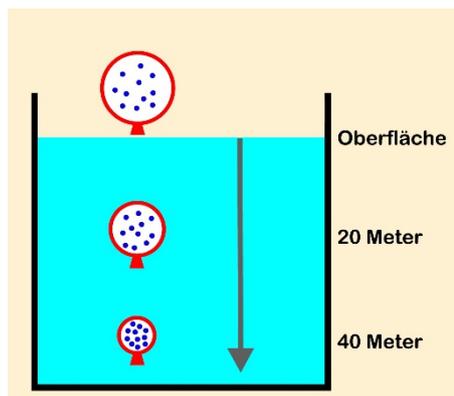
$$1 \text{ m Süßwasser} = 0,097 \text{ bar} \quad \rightarrow \text{Druckerhöhung: } 0,097 \text{ bar / m}$$

Druck und Volumen (Gesetz von Boyle). Wenn eine Substanz flexibel ist, kommt es durch eine Druckerhöhung zu einer Verformung der Substanz, da auf sie nun eine größere Kraft wirkt. Ist die Substanz starr, wird sie nicht verformt, da die Struktur dem erhöhten Druck standhält. Eisen ist zum Beispiel so eine Substanz, die sehr viel Druck aushält, ohne sich zu verformen. Wasser verformt sich bei erhöhtem Druck in einem derart geringen Maß, sodass Wasser für das Tauchen als nicht (wesentlich) komprimierbar gilt. Gase stattdessen verändern ihr Volumen stark, wenn sich der Druck auf das Gas verändert. Steigt der Druck, verringert sich das Gasvolumen, sinkt der Druck, vergrößert sich das Volumen des Gases. Druck und Volumen verhalten sich **umgekehrt proportional**, das heißt, steigt der Druck um einen bestimmten Faktor, vermindert sich das



Volumen um diesen Faktor und umgekehrt. Verdoppelt sich der Druck, halbiert sich dadurch das Volumen der Gase.

Druck und Dichte. Wenn ein Gas komprimiert wird und dadurch sein Volumen verringert, nimmt die Dichte des Gases zu. Die Anzahl der Moleküle bleibt konstant und sie müssen sich nun ein kleineres Volumen teilen. Dadurch müssen alle näher, also dichter zusammenrücken. Die Dichte der Gase nimmt mit zunehmender Tiefe **proportional** zu. Verdoppelt sich also der Druck, verdoppelt sich ebenfalls die Dichte der Gase.



Tiefe	Absoluter Druck	Volumen	Dichte
0 m	1 bar	1	1
10 m	2 bar	1/2	x2
20 m	3 bar	1/3	x3
30 m	4 bar	1/4	x4
40 m	5 bar	1/5	x5

Tabelle: Veränderung der Gasvariablen mit zunehmender Tiefe

Temperatur und Volumen. Wenn die Temperatur steigt, schwingen die Moleküle stärker und das Volumen vergrößert sich. Temperatur und Volumen verhalten sich somit ebenfalls **proportional** zueinander, das heißt, steigt die Temperatur, steigt auch das Volumen.

Temperatur und Druck. Wenn eine Volumenvergrößerung möglich ist, bleibt der Druck konstant, wenn sich die Temperatur erhöht. Ist ein Gas aber in einem verschlossenen Raum, der starr ist, erhöht sich der Druck des Gases, wenn die Temperatur erhöht wird. Druck und Temperatur verhalten sich also auch **proportional** zueinander, das heißt, je höher die Temperatur, desto so höher der Druck in einem starren verschlossenen Raum. Aber auch umgekehrt: Sinkt die Temperatur, sinkt der Druck. Wenn ein Gas unter Druck entweichen kann, vergrößert sich das Volumen und damit kühlt das Gas ab.

Der Druck-Temperatur-Volumen-Zusammenhang (Gesetz von Charles). Alle drei Einheiten beeinflussen sich gegenseitig, was in der folgenden mathematischen Formel dargestellt ist:

$$\frac{P \times V}{T} = \text{Konstant}$$

Absoluter Druck und Relativer Druck. Wir unterscheiden **absoluten** vom **relativen Druck**. Der absolute Druck ist der **Gesamtdruck**, der in einer bestimmten Tiefe auf uns wirkt. Das ist der Atmosphärendruck (1 bar) und die Wassersäule über uns (0,1 bar/m Salzwasser). In 10 m Tiefe

haben wir also 2 bar absoluten Druck. Der Relative Druck ist der **Druckunterschied** zur Oberfläche. Das ist die Wassersäule über uns. In 10 m Tiefe haben wir also 1 bar relativen Druck.

Gasmischungen. Wir atmen in der Regel immer ein Gasgemisch mit unterschiedlichen Gasen. Luft enthält 21 % Sauerstoff, 78 % Stickstoff und 1 % andere Gase (v. a. Argon). Letztere können wir vernachlässigen und dem Stickstoffanteil zuschlagen, da sie sich in dieser Menge nicht auf uns auswirken. Wenn Luft nun an der Meeresoberfläche 1 bar Druck ausübt, setzt sich dieser **Gesamtdruck** aus den **Teildrücken** des Sauerstoffs und des Stickstoffs zusammen (*Gesetz von Dalton*). Wir sprechen hier vom **Partialdruck** der einzelnen Gase – Sauerstoff übt 0,21 bar Druck aus und der Stickstoff 0,79 bar, entsprechend ihres prozentualen Anteils. Wenn wir Luft nun unter erhöhten Druck setzen, erhöhen sich auch die Partialdrücke der Einzelgase. Wenn wir auf 10 m abtauchen, verdoppelt sich der Gesamtdruck auf uns. Der Partialdruck des Sauerstoffs ist dann 0,42 bar und der des Stickstoffs 1,58 bar. Mit weiterer Tiefe erhöhen sich entsprechend die Partialdrücke.

Gase und Flüssigkeiten (*Gesetz von Henry*). Wenn Flüssigkeiten und Gase zusammentreffen und gleichzeitig im Raum bleiben, diffundieren Gasmoleküle langsam in die Flüssigkeit. Die Menge der Moleküle hängt vom Druck des Gases ab. Hier wird immer von den Molekülen ein Ausgleich angestrebt, das heißt, der Druck, der im Gas außerhalb besteht, wird sich auch in der Flüssigkeit einstellen. Beispielsweise ist im Wasser bei 1 bar Luftdruck der Druck der gelösten Luft im Wasser ebenfalls 1 bar. Erhöhen wir den Luftdruck auf 2 bar, erhöht sich der Druck der gelösten Gase auch auf insgesamt 2 bar. Die Diffusion der Gasmoleküle in die Flüssigkeit dauert etwas, der Druck wird aber am Ende ausgeglichen sein. Die Partialdrücke der einzelnen Gase in der Luft entsprechen dann auch den Partialdrücken in der Flüssigkeit.

Relativer tiefenabhängiger Druckanstieg. Der prozentuale Druckanstieg beim Abtauchen nimmt mit zunehmender Tiefe ab und umgekehrt nimmt der prozentuale Druckabfall beim Auftauchen mit abnehmender Tiefe zu. Der Druck nimmt linear von der Oberfläche in die Tiefe zu, nämlich um 0,1 bar pro Meter in Salzwasser. An der Oberfläche beträgt der Luftdruck 1 bar. Pro Meter Tiefe addieren wir nun immer 0,1 bar und können so den absoluten Druck berechnen. In 10 m herrscht 2 bar Druck, in 20 m 3 bar und so weiter. Schauen wir uns nun aber den prozentualen Druckunterschied: in 1 m Tiefe haben wir 1,1 bar Druck. Der Druck ist damit von der Tiefe 0 m zur Tiefe 1 m um 10% angestiegen. Jetzt befinden wir uns auf 25 m. Hier haben wir einen Druck von 3,5 bar. Jetzt gehen wir auf 26 m, also 1 m tiefer. Der Druck steigt entsprechend auf 3,6 bar. Der prozentuale Anstieg hier ist jedoch nur 2,8%. Im Vergleich zu dem Wert an der Oberfläche ist der relative Anstieg deutlich geringer. Das bedeutet, dass im Bereich von 0 bis 10 m die stärkeren Druckunterschiede bestehen. Das bemerken wir auch, indem wir in diesem Bereich viel häufiger einen Druckausgleich durchführen müssen und die Tarierung häufiger angepasst werden muss. Während in der Tiefe das deutlich weniger notwendig ist. Das bedeutet aber auch, dass der relative Druckabfall beim Aufstieg in geringerer Tiefe zunimmt. Dadurch lösen sich Gase aus unseren Geweben stärker und es braucht mehr Zeit, um diese Gasmenge abzuatmen.

3. Konsequenzen für das Tauchen

Das Wissen um das Verhalten von Gasen unter Druck ist beim Tauchen wesentlich. Unfälle beim Tauchen werden von den Wirkungen der Gasphysik verursacht. Um dies zu vermeiden,

müssen diese entsprechend berücksichtigt werden. Hier folgen nun die Ableitungen für das Tauchen.

Hohlräume im Körper. Wir haben Lufträume in den Ohren, den Nasennebenhöhlen und den Stirnhöhlen. Tauchen wir ab, erhöht sich der Umgebungsdruck und das Volumen in diesen Räumen wird kleiner. Hier müssen wir einen **Druckausgleich** vornehmen. Den aktiven Druckausgleich müssen wir für die Ohren vornehmen, indem wir gegen die zugehaltene Nase ausatmen und dadurch Luft in die Ohren drücken. Den Druckausgleich für die Lungen und die Nebenhöhlen führen wir durch die normale Atmung durch. Die Atemregler erhöhen den Luftdruck in der Luft, die wir einatmen. Diese Luft verteilt sich automatisch in der Lunge und in den Nebenhöhlen. Nur bei Schnupfen funktioniert das schlecht, daher dürfen wir bei einer verstopften Nase nicht tauchen. Um diesen Druckausgleich durchzuführen müssen wir **kontinuierlich ein- und ausatmen und niemals die Luft anhalten**. Das ist die wichtigste Regel beim Tauchen. Beim Auftauchen dehnt sich die Luft wieder aus und tritt aus den Hohlräumen inklusive der Ohren wieder aus, was normalerweise automatisch passiert.

Hohlräume in der Ausrüstung. In der Tauchmaske haben wir Luft, die durch den erhöhten Druck komprimiert wird. Das spüren wir als Druck im Gesicht. Hier blasen wir Luft durch die Nase in die Maske und machen somit einen Druckausgleich. In der Blase der Tarierweste haben wir auch Luft, die beim Abtauchen komprimiert wird. Um dem Abtrieb entgegenzuwirken, drücken wir etwas Luft in die Blase. Damit vergrößern wir unser Gesamtvolumen und bekommen wieder mehr Auftrieb. Auch die Luft in den Bläschen des Neoprens werden komprimiert, sodass wir etwas Gesamtvolumen verlieren, was zu erhöhtem Abtrieb führt. Das gleichen wir über die Tarierweste aus.

Abnehmender Gasdruck beim Einstieg ins Wasser. Wir gehen in der Regel mit 200 bar ins Wasser. Unter Wasser haben wir kaum geatmet und das Finimeter zeigt seltsamerweise 190 bar an. Dies hängt mit der Abkühlung der Flasche durch den Kontakt mit dem Wasser zusammen. Das Gas wird kühler und damit nimmt der Druck etwas ab (siehe Formel oben). Das Flaschenvolumen bleibt konstant.

Erhöhter Gasdruck. Wenn Gase unter höherem Druck geatmet werden, lösen sich diese Gase im Blut in erhöhter Konzentration. **Die gelösten Gase** im Blut können als solche im Körper wirken und werden weiter in die Gewebe abgegeben, sodass sich die Gaskonzentration in den Geweben erhöht. Stickstoff führt in der Tiefe zum so genannten **Tiefenrausch** durch seine direkte Wirkung auf das Zentralnervensystem. Möglicherweise wird diese Wirkung durch den erhöhten Sauerstoffdruck verstärkt. Beim Auftauchen müssen die gelösten Gase wieder aus dem Körper gebracht werden, was seine Zeit braucht. Wenn zu schnell aufgetaucht wird, kann es zur **Blasenbildung** in Geweben und im Blut kommen, was zu einer lebensgefährlichen **Dekompressionskrankheit** führen kann. Tech-Taucher benutzen zur Dekompression verschiedene Gase und verbleiben für definierte Zeiten in einer bestimmten Tiefe, um das gelöste Gas wieder abzuatmen. Um bestimmte Gefahren des erhöhten Gasdrucks zu minimieren, werden die **Tauchzeiten begrenzt**, mit **sauerstoffangereicherter Luft** getaucht und die **Tauchtiefen begrenzt**.

Nullzeit. Unter Nullzeit verstehen wir die Zeit, die wir auf einer bestimmten Tiefe bleiben können und am Ende direkt bis zur Oberfläche aufsteigen können, ohne dass wir Dekompressionskomplikationen bekommen. Die Aufstiegs geschwindigkeit ist dabei maximal 18 m/Minute. Dieser Wert wurde in der Vergangenheit zunächst einfach festgelegt und dann experimentell bestätigt. Wir können uns daher daran gut orientieren. Die unten genannten Tauchtabellen sind darauf abgestimmt. Aber Vorsicht: Die angegebenen Werte bieten **keine**

Sicherheit, sondern nur eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass an dieser Grenze keine Komplikationen eintreten. Letztlich gelten diese Werte als **Notfallprozedur**. Niemand sollte so tauchen. Es gilt, **niemals an die Grenzen der Tabellen zu gehen und immer sicher aufzutauchen**, das heißt, langsamer als 18 m/Minute (≤ 9 m/Minute) aufzusteigen und auf 5 m immer einen 3minütigen Sicherheitsstopp zu machen.

Sauerstoffangereicherte Luft (Enriched Air Nitrox, EANx). Es ist möglich und üblich, die Zusammensetzung der Atemluft in Pressluftflaschen zu verändern. Hier wird der Sauerstoffanteil (O_2) erhöht und damit der Stickstoffanteil (N_2) vermindert, was Vorteile und Nachteile mit sich bringt. Der Sauerstoffanteil wird typischerweise auf 32 oder 36 % angehoben. Bis zu 40 % ist beim einfachen Sporttauchen erlaubt. **Vorteil** ist, dass nun weniger Stickstoff geatmet wird und der Körper damit eine geringere Stickstoffbelastung hat. Dadurch können wir entweder länger auf einer bestimmten Tiefe bleiben (verlängerte Nullzeit) oder eine höhere Sicherheit vor Dekompressionskomplikationen haben (bei normaler Nullzeit für Luft). **Nachteil** ist, dass der Sauerstoff bei erhöhtem Partialdruck toxisch wirkt. Er kann vor allem zu einem **Krampfanfall** führen, der tödlich verlaufen kann. Zudem wirkt Sauerstoff auf das Lungengewebe toxisch. Deshalb müssen beim Tauchen mit EANx die **maximalen Tiefen** verringert werden. Bei 40 % Sauerstoff beträgt die maximale Tiefe 29 m. Da in der Regel mit weniger als 40 % O_2 getaucht wird, können wir uns 30 m als maximale Tiefe beim Tauchen mit EANx merken. Im EANx-Kurs lernst Du, die maximale Tiefe präzise zu berechnen. Dein Tauch-PC gibt sie dir sowieso an und warnt dich, wenn du den O_2 -Anteil eingibst.

Tauchtabelle und Tauch-PC. Es wurde eine umfangreiche Tauch-Forschung durchgeführt, um die Phänomene unter Wasser zu verstehen und das Tauchen sicherer zu machen. Eine wesentliche Hilfe war das Erstellen von Tauchtabelle, von den wir abgelesen können, wie lange wir Taucher auf einer bestimmten Tiefe bleiben können, ohne dass wir beim Auftauchen eine Dekompressionserkrankung erleiden. Dazu wurden theoretische Modelle entwickelt, die simulieren, wie groß die Sättigungskapazität, die Sättigungs- und Entsättigungsgeschwindigkeit verschiedener Gewebe sind. Moderne Tauch-Computer berechnen diese Modelle noch präziser mit Hilfe ihrer Software. Diese theoretischen Modelle wurden durch die Forschung bestätigt. Sie sind also anwendbar. Aber sie bilden nicht die reale Biologie ab, da keine Messungen im Körper erfolgen. Daher der Rat, nicht an die Grenzen der Modelle zu gehen, um mehr Sicherheit zu haben.

Aufstiegsgeschwindigkeit. Die Tauchtabelle sind so entwickelt worden, von 40 m direkt mit einer maximalen Aufstiegsgeschwindigkeit von 18 m pro Minute aufgetaucht werden kann. Das Risiko einer Dekompressionskrankheit ist dabei minimal, aber eben nicht null. Daher sind diese 18 m/Min. heute für einen kontrollierten Notfallaufstieg sinnvoll, aber nicht für die normalen Aufstiege. Hier gilt aktuell **9 m/Min.** als Richtwert. Aufgrund der relativen Druckunterschiede kann aber in der Tiefe schneller aufgestiegen werden, während dann im 10 m Bereich der Aufstieg immer langsamer durchgeführt werden sollte, also auch weniger als 9 m/Minute. Es soll immer ein **Sicherheitsstopp auf 5 m über mindestens 3 Minuten** erfolgen, um auf dieser Tiefe und in dieser Zeit im Körper gelöstes Gas abzuatmen. Die modernen Tauchcomputer berechnen die Aufstiegsgeschwindigkeit tiefenabhängig und geben uns über unsere Aufstiegsgeschwindigkeit eine Rückmeldung. Wir tun gut daran, uns an die PC-Vorgaben zu halten. Das bedeutet z. B., dass die Aufstiegsgeschwindigkeit von 5 m zur Oberfläche 2,5 m/Min. beträgt. Damit senken wir das Risiko einer Dekompressionskrankheit deutlich.

Atmung in größerer Tiefe. Der Druck nimmt mit der Tiefe zu. Diese Druckzunahme wird durch die Atemregler ausgeglichen, indem der Luftdruck angepasst wird. Dadurch wird das Gas **dichter** und damit **schwerer zu atmen**. Moderne Atemregler sind technisch so ausgelegt, dass trotzdem bequem geatmet werden kann. Die Atemarbeit nimmt aber durch diese erhöhte Gasdichte zu. Daher ist es wichtig, sich gut zu entspannen, um die körperliche Anstrengung nicht wesentlich zu erhöhen. Es wird zudem aufgrund desselben Volumens der Lunge **mehr Gas pro Atemzug** verbraucht und die Luftmenge in der Flasche nimmt schneller ab als in einer geringeren Tiefe. Hier muss der Finimeter in kurzen Intervallen überprüft werden und frühzeitig wieder aufgestiegen werden.

D Licht

1. Hintergrund

Wir tauchen ab, um die schöne Unterwasserwelt zu sehen und zu beobachten. Viele Taucherinnen und Taucher wollen zudem die Flora und Fauna fotografieren. Dazu müssen wir die physikalischen Eigenschaften des Lichts im Wasser kennen, um uns da unten gut zurechtzufinden.

2. Physik

Licht: Licht gehört zu den elektromagnetischen Wellen und ist der von uns Menschen sichtbare Teil des gesamten elektromagnetischen Wellenspektrums (Wellenlänge 400 bis 760 Nanometer). Wir sehen die Farben Violett bis Rot, wobei Violett kürzere Wellenlängen als Rot hat. Violett ist auch energiegeladener als rot.

Licht und Wasser. Wenn Licht in Wasser eindringt ergeben sich dabei verschiedene Phänomene: **Lichtbrechung**, **Farbverluste**, **Reflexion** und **Streuphänomene**. Das hat verschiedene Ursachen, die im Folgenden dargestellt werden.

Lichtbrechung (Refraktion). Wenn ein Lichtstrahl in Wasser eintaucht, wird die Geschwindigkeit des Lichts etwas reduziert und der Strahl dadurch abgelenkt. Nur wenn dieser senkrecht auf die Wasseroberfläche eindringt, läuft er weiter geradeaus. Das Phänomen wird **Lichtbrechung** genannt. Dies geschieht auch, wenn Licht aus dem Wasser in Luft eindringt, z. B. in unserer Tauchbrille. Das Licht muss dabei auch noch durch das Glas. Die Brechung, die dabei passiert, sorgt dafür, dass wir die Dinge größer und näher sehen, als sie in Wirklichkeit sind. Wir sehen die Dinge unter Wasser etwa **33 % größer** und **25 % näher**. Das Gehirn kann mit der Zeit lernen, die Entfernung und die Größe besser zu berechnen.

Farbverlust (Absorption). Wenn Licht in Wasser eindringt, werden einzelne Wellenlängen vom Wasser absorbiert oder stark abgelenkt. Das sind vor allem die längeren Wellenlängen, also Rot, Orange und Gelb. Grün und Blau gelangen sehr tief ins Wasser, daher erscheint das Wasser blau bis blaugrün. Unser Gehirn kann das etwas kompensieren, sodass wir uns wundern, wenn wir Bilder gemacht haben und diese extrem bläulich sind. Die Elektronik kann das kaum kompensieren. Nur circa 20 % des Sonnenlichts erreicht 10 m Wassertiefe. In der Tiefe wird es dann letztlich dunkel.

Reflexion. Licht wird von Oberflächen reflektiert. Hier kann es zu **Blendphänomenen** kommen. Oberflächen absorbieren bestimmte Wellenlängen und andere reflektieren sie. So bekommen sie ihre eigene Farbe. Gegenstände unter Wasser absorbieren und reflektieren.

Lichtstreuung. Viele Schwebeteilchen führen zur **Trübung**, was die Sichtweite und die Lichtintensität stark beschränkt. Diese Schwebeteilchen **streuen** das Licht, indem das Licht an diesen abgelenkt wird. Das führt auch auf Distanz zu einer **Unschärfe** unter Wasser. Wasser

mit starker Trübung erscheint grün-gelb, klares Wasser dagegen blau. Trübung kann dazu führen, dass unser Gehirn ein Objekt entfernter wahrnimmt als es in Wirklichkeit ist. Das wird **Visuelle Umkehr** genannt. Das Gehirn kann mit der Zeit lernen, die Entfernung und die Größe besser zu berechnen.

3. Konsequenzen für das Tauchen

Die prächtigen Farben haben wir im Bereich von 0 bis 5 m. Dann nimmt der Rotbereich merklich ab und wir brauchen Licht, um den Farbverlust zu kompensieren. Wenn wir künstliches Licht mit unter Wasser nehmen, kommen die Farben auf kurze Distanzen wieder zurück. Daher brauchen wir für Film und Foto Lampen. Und wenn wir selbst live mehr Farben sehen wollen, benötigen wir auch eine Lampe beim Tauchen.

Trübung schränkt die Sicht ein, was den Tauchgang beeinträchtigen kann. Hier ist keine Kompensation möglich. Die Sichtweite bestimmt der Wasserzustand.

Wir müssen uns an die optischen Phänomene gewöhnen, um Entfernungen und Objektgrößen richtig einzuschätzen. Das braucht Zeit und wir können uns immer wieder auch verschätzen.

E Schall

1. Hintergrund

Um die Richtung von Geräuschen orten zu können, benötigen wir einen zeitlichen Abstand des Eintreffens der Schallwellen in unseren beiden Ohren. Nur so kann das Gehirn die Richtung berechnen. Unter Wasser ist das leider nicht möglich.

2. Physik

Schall und Wasser: Schall ist eine molekulare Stoßwelle. In Luft stoßen die Luftmoleküle aneinander und im Wasser die Wassermoleküle. Da Wasser im Vergleich mit Luft deutlich dichter ist, überträgt Wasser den Schall **4mal so schnell** wie Luft. Dadurch ist es uns kaum möglich, die Richtung eines Geräusches zu orten.

3. Konsequenzen für das Tauchen

Wir können Geräusche in der Regel nicht orten und müssen uns umsehen, wenn wir die Quelle eines Geräusches identifizieren wollen, z. B. eine Schiffsschraube. Wir können uns unter Wasser auch nicht unterhalten, da unsere Stimmbänder nicht genügend Energie aufbringen, um die Wassermoleküle anzustoßen. Es gibt aber eine Funklösung bei Ganzgesichtsmasken.

F Wasser

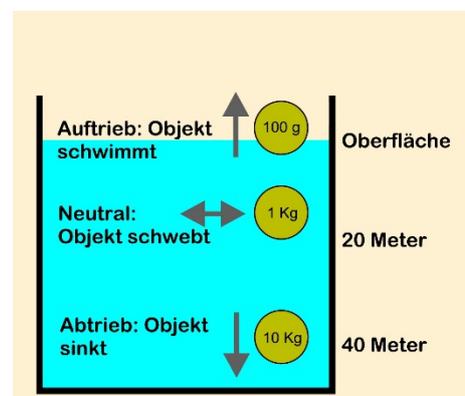
1. Hintergrund

Wenn wir tauchen, begeben wir uns in das Element Wasser und werden von dessen Eigenschaften bestimmt. Daher müssen wir die Eigenschaften des Wassers kennen, um sicher zu tauchen.

2. Physik

Wasser: Wasser besteht aus 2 Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom (H_2O). Dieses Molekül hat herausragende Eigenschaften. Aufgrund der molekularen Struktur ergibt sich eine **Polarisierung**, sodass es auf einer Seite etwas negativ und auf der anderen Seite positiv geladen ist. Das wiederum führt dazu, dass sich die Wassermoleküle aneinander anlagern und sich durch die elektrischen Anziehungskräfte zusammengehalten werden. Das führt zu einer **Oberflächenspannung**, die es ermöglicht, dass leichte Insekten darauf laufen können ohne einzusinken. Diese Oberfläche hält Wassertropfen zusammen. Durch die Polarität lösen sich viele andere polare Substanzen leicht in Wasser. Wasser hat dadurch ein hohes **Lösungsvermögen**. Nicht-polare Substanzen, wie bspw. Öl, lösen sich dagegen nicht in Wasser. Seife kann Wasser mit nicht-polaren Substanzen verbinden, sodass sich diese Stoffe doch lösen. Durch die Polarität hat Wasser eine hohe **Wärmekapazität**, da diese elektrische Verbindung durch die Zufuhr von Energie erst einmal gelöst werden muss. Dadurch können die Ozeane Temperaturschwankungen gut kompensieren und halten die Temperatur der Erde relativ konstant. Wenn Wasser erhitzt wird, verringert sich die Dichte und es steigt auf. Dadurch entstehen Wasserbewegungen aber auch Dichteschichtungen (**Thermocline, Sprungschicht**). Beispielsweise gibt es in den Seen immer eine Sprungschicht von relativ warmem Wasser im Oberflächenbereich in eine Kaltwasserschicht in der Tiefe (circa um 6 bis 8 m). Dichteschichtungen können auch durch unterschiedliche Lösungskonzentrationen entstehen, z. B. zwischen Salzwasser und Süßwasser (**Halocline**) in meernahen Höhlensystemen.

Auftrieb. Wenn wir Objekte ins Wasser werfen, sinken diese oder schwimmen an der Oberfläche. Archimedes (griech. Mathematiker) hat festgestellt, dass immer eine nach oben gerichtete Kraft auf in Wasser eingetauchte Objekte wirkt. Diese Kraft wirkt der Schwerkraft entgegen und entspricht dem Gewicht des verdrängten Volumens durch das Objekt. Ist das Gewicht des verdrängten Wassers größer als das Gewicht des Objekts wird es schwimmen. Es hat **positiven Auftrieb**. Ist das Gewicht des Objekts größer als das Gewicht des verdrängten Wassers, sinkt es. Es hat **negativen Auftrieb**



oder Abtrieb. Entsprechen sich die Gewichte, wird das Objekt schweben. Es hat dann **neutralen Auftrieb**. Da Salzwasser schwerer als Süßwasser ist, haben Objekte in Salzwasser einen stärkeren Auftrieb als in Süßwasser.

3. Konsequenzen für das Tauchen

Wir müssen prüfen, ob wir mit unserer Tauchausrüstung positiven oder negativen Auftrieb haben. Wir gleichen das mit Luft in der Tarierweste und mit Bleigewichten aus. Um an der Oberfläche zu schwimmen, wird die Tarierweste aufgeblasen. Um abzutauchen, wird diese Luft wieder abgelassen. Sinken wir dann nicht, müssen wir Bleigewichte anlegen, um mehr Gewicht zu bekommen und so zu sinken. Wir müssen so viel Gewicht mitnehmen, dass wir mit einer Flasche, die noch 50 bar Luft enthält, und einer leeren Tarierweste immer noch einen leichten negativen Auftrieb haben. Nur so steigen wir nicht ungewollt auf und können die gewünschte Tiefe halten. In Salzwasser benötigen wir mehr Gewicht als in Süßwasser.

Um nicht auszukühlen, verwenden wir eine brauchbare Schutzausrüstung. Auf mögliche Sprungschichten bereiten wir uns entsprechend vor oder bleiben in der wärmeren Schicht.

Mit frischem Süßwasser können wir unsere Ausrüstung spülen und von Salz und Schmutz befreien. Ggf. können wir auch Reinigungsmittel nutzen, um Verschmutzungen zu entfernen.

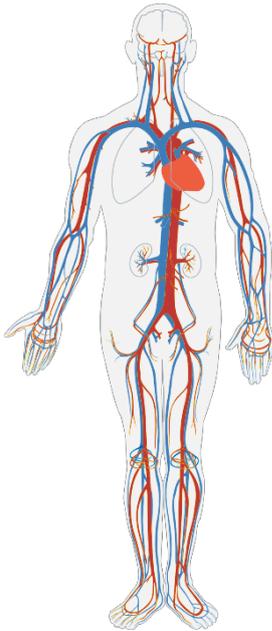
Kapitel 2

Die physiologischen Grundlagen

A Das Herz-Kreislauf-System

1. Anatomie und Physiologie

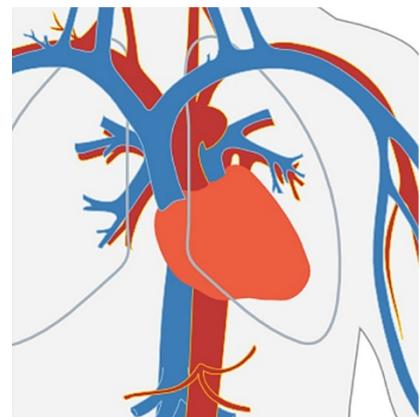
Das Herz-Kreislauf-System wird beim Tauchen mehr belastet als an der Oberfläche. Daher ist es sinnvoll, die wesentlichen Faktoren zu kennen.



Blut. Das Blut besteht aus den **Blutkörperchen** und dem **Blutplasma**. Die **roten Blutkörperchen** (Erythrozyten) enthalten den Stoff **Hämoglobin**, der Sauerstoff sehr gut bindet. Ohne dieses Hämoglobin müsste das Blut 15-20mal schneller fließen, um alle Gewebe mit Sauerstoff zu versorgen. Das Blut verteilt den Sauerstoff aus der Lunge im Körper und transportiert Kohlendioxid (CO₂), das Endprodukt der Stoffwechselprozesse, von den Geweben in die Lunge, wo das CO₂ abgeatmet wird. Das Hämoglobin verändert seine Farbe abhängig von der Sauerstoffbindung. Sauerstoffreiches Blut in den Arterien ist **hellrot**, sauerstoffarmes Blut in den Venen **bläulich-dunkelrot**. Neben den roten Blutkörperchen enthält das Blut noch **weiße Blutkörperchen** (Leukozyten), die für die Immunabwehr zuständig sind, und die **Thrombozyten**, die das Blut bei Verletzungen gerinnen lassen. Im **Plasma** sind verschiedene Substanzen gelöst, auch der Stickstoff aus der Atemluft.

Die Gefäße. Wir unterscheiden die **Arterien**, die **Kapillaren** und die **Venen**. Die Arterien transportieren das sauerstoffreiche Blut vom Herzen in den Körper. Die Gewebe sind von kleinen Gefäßen, den arteriellen Kapillaren, durchzogen und werden so mit Sauerstoff versorgt. Diese arteriellen Kapillaren gehen dann in die venösen Kapillaren über. Die venösen Kapillaren nehmen Kohlendioxid auf. Dieses Blut fließt dann in die größeren Venen, die das Blut wieder zum Herzen und weiter durch die Lunge transportieren.

Das Herz. Das Herz besteht aus zwei Pumpen. Die rechte Pumpe lässt das Blut durch die Lungen fließen, wo Sauerstoff aufgenommen und Kohlendioxid abgeatmet wird. Die linke Pumpe verteilt das sauerstoffreiche Blut über die Arterien im Körper. Die Pumpleistung des Herzens erzeugt in den Arterien Druck, den so genannten Blutdruck. Dieser Druck wird in Torr gemessen (mm Hg – Millimeter Quecksilbersäule). Wenn das Herz pumpt (sog. Systole) erzeugt es einen hohen Druck, der dann wieder abnimmt, sobald sich das Herz wieder entspannt (sog. Diastole). Es bleibt aber immer ein Druck auf den Gefäßen. Der normale Blutdruck geht systolisch bis maximal 140 mm Hg und diastolisch bis maximal 90 mm Hg. Wenn wir uns anstrengen, werden beide Werte natürlich höher, da mehr Blut von den Muskeln benötigt wird. Wenn wir uns entspannen, sinkt der Blutdruck wieder auf normale



Werte. Das Herz schlägt etwa 60 bis 80 Schläge pro Minute in Ruhe (sog. Herzfrequenz), bei Anstrengung geht diese Frequenz hoch. 180 Schläge pro Minute sollten nicht überschritten werden. Je älter wir werden, desto geringer ist dieser Grenzwert.

Blutdruck unter Wasser. Da der Wasserdruck auf den Körper wirkt, indem er diesen etwas zusammendrückt, wird der **Blutdruck** im Körper **etwas höher**. Nur so kann die Gewebeversorgung aufrecht erhalten bleiben. Wenn wir aufgeregt sind, wirkt sich das natürlich auch blutdruckerhöhend aus. Daher müssen wir uns entspannen, damit sich der Blutdruck wieder normalisiert. Beides sind natürliche Prozesse. Insgesamt kann der Körper den leicht erhöhten Druck gut ab. Wenn wir gesund sind, ist hier nicht mit Komplikationen zu rechnen.

2. Konsequenzen für das Tauchen

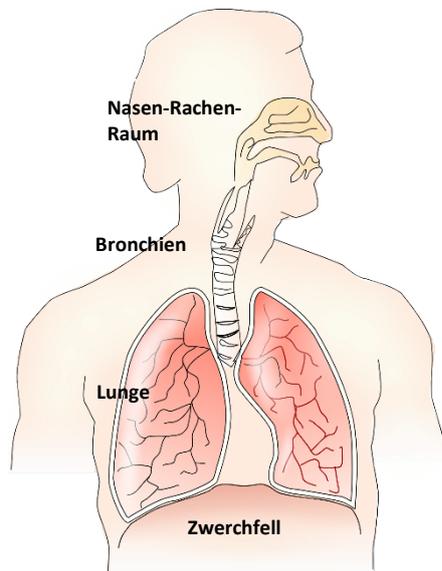
Ärztliche Untersuchungen. Ist aber ein Taucher vorerkrankt (Herzprobleme, hohen Blutdruck, Gefäßprobleme, Lungenerkrankungen, Ohrenerkrankungen etc.), muss eine **tauchärztliche Untersuchung** durchgeführt und die **Tauchtauglichkeit** festgestellt werden. Nur dann darf der Betroffene tauchen. Es ist sinnvoll, regelmäßig ärztliche Untersuchungen durchzuführen. Es gilt bis zum 40. Lebensjahr alle zwei Jahre, danach jährlich. Die Tauchschnulen verlangen mindestens eine unauffällige **medizinische Selbstauskunft**, aber auch ärztliche Zeugnisse bei bekannten körperlichen Problemen.

Entspannung. Freizeittauchen soll eine **entspannende Tätigkeit** sein. Daher dürfen und sollen wir uns beim Tauchen aktiv entspannen. Dadurch sinkt der Blutdruck und die Herzfrequenz, was sich wiederum günstig auf unseren Luftverbrauch auswirkt. Wir entspannen die Muskulatur und atmen ruhig und regelmäßig. Wir vermeiden unter Wasser Anstrengungen und bewegen uns langsam und gemächlich vorwärts. Es kann sinnvoll sein, ein **Entspannungsverfahren** und ein spezielles **Atemtraining** zu erlernen und dann vor und während des Tauchens anzuwenden (Atemtechniken, Autogenes Training o. ä.).

Sport. Wir müssen gesundheitlich fit sein, um gut tauchen zu können. Daher empfiehlt es sich regelmäßig **Ausdauertraining** und auch ein **Muskelaufbautraining** zu machen. Das hilft auch bei einer gesunden Gewichtsregulierung.

B Das Atmungssystem

1. Anatomie und Physiologie



Anatomie. Das Atmungssystem besteht aus dem Nasen-Rachen-Raum, den Bronchien, dem Lungengewebe und der Atemmuskulatur. Die Atemmuskulatur (Zwerchfell und Zwischenrippenmuskulatur) erzeugt einen Unterdruck, sodass Luft in die Lungen einströmen kann. Zunächst strömt die Luft durch die Nase und wird dort angefeuchtet und ggf. von größeren Teilchen befreit. Dann kommt die Luft in die Bronchien, die die Luft weiter in das Lungengewebe verteilen. Das Lungengewebe wird zu den Alveolen hin immer dünner, damit der Gasaustausch funktionieren kann. Dadurch kann aber Gewebe auch einreißen, wenn der Druck in der Lunge zu hoch wird (Barotrauma der Lunge). Das kann durch Atemanhalten beim Aufstieg passieren oder durch einen Verschluss bei Entzündungen mit Schleimbildung.

Gasaustausch. Der Körper benötigt Sauerstoff für die inneren Stoffwechselprozesse. Das Endprodukt des Stoffwechsels ist dann Kohlendioxid. Um Sauerstoff ins Blut und Kohlendioxid aus dem Blut zu bekommen, wird die Lunge benötigt. Die Atemluft gelangt in die Lunge und trifft dort auf die Alveolen, die eine große Oberfläche haben, an der der Gasaustausch stattfinden kann. Die Lunge muss also gesund sein, damit der Gaswechsel funktioniert. Die Gase der Atemluft gelangen ins Blut, indem es hier einen Druckausgleich gibt. Die Konzentration des Sauerstoffs ist jedoch deutlich höher, da dieser an das Hämoglobin der roten Blutkörperchen gebunden wird. Stickstoff und die Restgase der Atemluft lösen sich entsprechend ihres Partialdruckes im Blutplasma. Da diese Gase nicht in den Stoffwechsel eingebaut werden, bleiben sie in dieser Konzentration im Blut und diffundieren aber auch in die Gewebe, bis ein Gleichgewicht hergestellt wird.

Stickstoff. In der Luft hat der Stickstoff einen Partialdruck von 0,78 bar. Im Blut und in den Geweben herrscht ebenfalls ein Stickstoff-Partialdruck von 0,78 bar. Das ist für uns aber völlig problemlos. Wir bekommen davon auch nichts mit. Nur in einer hohen Konzentration durch einen hohen Partialdruck in der Tiefe (ab circa 30 m) wirkt der Stickstoff auf das Zentralnervensystem, was dann zum Tiefenrausch führen kann.

Kohlendioxid. Da die Kohlendioxidkonzentration in der Atemluft geringer als im Blut ist, diffundiert das CO_2 in der Lunge nach außen und wird dann ausgeatmet.

Sauerstoff. Im Blutplasma ist auch Sauerstoff gelöst, das spielt aber an der Oberfläche keine Rolle für unseren Körper. Zudem wird der Sauerstoff von den Zellen verbraucht. Dadurch sinkt seine Konzentration im Blut. Das betrifft den an Hämoglobin gebundenen und den im Plasma gelösten Sauerstoff. Werden hohe Konzentrationen eingeatmet, kann sich der Sauerstoff

toxisch auswirken: Einerseits kann das durch seine Wirkung im ZNS zu einem **Krampfanfall** führen, der häufig tödlich endet. Andererseits wirkt Sauerstoff **toxisch** auf das **Lungengewebe**, was aber beim Tauchen eine untergeordnete Rolle spielt, da die Einwirkzeit in der Regel zu kurz ist.

Kohlenmonoxid. Kohlenmonoxid entsteht bei Verbrennungen und ist giftig für uns. In sehr seltenen Fällen kann dieses Gas in die Pressluftflasche geraten, wenn die Kompressoren in einem schlechten Zustand sind. Leider ist dieses Gas geruchlos. Es besetzt das Hämoglobin der roten Blutkörperchen, sodass weniger Sauerstoff gebunden werden kann. Eine Kohlenmonoxid-Vergiftung kann somit zum Tod durch inneres Ersticken führen. Die Symptome sind Atemnot und blaugefärbte Haut, was den Sauerstoffmangel anzeigt.

Regulation der Atmung. Laien glauben häufig, dass die Atmung durch die Sauerstoffkonzentration geregelt wird. Dies stimmt jedoch nicht. Die Atmung wird durch die **Kohlen-dioxidkonzentration** geregelt. Steigt die CO₂-Konzentration im Blut an, kommt es zu einem Atemimpuls. Die CO₂-Konzentration wird vom Körper durch das Atmen möglichst konstant gehalten. Wenn wir uns anstrengen, erhöht sich die CO₂-Konzentration, sodass wir mehr atmen müssen. Entspannen wir uns, sinkt die Konzentration und die Atmung wird ruhiger.

Hyperventilation. Wenn wir willkürlich längere Zeit schnell atmen, wird sehr viel CO₂ abgeatmet, was sich auf die Konzentration von gelösten Stoffen im Körper negativ auswirkt. Dadurch kommt es zu den typischen Hyperventilationssymptomen: Schwindel, Benommenheit und Muskelkrämpfe. Das klingt dramatisch, ist es aber nicht. Wer im Stress aber hyperventiliert, wird diese Symptome zum Anlass nehmen, sich noch mehr aufzuregen, da er sie fehlinterpretiert. Wichtig ist hier, sich zu entspannen und ruhig, regelmäßig und mitteltief zu atmen.

2. Konsequenzen für das Tauchen

Gasnarkose (Tiefenrausch). Ab etwa **30 m Tiefe** wirken die aufgenommenen Gase auf das Zentralnervensystem narkotisierend und führen zu einem **berauschten Zustand** mit **eingeschränktem Denk- und Handlungsvermögen**. Hauptsächlich wird dafür der Stickstoff verantwortlich gemacht. Aber auch die anderen Gase können diese Wirkung erzeugen und verstärken die Stickstoffwirkung. Der Zustand selbst ist nicht gefährlich, aber die Auswirkungen: Es wird zu langsam und/oder falsch auf auftretende Probleme reagiert, sodass es zu Unfällen kommt, die auch zum Tod der Betroffenen führen können. Wenn wir auf 30 bis 40 m abtauchen, müssen wir immer an diese Reaktionen denken und bei uns selbst und beim Buddy darauf achten. Oftmals bemerken die Betroffenen die Symptome bei sich nicht. Bei Auftreten muss über die 30 m Grenze aufgetaucht werden, dann verschwinden die Symptome schnell wieder. Es ist sinnvoll eine **Tieftauchkurs** zu absolvieren und unter Anleitung die eigenen Reaktionen zu erfahren. Wer regelmäßig tief taucht, bei dem stellt sich wahrscheinlich eine gewisse **Gewöhnung** an diese Effekte ein, sodass hier dann auch sicher getaucht werden kann. **Alkohol-** und **Drogenkonsum** verstärken die Anfälligkeit. Es ist also sinnvoll, darauf zu verzichten. Das trifft auch auf bestimmte **Medikamente** zu. Hierzu muss eine tauchärztliche Beratung erfolgen.

Sauerstoffangereicherte Luft (EANx). Um die Stickstoffwirkung auf das ZNS zu vermindern und weniger Stickstoff in die Gewebe aufzunehmen, wird die Pressluft mit Sauerstoff angereichert (22 bis maximal 40 % O₂). Damit haben Taucher eine **verlängerte Nullzeit** oder

eine **erhöhte Sicherheit**, wenn sie den Tauchgang auf die Luft-Nullzeit begrenzen. Auf alle Fälle muss die Tauchtiefe begrenzt werden. Als Richtwert können wir uns **30 m** merken (maximale Tiefe bei 40 % O₂ beträgt 29 m), da die O₂-Konzentration in der Regel bei 32 bis 36 % liegt. Der Tauchcomputer zeigt uns die Werte an, wenn wir die Konzentration vor dem Tauchgang eingegeben, was wir immer tun sollten.

Sauerstofftoxizität. Erhöhte Sauerstoffkonzentrationen haben wir, wenn wir mit **sauerstoffangereicherter Luft** (EANx) tauchen. Hier muss auf die maximale Tiefe geachtet werden, die begrenzt wird. Der maximale O₂-Partialdruck soll 1,6 bar nicht überschreiten, was die Wahrscheinlichkeit für einen Krampfanfall deutlich reduziert. Aus Sicherheitsgründen wird der maximale pO₂ in der Praxis auf **1,4 bar** begrenzt. Danach werden die maximalen Tiefen der Gemische berechnet.

Hyperventilation durch Stress. Es ist sinnvoll bei sich selbst und bei anderen auf Anzeichen von Stress zu achten. Die Ursachen des Stresses müssen aufgedeckt und entsprechend Lösungen dafür gefunden werden. Nur wenn wir entspannt oder mit einer angemessenen Aufregung ins Wasser gehen, können wir sicher tauchen. Natürlich ist jeder für seine Stressreaktion verantwortlich und nur sie bzw. er können hier gegenregeln.

Hyperventilation vor einem Apnoe-Tauchgang. Beim Apnoe-Tauchen wurde früher empfohlen, vor dem Tauchgang zu hyperventilieren, um einerseits mehr Sauerstoff aufzunehmen. Dies ist jedoch falsch. Sauerstoff ist im Blut immer in fast maximaler Konzentration vorhanden. Die Konzentration kann nicht mehr merklich erhöht werden. Durch die Hyperventilation wird aber CO₂ abgeatmet, was die Konzentration im Blut senkt. So kommt es zu einem später einsetzenden Atemimpuls, was zu einem Black-Out führen kann, wenn die Sauerstoffkonzentration vorher zu niedrig geworden ist. Das tritt vor allem beim Auftauchen auf, da dabei der O₂-Partialdruck in der Lunge sinkt. Daher sollten langsam ein bis drei tiefe Atemzüge gemacht werden, um die Lunge gut zu belüften. Mehr aber nicht.

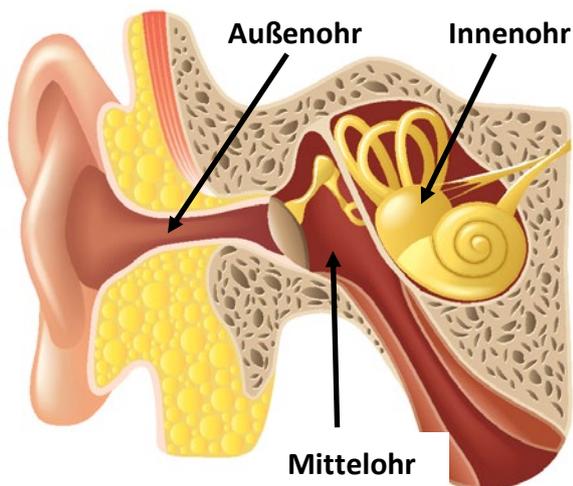
Kontinuierliches Atmen. Die **wichtigste Regel** beim Tauchen lautet, **halte niemals den Atem an – atme immer kontinuierlich ein und aus**. Dadurch wird der Gasaustausch gesichert und auch in der Lunge und in den Nasennebenhöhlen Druckausgleich hergestellt. Verletzungen der Lunge werden so vermieden. Die Atmung sollte langsam und tief sein, um die Lunge gut zu belüften. Gleichzeitig beruhigt uns diese Art der Atmung. Es empfiehlt sich, ein Atemtraining zu absolvieren, um diese Art von Atmung zu lernen. Das spart unter Wasser Luft, sodass länger getaucht werden kann.

Saubere Atemluft. Wir dürfen nur Luft benutzen, die ein regelmäßig gewarteter Kompressor, der die Gase in der Atemluft reinigt und die Konzentrationen misst, in die Flasche presst. Der Abfüller muss vertrauenswürdig sein. Kohlenmonoxid ist geruchlos. Trotzdem sollte an der Luft geschnuppert werden. Wenn diese komisch oder gar übel riecht, darf mit dieser Luft nicht getaucht werden. Es muss dann untersucht werden, was los ist. Sollten unter Wasser seltsame Symptome auftreten, sollte sofort aufgetaucht werden. Daran denken, dass bei kontaminierter Luft alle Taucher der Gruppe betroffen sind, sodass alle gefährdet sind!

C Die Ohren

1. Anatomie und Physiologie

Anatomie. Wir unterscheiden das **äußere Ohr**, das **Mittelohr** und das **Innenohr**. Das äußere Ohr ist der Gehörgang bis zum Trommelfell. Das Mittelohr ist der luftgefüllte Teil zwischen dem Trommelfell und dem Knochen. Über die eustachische Röhre, die mit dem Rachen verbunden ist, wird ein Druckausgleich hergestellt. Im Knochen befindet sich das Innenohr, das mit Flüssigkeit gefüllt ist und keinen Kontakt zur Außenwelt hat. Das Trommelfell überträgt die Schwingungen des Schalls über drei kleine Knöchelchen auf eine ovale Membran in das Innenohr. Zum Druckausgleich dieser Schwingungen gibt es eine weitere Membran (rundes Fenster), die Kontakt zum Innenohr hat. Im Innenohr befindet sich auch unser Gleichgewichtsorgan.



Über die eustachische Röhre, die mit dem Rachen verbunden ist, wird ein Druckausgleich hergestellt. Im Knochen befindet sich das Innenohr, das mit Flüssigkeit gefüllt ist und keinen Kontakt zur Außenwelt hat. Das Trommelfell überträgt die Schwingungen des Schalls über drei kleine Knöchelchen auf eine ovale Membran in das Innenohr. Zum Druckausgleich dieser Schwingungen gibt es eine weitere Membran (rundes Fenster), die Kontakt zum Innenohr hat. Im Innenohr befindet sich auch unser Gleichgewichtsorgan.

Druckausgleich. Der Gehörgang hat direkten Kontakt zur Außenwelt, sodass sich eine Druckänderung sofort bemerkbar macht. Erhöht sich der Druck, dehnt sich das Trommelfell nach innen ein. Erniedrigt sich der Druck, wölbt sich das Trommelfell nach außen. Damit das Trommelfell seine Arbeit machen kann und nicht platzt, hat das Mittelohr Kontakt zum Rachen. Jedoch ist diese Verbindung nicht ständig offen, sondern wird durch eine Lippe verschlossen. Durch Schlucken oder Gähnen öffnet sich dieser Verschluss und Luft kann ausgetauscht werden. Wenn der Druck im Rachen erhöht wird, öffnen sich der Verschluss ebenfalls und Luft dringt in das Mittelohr. Dies machen wir regelmäßig und früh beim Abstieg. Nimmt der Außendruck ab, öffnet sich die Lippe aufgrund des Druckunterschieds von selbst und die Luft kann so entweichen.

2. Konsequenzen für das Tauchen

Druckausgleich. Durch die Veränderung des Außendrucks, wird die Luft im Mittelohr komprimiert. Die Eindellung des Trommelfells erleben wir ab einem bestimmten Druck als schmerzhaft. Soweit soll es nicht kommen. Daher machen wir früher schon einen aktiven Druckausgleich, indem wir die Nase zuhalten und ausatmen. Dadurch erhöht sich der Druck im Rachen und der Verschluss öffnet sich, sodass Luft ins Mittelohr einströmen kann. Das wiederholen wir während des Abstiegs mehrfach. Das Ohr darf nicht schmerzen, ansonsten

müssen wir wieder etwas auftauchen. **Niemals mit viel Kraft den Druckausgleich durchführen.** Wenn der Druckausgleich mit Kraft erzwungen werden soll, kann das **runde Fenster** platzen, was neben dem Schmerz sofort zu erheblichen Problemen mit dem Gleichgewichtssinn führt. Das ist ein lebensgefährlicher Notfall unter Wasser. Daher immer einen **sanften Druckausgleich** durchführen und bei Bedarf wieder **etwas auftauchen**, vor allem, wenn das Ohr schmerzt. Wenn der Innendruck beim Auftauchen ansteigt, öffnet sich der Verschluss automatisch und lässt Luft in den Rachen ab. Wenn die Schleimhäute geschwollen sind (schnupfen, Allergie) kann der Druckausgleich nur schwer oder gar nicht durchgeführt werden. Daher besteht Tauchverbot bei Schleimhautschwellungen. Abschwellende Mittel dürfen nicht benutzt werden, da diese unter Wasser ihre Wirkung verlieren können und es zu einer **Umkehrblockierung** kommen kann: Die Luft in den Nebenhöhlen und im Mittelohr kann beim Auftauchen aufgrund der Schwellung nicht mehr entweichen. Auch das führt zu Schmerzen und kann zu Verletzungen führen.

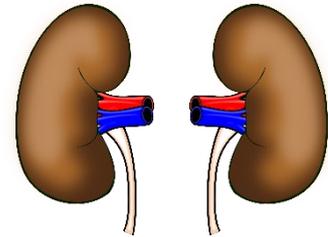
Weitere Druckausgleichstechniken. Wenn der Druckausgleich mit der oben beschriebenen Technik nicht klappt, können die folgenden anderen Techniken ausprobiert werden:

- Mehrfach wiederholtes Schlucken und dabei den Unterkiefer hin und her bewegen
- Aktives Gähnen
- Kräftiges Ausschnäuzen in die Tauchermaske hinein wie beim Nasenputzen

Sollten alle Techniken nicht zum Erfolg führen, muss der Tauchgang abgebrochen werden.

D Der Wasserhaushalt

Physiologie. Für den Wasserhaushalt sind die **Nieren** zuständig, die Wasser und Abfallstoffe über die Blase ausscheiden. Der Blutdruck sorgt dafür, dass in der Niere Wasser aus dem Blut in die Blase drainiert wird. Wenn der Blutdruck steigt, wird mehr Wasser ausgeschieden. Durch **Schwitzen** in heißen Gebieten verlieren wir auch Wasser über die Haut. Dieses Wasser muss ersetzt werden.



Unter Wasser. Durch den Wasserdruck steigt der Blutdruck im Körper etwas an, was zu einer erhöhten Wasserausscheidung führt. Gerade wenn wir Wiederholungstauchgänge machen, kommt es zu einer erhöhten Urinproduktion. Daher ist es wichtig, **vor und nach dem Tauchgang genügend Wasser zu trinken.**

An der Oberfläche. Durch Schwitzen verlieren wir Wasser, das wir wieder zuführen müssen.

Alkohol. Alkohol hat eine negative Wirkung auf die Nieren: Die **Wasserausscheidung** wird **verstärkt** und fördert damit die Dehydratation, was zu Folgeschäden beim Tauchen führen kann, vor allem eine mögliche Bildung eines **Blutgerinnsels** (Herzinfarkt, Schlaganfall, Gefäßverstopfung) und die Erhöhung der Auftrittswahrscheinlichkeit einer **Dekompressionserkrankung** beim Auftauchen. Alkohol sollte daher erst zeitlich nach den Tauchgängen in angemessenen Mengen konsumiert oder ganz darauf verzichtet werden.

E Die Wärmeregulation

Physiologie. Der Körper hält die Körpertemperatur konstant zwischen 36° und 37° Celsius. Wenn wir in einer warmen Umgebung sind, muss der Körper gekühlt werden, was durch das **Schwitzen** erfolgt. Der Schweiß auf unsere Haut verdunstet und kühlt so den Körper. Um flüssiges Wasser in Wasserdampf umzuwandeln wird Energie benötigt, die aus der Wärme des Körpers gewonnen wird. Dadurch kühlt der Körper ab. Je feuchter die Umgebung ist, desto schwieriger wird dieser Prozess, da die Luft den Wasserdampf aufnehmen muss. Deshalb schwitzen wir in den Tropen sehr stark, was aber nur eine geringe Kühlung bewirkt. In der trockenen Hitze der Wüste ist schwitzen dagegen sehr effektiv. Um gut schwitzen zu können, benötigen wir genügend Wasser, das wir trinken müssen. Der Energieumsatz ist von Mensch zu Mensch verschieden, daher gibt es Menschen, die schneller auskühlen, und Menschen, die viel Wärme produzieren und dadurch weniger schnell auskühlen. Genauso gibt es Menschen, die leicht und viel schwitzen, und andere, die wenig schwitzen. Die Wärmeregulation ist also sehr individuell und somit auch das Wärme- bzw. Kälteempfinden.

Unter Wasser. Da Wasser Wärme 4mal so gut leitet im Vergleich mit Luft, kühlen wir unter Wasser schneller aus (Hypothermie). Daher benötigen wir einen **Wärmeschutz**, das heißt, einen den Temperaturen angemessenen Tauchanzug. In warmen Gewässern reicht meistens ein Shorty oder ein maximal 3 mm dicker langer Tauchanzug. In kälteren Gewässern müssen dann schon 5 bis 7 mm oder mehr an Anzugdicke verwenden. Zudem kommen Handschuhe und eine Kopfhaube. In kalten Gewässern benötigen wir einen Trockentauchanzug mit dicker Unterwäsche, um uns warmzuhalten.

An der Oberfläche. Bei warmen Temperaturen können wir mit einem Tauchanzug schnell überhitzen (**Hyperthermie**), was bis zum Hitzschlag führen kann. Daher sollten wir diesen erst kurz vor dem Tauchgang anziehen und ggf. uns mit Wasserspülungen kühlen, bis wir ins Wasser gehen. Unter Umständen müssen wir den Anzug öffnen oder ihn wieder zügig ausziehen. Aber auch ohne Anzug können wir überhitzen, daher müssen wir uns vor direkter Sonneneinstrahlung schützen. Wichtig ist, **vor und nach dem Tauchgang gut zu trinken**, um nicht zu dehydrieren.

Hypothermie. Wenn der Körper auskühlt, produziert er als Gegenregulation innere Wärme. Dazu fangen die Muskeln an zu **zittern**. Diese Muskelbewegung erzeugt Wärme. Wenn wir also frieren und bereits zittern, sind wir schon deutlich unterkühlt und müssen uns zügig aufwärmen. Wenn der Körper weiter auskühlt, kann das zu einem lebensgefährlichen Zustand führen.

Hyperthermie. Wenn der Körper zu warm ist, versucht er durch Schwitzen die Wärme abzuführen. Gelingt das nicht mehr, überhitzt der Körper, was zu einem lebensgefährlichen Hitzschlag führen kann. Kühlung ist bei Überhitzung zügig notwendig: Schatten spenden, mit Wasser oder sogar Eis kühlen und trinken.

Anhang

Literatur und Theorie-Kurse

1. Literatur

Kromp, T. & Mielke, O. (2019). Tauchen – Das Handbuch für ein Taucherleben. Stuttgart: Kosmos Verlag.

PADI (Hrsg.) (2008). Die Enzyklopädie des Sporttauchens. Bristol: PADI Verlag.

2. Theorie-Kurse

Die verschiedenen Tauchorganisationen bieten spezielle Tauchtheorie-Kurse an, die mittlerweile online absolviert werden. Hier die Kurse der beiden größten Tauchorganisationen:

PADI eLearning-Kurs: Dive-Theory

SSI Online Kurs: Science Of Diving