

Physik des Tauchens

Ulli

4. Januar 2006

Zusammenfassung

In diesem Handout findet ihr nochmal eine Zusammenfassung der für's Tauchen wichtigen physikalischen Zusammenhänge. Druck spielt beim Tauchen eine weitaus wichtigere Rolle, als beim Schwimmen. Daher wird er hier relativ ausführlich behandelt. Letztendlich kommen wir auch um die eine oder andere Formel nicht herum, wenn wir abschätzen wollen, wie lange wir mit einem bestimmten Flaschendruck tauchen können. Anders als die übliche Literatur für Rettungsschwimmer und Taucher sollen hier allerdings nicht nur ein paar physikalische Phänomene genannt werden, sondern auch ergründet werden, warum es so ist. Ab und an sind in den Text *Kästen für Spezialisten* eingefügt. Sie sollen besonders wissbegierigen als Zusatzinformation dienen und keinesfalls abschreckend wirken.

1 Wärmeleitung im Wasser

Im Zusammenhang mit der Kombination *Wärme* und *Wasser* haben wir alle schon mal die Erfahrung gemacht, dass wir Wasser oft als sehr viel kälter empfinden, als die angeblich gleichwarme Luft. Auf der anderen Seite wird uns im Wasser mit üblicher Schwimmbadtemperatur trotz körperlicher Höchstleistung kaum jemals unangenehm warm – wie allzuoft bei landgebundenen Sportarten.

Die Ursache liegt bei der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit von Wasser und Luft: Wasser leitet Wärme etwa 25 mal besser als Luft. D.h. es leitet auch Körperwärme etwa 25 mal besser aus dem Körper heraus ins meistens sehr viel kältere Wasser, als das an der Luft der Fall wäre. Das heißt zwar nicht, dass uns 25 mal so schnell kalt wird wie an der Luft, denn der Körper kann in gewissem Maße gegensteuern (z.B. Engstellung der Hautgefäße, für Genaueres sei hier aber auf die biologischen Grundlagen verwiesen).

Die gute Wärmeleitfähigkeit des Wassers hat auch Bedeutung für die Erste-Hilfe; insbesondere im Bereich der Wasserrettung. Sie führt im Extremfall dazu, dass unser Körper in z.B. 15 °C *kalt*em Wasser nach etwa 6 Stunden wegen Unterkühlung den Dienst quittiert. Bei 0 °C Wassertemperatur wäre das bereits nach 30 - 60 Minuten der Fall.

Wehren kann man sich dagegen z.B. durch einen Neoprenanzug, welcher wie ein Widerstand für elektrischen Strom einen Widerstand für Wärme darstellt und somit die Wärmeabgabe verringert.

2 Hören unter Wasser

Wasser verändert unsere Sinneswahrnehmung: Hören ist unter Wasser kaum mit dem Hören an Land vergleichbar. Sicher hat jeder schon mal die Erfahrung gemacht, dass sich plätscherndes Wasser von der Unterseite ganz anders anhört als von der Oberseite. Vielleicht war der eine oder andere ja schon mal in einem Schwimmbad, in dem unter Wasser Musik lief – derjenige wird dabei festgestellt haben, dass die Musik sehr hell und blechern, eben überhaupt nicht wie an der Luft klingt. Und er wird wohl auch festgestellt haben, dass er die Richtung, in welcher der Lautsprecher zu finden gewesen wäre, nicht bestimmen konnte.

Um etwas besser verstehen zu können, warum das so ist, klären wir als erstes, was wir eigentlich wahrnehmen, wenn wir hören: Wenn ein Geräusch erzeugt wird, entstehen dabei Schallwellen. Diese werden von der Luft geleitet und gelangen so ins Ohr. Dieses erzeugt daraus Nervenimpulse, aus denen unser Gehirn dann das von uns wahrgenommene Geräusch interpretiert.



Wie der Begriff *Schallwelle* schon sagt, handelt es sich dabei um Wellen. In der Tat verhalten sich Schallwellen ganz ähnlich wie Wellen auf dem Wasser. Folgendes Gedankenexperiment soll uns als Anschauungshilfe dienen: Nehmen wir einen Stein und werfen ihn ins Schwimmbaden (in dem vorher vorzugsweise keine Wellen sein sollen). Wie zu erwarten war, bewegt sich eine kreisförmige Welle vom *Einschlagpunkt* des Steines weg. Wir können als erstes feststellen, dass die Wellen-

höhe, sagen wir mal ganz grob, von der Steingröße abhängt. Wir können außerdem feststellen, dass sich die Welle mit einer konstanten Geschwindigkeit durch das Schwimmbaden bewegt. Auch in fünf Meter Entfernung ist diese Geschwindigkeit immer noch die selbe. Was sich jedoch mit der Entfernung ändert ist die Höhe der Wellen!

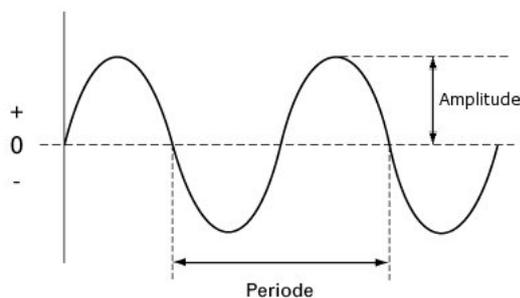
Versuchen wir uns nun mal darin, dass soeben beobachtete auf Schallwellen zu übertragen: Als Pendant zu unserem Stein nehmen wir zum Beispiel

mal eine auf den Boden aufschlagende Knallerbse. Ganz grob handelt es sich hierbei wie beim Stein um eine näherungsweise punktförmige Wellenquelle - eben eine Quelle für Schallwellen. Der kreisförmigen Bewegung der Wasserwelle auf der flachen (zweidimensionalen) Wasseroberfläche entspricht hier eine kugelförmige Ausbreitung der Schallwelle durch den Raum. Statt einer Auf- und Abbewegung der Wasseroberfläche äußert sich die Welle in Luft durch minimale Luftdruckschwankungen (im Wasser wären es natürlich minimale Wasserdruckschwankungen). Wir können diese weder sehen, noch fühlen; nur das Ohr ist empfindlich genug, um die wirklich kleinen Druckunterschiede wahrzunehmen.

Für Spezialisten ein paar Formeln

Alle anderen können diesen Kasten gestrost überpringen

Wellen kann man durch wenige physikalische Größen charakterisieren: Eine Schallwelle besteht aus einzelnen Schwingungen. Eine Schwingung, die ein Wellental und einen Wellenberg enthält heißt auch Periode.



Beim Schall ist zum einen die **Amplitude** A von Bedeutung. Sie gibt die Stärke der Luftdruckschwankung, also in etwa die Lautstärke an. Das zweite wesentliche Charakteristikum ist die **Frequenz** f . Sie ist der Kehrwert der **Periodendauer** T , die angibt, wie lange eine Schwingung (einmal Wellenberg und Wellental) dauert:

$$f = \frac{1}{T}$$

Wir können Töne mit Frequenzen von etwa 16 Hz bis 20 kHz wahrnehmen. Hz steht für die Einheit Hertz; sie steht für Perioden pro Sekunde, gibt also an wieviele Schwingungen pro Sekunde am Ohr ankommen.

Um die Ausbreitung von Wellen betrachten zu können, brauchen wir die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** c der Schallwelle. Wie oben schon gesagt wurde, ist sie für verschiedene Medien unterschiedlich. Schall breitet sich in Luft z.B. mit 330 m/s aus. Analog zu $v = s/t$ lässt sich aus Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit die Wellenlänge λ (sprich: *lambda*) bestimmen:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad \Leftrightarrow \quad \lambda = c \cdot T = \frac{c}{f}$$

Die Angabe von Wellenlängen statt der Frequenz ist z.B. beim Licht oder z.T. auch in der Funk- und Fernmeldetechnik üblich.

Auch die Schallwelle bewegt sich mit einer gleichbleibenden Geschwindigkeit. In der Luft sind dies etwa 330 Meter pro Sekunde. (Das kennt sicher jeder: Aus der Zeit zwischen Blitz und Donner lässt sich so ganz einfach die Entfernung zum Blitz errechnen.) Genauso wie die Wellenhöhe mit der Entfernung abnimmt, nimmt auch die Stärke der Luftdruckänderung ab, was nichts anderes bedeutet, als dass der Schall mit wachsendem Abstand immer leiser wird.

Wenden wir uns nun wieder den ursprünglichen Fragen nach dem Hören unter Wasser zu: Wasser leitet verschiedene Frequenzen (Tonhöhen) unterschiedlich gut – deutlich anders als die Luft. Daher klingen Geräusche unter Wasser anders als an der Luft: Hohe Töne kann man gut hören, tiefe weniger gut. Dies ist eine Eigenschaft an die man sich gewöhnen kann, wie an ein altes Radio oder das Telefon. Da werden auch nur bestimmte Frequenzen übertragen, die Stimme des Anrufers klingt quäkig und anders als in Natura, aber man kann sich trotzdem verständigen.

Und warum funktioniert nun das Richtungshören unter Wasser nicht? Schallwellen werden unter Wasser sehr viel schneller geleitet, als in Luft. Unser Richtungshören beruht zum größten Teil darauf, dass eine von links kommende Schallwelle zum rechten Ohr geringfügig länger braucht als zum linken. Im Wasser wird dieser *Laufzeitunterschied* durch die höhere Schallgeschwindigkeit so klein, dass das Gehirn ihn nicht mehr wahrnehmen kann.

3 Licht und Lichtabsorbtion

Jedem der schon mal mit Tauchgerät in größere Tiefen vorgedrungen ist, dürfte dabei aufgefallen sein, dass dort unten alles recht blau ist.



Abbildung 1: Kalle an der Oberfläche, in 10 m und in 30 m Tiefe.

Offensichtlich verändert Wasser das Sonnenlicht mit zunehmender Tiefe. Um zu verstehen, warum das so ist, müssen wir uns wieder zunächst damit befassen, was Licht eigentlich ist.

Kurzes Kramen im Gedächtnis befördert die Erkenntnis zu Tage, dass weißes Licht aus den Regenbogenfarben zusammengesetzt ist – und dass ein Regenbogen nur so bunt ist, weil er das Sonnenlicht wieder in seine Bestandteile zerlegt. Genau wie es die Wassertropfen im Regenbogen tun, kann man mit einem Prisma weißes Licht in seine Bestandteile zerlegen. Die Herstellung von weißem Licht aus z.B. rot, grün und blau (daher RGB-Farben im Computer) nennt sich dann additive Farbmischung (im Gegensatz zur subtraktiven Farbmischung im Tuschkasten).

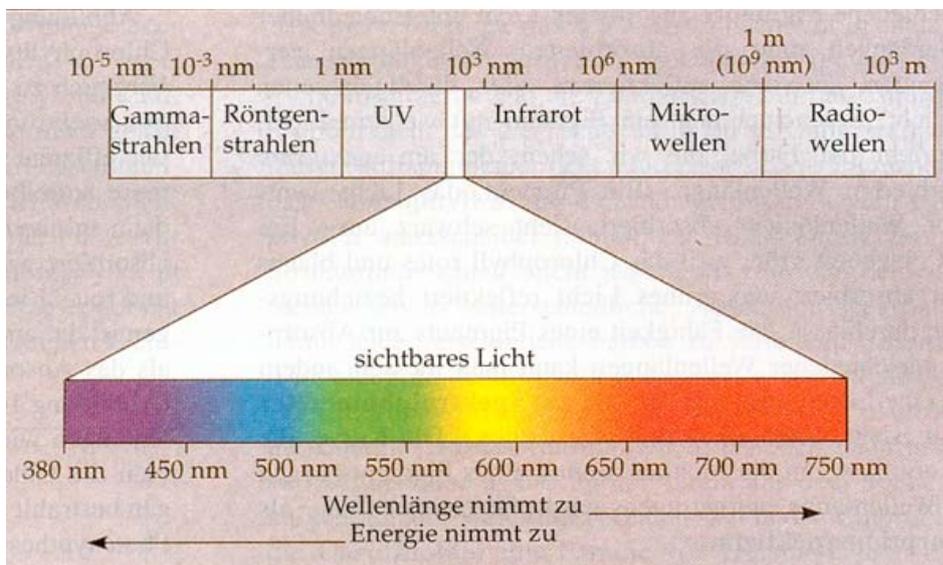


Abbildung 2: Das Spektrum des sichtbaren Lichtes. Nach links schließt sich ans blau das nicht mehr sichtbare ultraviolette Licht an. An den rechten, roten Rand des sichtbaren Spektrums schließt sich das infrarote Licht an.

Wenn wir uns obige Bilder von Kalle nochmal betrachten, dann fällt auf, dass in 30 Meter Wassertiefe von den Regenbogenfarben nur noch die blaue übrig ist. Die anderen sind verschwunden, verschluckt oder auf schlau auch vom Wasser *absorbiert*. Offensichtlich vermag das Wasser zwischen verschiedenen Farben zu unterscheiden: Wasser absorbiert rotes und gelbes Licht sehr viel stärker als etwa grünes oder blaues. D.h. mit zunehmender Tiefe verschwindet zuerst rotes Licht, dann gelbes, als nächstes grünes, bis eben nur noch blaues Licht übrig ist. Freilich absorbiert Wasser auch das blaue Licht noch um Längen besser, als Luft; darum ist es in 1000 m Wassertiefe stockfinster, unter einer kilometerdicken Atmosphäre aus Luft hingegen herrscht im wahrsten Sinne des Wortes helllichter Tag.

Noch ein Beispiel: Rot ist bereits in geringer Wassertiefe nicht mehr rot, sondern...? Man könnte jetzt blau sagen, stimmt aber nicht. Rote Gegenstände verschlucken alle Farben außer rot und reflektieren nur das rote Licht; deswegen sehen sie für uns rot aus. Das Wasser absorbiert in größerer Tiefe jedoch dieses rote Licht. Bleibt am Ende nichts übrig, auch besser bekannt als schwarz!

Sonnenbrand

Bekanntlich kann man sich Licht auch als stetigen Strom kleinster Lichtteilchen oder *Lichtquanten*, den Photonen, vorstellen. Je heller es ist, desto mehr Photonen fliegen umher. Diese Photonen haben die Eigenschaft, dass sie umso mehr Energie tragen, je kleiner die Wellenlänge ist, also je blauer sie sind. Trifft ein rotes Photon oder auch ein Photon im infraroten Bereich auf die Haut, so wird es noch in der Hornhaut absorbiert und seine Energie in Wärme umgewandelt – unter einer Wärmelampe wird einem daher warm. Ein ultraviolettes Photon hat mehr Energie, als ein infrarotes und kann daher tiefer in die Haut eindringen. Unter Umständen hat es, wenn es auf die tieferen Hautschichten trifft, sogar noch genug Energie um Atome aus ihren Verbindungen zu stoßen und so die Moleküle, aus denen die Haut aufgebaut ist zu beschädigen. Die Folgen sind verbrennungsartige Symptome, die wir alle als Sonnenbrand kennen.

Ultraviolette Photonen können durchaus in die Zellkerne der Hautzellen vordringen und dort die DNA beschädigen. Zwar besitzt der Körper sehr wirkungsvolle Reparaturmechanismen, aber es kann durchaus vorkommen, dass so ein DNA-Schaden übersehen wird. Kommt es an der falschen Stelle zu einer solchen *Mutation*, so kann Hautkrebs die Folge sein.

3.1 Lichtbrechung

Wenn wir unter Wasser ohne Tauchmaske die Augen öffnen, bemerken wir sofort eine Folge der Lichtbrechung: Das Auge kann mit den veränderten Brechnungsverhältnissen unter Wasser nicht allzuviel anfangen und alles wirkt verschwommen.

Doch was heißt eigentlich Lichtbrechung? Licht wird nicht im Wasser selber gebrochen, sondern immer an der Grenze zwischen Medien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften, einer sogenannte Phasengrenze – z.B. der Wasseroberfläche oder der Vorderseite der Tauchmaske gebrochen. Auch die Grenze von Tauchmaskenglas zum luftgefüllten Innenraum der Maske stellt eine solche Grenze dar. Anschaulich heißt Lichtbrechung nun nichts anderes, als dass ein Lichtstrahl an einer solchen Grenze mehr oder weniger stark seine Richtung ändert. Es befindet sich also ein Knick im Strahl, als ob er an der Stelle *gebrochen* ist.

Licht als Welle

Licht hat eine zunächst etwas merkwürdig anmutende Eigenschaft. Es verhält sich sowohl wie ein Teilchen, als auch wie eine Welle. Das ist typisch für quantenmechanische Teilchen, wie das Photon eines ist. Um beim Beispiel Sonnenbrand zu bleiben: Das Entstehen von Hautschäden ist am besten erklärbar, indem man sich Licht als kleine Teilchen vorstellt, die mit den Hautmolekülen kollidieren und sie dadurch beschädigen.

Andererseits verhält sich Licht in vielen Bereichen wie eine Welle. Die Beugung am Spalt und die Dispersion, die im Prisma bzw. Regentropfen das weiße Licht in seine Bestandteile zerlegt sind ebenso klassische Welleneigenschaften, wie die Lichtbrechung am Übergang zwischen verschiedenen Medien. In der Tat handelt es sich bei Licht um eine elektromagnetische Welle.

Eine Welle hat eine Frequenz. Oben beim Schall hatten wir aus Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit die Wellenlänge bestimmt. Das geht beim Licht genauso; die Lichtgeschwindigkeit in Luft ist etwa $c \approx 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. Über $\lambda = \frac{c}{f}$ erhält man wie oben die Wellenlänge des Lichtes. Es ist bei Licht sogar üblich statt der Frequenz die Wellenlänge anzugeben. Daher ist im oben abgebildeten Spektrum als Achsenbeschriftung auch nur die Wellenlänge eingetragen.

Der Schwimmer auf nebenstehender Abbildung hält zwei Lampen, die exakt parallel ausgerichtet sind. Eine Lampe befindet sich jedoch über, die andere unter der Wasseroberfläche. Ein Lichtstrahl beginnt also bereits unter der Wasseroberfläche und strahlt nach rechts. Der andere über Wasser startende Lichtstrahl wird an der Wasseroberfläche gebrochen und steigt von diesem *Knick* aus viel steiler nach unten.



Oben haben wir optische Eigenschaften erwähnt. Die entscheidende Eigenschaft ist an dieser Stelle die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts in den verschiedenen Medien. Je dichter nämlich ein Medium ist, desto langsamer bewegt sich darin das Licht. Wasser ist erheblich dichter als Luft; also bewegt sich das Licht in Wasser wesentlich langsamer, als in Luft. Der Dichteunterschied zwischen Wasser und Tauchmaskenglas ist hingegen nicht so groß; daher vernachlässigen wir die Brechung am Wasser-Glas-Übergang in den nachfolgenden Betrachtungen.

Zuerst sehen wir uns eine sehr anschauliche Erklärung für die Lichtbrechung an. Licht ist auch eine Welle – eine elektromagnetische Welle. Im

Gegensatz zu den runden Wellen, mit denen wir uns die Schallausbreitung erklärt haben, betrachten wir nun eine annähernd gerade, räumlich begrenzte Wellenfront einer Lichtwelle. Wellen breiten sich immer senkrecht zu den Wellenfronten aus (das kann man wieder sehr anschaulich mit Wasserwellen demonstrieren). In der ersten Abbildung bewegt sich die Wellenfront im optisch dünneren Medium (Ausbreitungsgeschwindigkeit ist höher) auf das optisch dichtere Medium (Ausbreitungsgeschwindigkeit ist niedriger) zu. Da die Lichtwelle schräg eintrifft, dringt zuerst ihr linkes Ende in das optisch dichtere Medium ein. Während das rechte Ende den verbleibenden Weg zum Übergang zurücklegt, bewegt sich natürlich auch das linke Ende weiter – allerdings langsamer, als das rechte. Hat das rechte Ende schließlich das optisch dichtere Medium erreicht, bewegen sich beide Enden wieder gleich schnell. Da wir wissen, dass die Ausbreitungsrichtung der Welle senkrecht zur Wellenfront ist, sehen wir nun, dass sich die Richtung geändert hat.

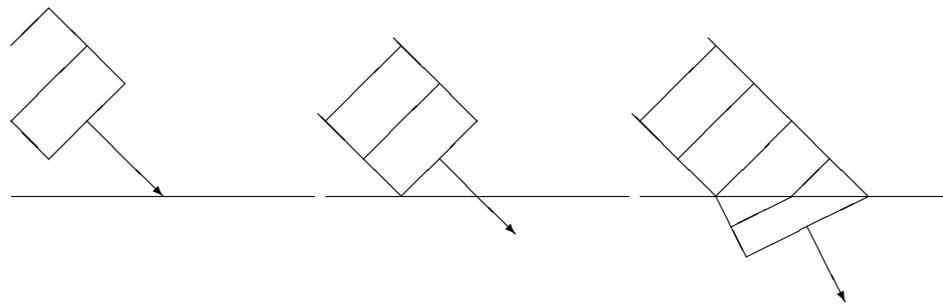


Abbildung 3: Eine Wellenfront verändert die Richtung, wenn sie sich aus einem optische dünneren Medium (z.B. Luft) in ein optisch dichteres (z.B. Wasser) bewegt.

Wir können daraus vier Dinge folgern:

- Eine senkrecht zur Phasengrenze eintreffende Welle ändert ihre Richtung nicht.
- Eine Welle die aus einem optisch dünneren in ein optisch dichteres Medium *fliegt*, wird zum Lot¹ hin gebrochen.
- Eine Welle die aus einem optisch dichteren in ein optisch dünneres Medium *fliegt*, wird vom Lot weg gebrochen.
- Einen Schritt weiter gedacht, muss es auch einen Einfallswinkel geben, an dem die Welle so stark vom Lot weg gebrochen wird, dass die ausfallende Welle sich genau parallel zur Phasengrenze bewegen

¹Hier ist das senkrecht auf der Phasengrenze stehende Lot gemeint

würde. Tatsächlich bewegt sie sich nicht in der Phasengrenze, sondern wird ab diesem *kritischen Winkel* an der Phasengrenze total reflektiert. (Auch das lässt sich unter Wasser eindrucksvoll mit einer handelsüblichen Taucherlampe demonstrieren).

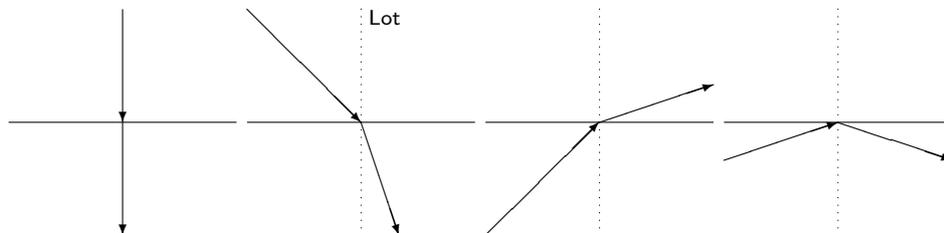


Abbildung 4: 1. Keine Brechung bei senkrechtem Eintritt; 2. Brechung zum Lot hin beim Übergang von optisch dünneren zu optisch dichterem Medium; 3. Brechung vom Lot weg beim Übergang vom optisch dichteren ins optisch dünnere Medium; 4. Totalreflektion

Nun können wir erklären, warum wir unter Wasser nur verschwommen sehen. Beim Übergang von Luft zum Auge wird ein einfallender Lichtstrahl zum Lot hin gebrochen. Das menschliche Auge ist für den Gebrauch an der Luft ausgelegt und daher so konstruiert, dass die abgebildete, punktförmige Lichtquelle von der Linse scharf auf die Netzhaut abgebildet wird (durchgezogene Strahlen). Da das Auge zum größten Teil aus Wasser besteht, unterscheiden sich Wasser und Auge in ihren optischen Eigenschaften nur unwesentlich voneinander. Beim Übergang vom Wasser ins Auge wird das Licht somit nicht mehr gebrochen und die Lichtquelle kann nicht mehr scharf auf die Netzhaut abgebildet werden (gestrichelte Strahlen).

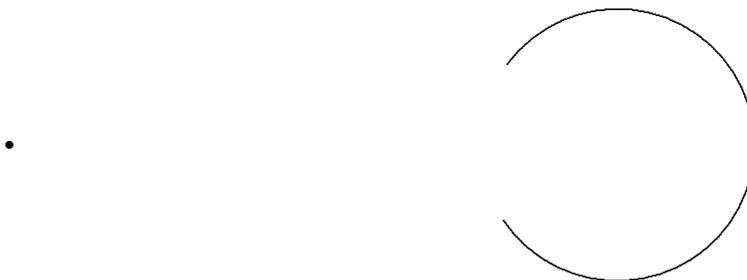


Abbildung 5: Unter Wasser ist das Auge extrem weitsichtig. Schematischer Strahlengang folgt noch; bis dahin selber malen.

Stellen wir durch eine Tauchmaske den gewohnten Luft-Hornhaut-Übergang am Auge wieder her, so können wir wieder scharf sehen. Allerdings

nicht ganz so, wie das an der Oberfläche der Fall wäre, denn das Licht wird auch am Übergang von der optisch dichteren Tauchmaske zu optisch dünnerer Luft gebrochen (nämlich vom Lot weg). Die zweite Folge der Lichtbrechung ist daher eine Lupenwirkung: Alles unter Wasser scheint um ein Drittel größer bzw. um ein Drittel näher, als es tatsächlich ist.

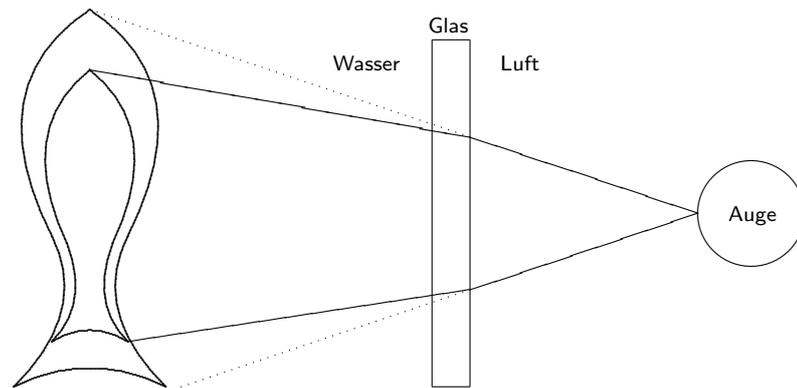


Abbildung 6: Durch die Lichtbrechung am Übergang von Tauchmaskenglas zu Luft (durchgezogene Linie) erscheint der Fisch größer (gestrichelte Linie), als er ist.

4 Auftrieb

Die Alltagserfahrung sagt uns, sehr vereinfacht gesagt, dass Dinge, die *leichter* als Wasser sind, aufsteigen; z.B. Luftblasen.

So ist das natürlich nicht richtig, denn 2 kg Luft sind schwerer, als 1 kg Wasser und trotzdem steigt die Luft auf. *Leichter* heißt physikalisch korrekt, dass der betreffende Gegenstand eine geringere *Dichte* als das Wasser hat; d.h. dass ein bestimmtes Volumen Luft weniger Masse (und damit weniger Gewichtskraft) hat, als das gleiche Volumen Wasser. Andersherum sinken Dinge, die schwerer sind als Wasser nach unten; so z.B. ein Stein. Mit schwerer meinen wir natürlich *dichter*. Vielleicht sollten wir der Eindeutigkeit halber auch in Zukunft immer von Dichte anstatt von Schwere sprechen.

Dichte ist aber offensichtlich nicht alles, sonst würde auch das Stahlrumpfboot untergehen. Hier müssen wir beachten, dass das Boot luftgefüllt ist und damit offensichtlich doch leicht genug zum Schwimmen ist.

Schon Archimedis (287-212 v.Chr.) hatte dies erkannt. Laut einer Überlieferung stellte König Hieron II ihm die Aufgabe zu bestimmen, ob seine Krone aus reinem Gold oder aus einem billigeren Material hergestellt wurde. Dies kann man relativ einach durch die Bestimmung der Dichte der

Newton

Für das gleich folgenden Beispiel wollen wir uns noch kurz die Maßeinheit für Kraft anschauen: Newton, kurz: N. Wir verzichten auf eine genauere physikalische Definition und merken uns nur, dass ein 1 kg schwerer auf einem Tisch stehender Gegenstand mit einer Gewichtskraft von etwa 10 N auf die Tischplatte drückt. (In Wirklichkeit sind es in unseren Breiten 9,81 N; für uns reicht jedoch die Rundung auf 10 N mit der sich zudem viel besser rechnen lässt.)

Nun also das versprochene Beispiel: Eine Rettungsweste hat in aufgeblasenem Zustand ein Volumen von etwa 16 l. Vollständig unter Wasser gedrückt verdrängt sie also 16 kg Wasser. Das führt zu einer Auftriebskraft von etwa einer Gewichtskraft von 160 N. Unterstellen wir der Weste jetzt noch, dass sie selbst ein Kilogramm wiegt, was etwa 10 N *Abtrieb* bedeutet, so bleiben noch 150 N übrig, die uns an der Wasseroberfläche halten. Newton, die internationale Einheit für Kraft, ist übrigens das gebräuchlichste Maß für die Klassifizierung von Rettungswesten.

Auch ein Gegenbeispiel soll nicht fehlen: Ein Stein habe ein Volumen von 0,5 l; dies entspricht 0,5 kg Wasser. Der Stein hat also durch die Verdrängung von 0,5 l Wasser 5 N Auftrieb. Da er jedoch selber 2 kg wiegt, hat er einen Abtrieb von 20 N. Somit sinkt der Stein nach unten.

Krone feststellen, denn die Dichte ist für jedes reine Material charakteristisch. Problematisch ist es jedoch, die Dichte der unregelmäßig geformten Krone zu bestimmen, ohne sie zu zerstören. Der Erzählung nach kam Archimedis beim Baden der entscheidende Geistesblitz, worauf hin er nackt durch die Straßen von Syrakus lief und laut *Heureka* („Ich habe es gefunden!“) ausrief. Das Ergebnis wurde als *Archimedisches Prinzip* bekannt:

Ein Körper, der teilweise oder ganz in eine Flüssigkeit eingetaucht ist, erfährt eine Auftriebskraft, deren Betrag gleich der Gewichtskraft der verdrängten Flüssigkeit ist.

Unkommentiert könnte nun der eine oder andere ganz frech daherkommen und behaupten, unser Stein würde auch schwimmen. Da der Stein schließlich Wasser verdrängt, hat er auch eine Auftriebskraft. Tatsächlich aufsteigen tut ein Gegenstand aber nur, wenn die so ermittelte Auftriebskraft größer ist, als die eigene Gewichtskraft, die bekanntlich nach unten zieht.

Ein Beispiel: Ein Taucher hat sich so austariert, dass er weder Auf- noch Abtrieb hat. Man könnte behaupten, er habe (zumindest im Durchschnitt) die gleiche Dichte, wie das ihn umgebende Wasser. Nimmt er nun einen tiefen Atemzug, so verringert er seine durchschnittliche Dichte. Anders ausgedrückt: er vergrößert sein Volumen, verdrängt also auf einmal mehr Wasser; sein Auftrieb vergrößert sich, so dass er aufsteigt. Umgekehrt ist

es bei starkem Ausatmen: Volumen verringert, Verdrängung verringert, Auftrieb verringert; er sinkt ab. Dass man sein Jacket nach gleichem Prinzip verwenden kann, ist dem vernunftbegabten Leser vermutlich bereits vor langer Zeit aufgefallen.

5 Druck

Gehen wir mal davon aus, dass alle Anwesenden eine anschauliche Vorstellung davon haben, was Druck ist. Daher soll uns als Erklärung nur die physikalische Sicht der Dinge genügen.

Eine handelsübliche Luftpumpe mit eingebautem Manometer (Druckmesser), deren Öffnung wir verschließen, soll uns als Anschauungsobjekt dienen. Drücken wir mit einer bekannten Kraft auf den Kolben, so erhöhen wir jetzt natürlich den Druck im Inneren – wie ganz leicht am Manometer zu erkennen ist. Vergrößern wir nun die Kraft, mit der wir drücken, so steigt der Druck weiter. Nun könnten wir dies natürlich mehrmals mit verschiedenen Kräften wiederholen und dabei jeweils Kraft und Druck notieren. Dabei würden wir feststellen, dass der Druck im gleichen Verhältnis steigt, wie die Kraft. Auf schlaue Weise würde man jetzt sagen, der Druck ist proportional zur Kraft. Da Druck aber nicht das gleiche ist wie Kraft schreiben wir als ersten Formelentwurf folgendes auf:

$$\text{Druck} = \text{Kraft} \cdot \text{irgendwas}$$

Nun stellt sich natürlich sofort die Frage nach dem *irgendwas*. Dies wollen wir uns etwas stärker veranschaulichen. Nehmen wir ein Gewicht einer Balkenwaage (z.B. das 1-kg-Gewicht) und stellen es mit der flachen Seite auf unsere Handfläche. Es drückt – zwar nicht unbedingt besonders stark, aber es drückt. Nun drehen wir das Gewicht um. Jetzt steht der Griff, welcher eine deutlich kleinere Grundfläche hat als die Unterseite, auf unserer Handfläche. Er drückt auch; allerdings merken wir, dass er deutlich stärker drückt. Obwohl das Gewicht das gleiche geblieben ist, ist der Druck auf unsere Handfläche offensichtlich größer. Wiederholen wir das Experiment ein weiteres Mal und stellen dazu einen angespitzten Bleistift mit der Spitze nach unten auf die Handfläche. Als wir aber das Gewicht auf den Bleistift stellen wollen, weigert sich unsere Versuchsperson, weil die Folge allein aus unserer Alltagserfahrung heraus doch allzu offensichtlich ist. Fassen wir zusammen: Das Gewicht war in allen Fällen das gleiche. Je kleiner wir jedoch die Fläche gemacht haben, desto größer wurde der Druck auf unsere Handfläche. Oder umgekehrt, je größer die Fläche auf die sich ein und die selbe Kraft verteilt, desto kleiner ist der Druck. In unserer mutmaßlichen Formel würde die Fläche also in den Nenner geraten

und dürfte dann so aussehen:

$$Druck = \frac{Kraft}{Fläche}$$

Setzt man die Kraft in Newton und die Fläche in m^2 ein, so bekommt man die Einheit Pascal heraus. Wir wollten aber in bar rechnen. Da $1 \text{ bar} = 100.000 \text{ Pascal}$, müssten wir das Ergebnis noch mit $0,00001 \text{ bar/Pascal}$ multiplizieren.

mmHg

Noch eine Einheit für Druck wollen wir kurz erwähnen, da sie in der Medizin weitverbreitet ist: das Torr auch mmHg genannt. Hg ist das chemische Zeichen für Quecksilber, mm steht für Millimeter. Es handelt sich bei 1 mmHg um den Druck, den eine 1 mm hohe Quecksilbersäule auf seine Unterlage ausübt.

Die ganz besonders interessierten können sich nun noch ein wenig im Umrechnen versuchen:

$$\begin{array}{rcl} 1 \text{ bar} & = & 10^5 \text{ Pascal} = 750,19 \text{ mmHg} \\ & \Downarrow & \\ 1 \text{ mmHg} & = & 133,3 \text{ Pascal} = 0,001333 \text{ bar} \end{array}$$

Jetzt wirft da einer aus dem Auditorium ungefragter Weise ein, dass das ja ziemlich blöd sei für ein und dasselbe drei verschiedene Einheiten zu lernen. Ist es auch! Allerdings werden die Einheiten jeweils in logisch komplett von einander getrennten Bereichen mit jeweils eigener Veranschaulichung verwendet, so dass es eigentlich nicht allzuviel Mühe bereiten sollte. Die mmHg bleiben uns nicht erspart, weil sie die unumstößlich verbreitete Einheit für den Blutdruck ist. Es macht uns in sofern wenig aus, da beim Blutdruckmessen später sowieso keiner auf die Idee käme noch an dieses Kapitel mit seinen Drücken zu denken. Die Einheit Pascal ist die internationale Einheit für Druck. Zur Entwarnung sei aber gesagt, dass Pascal bei uns hauptsächlich die Folge der Herleitung und im Folgenden kaum mehr von Bedeutung ist. Auf der Wetterkarte werden wir gelegentlich Hektopascal als Luftdruckangabe finden – behalten wir also gerade noch genug davon im Hinterkopf, dass wir in der rudimentären Wetterkunde, die wir im Laufe unserer Wasserrettungsausbildung vielleicht noch über uns ergehen lassen werden, wissen, dass es eine Druckeinheit ist.

Warum verwenden wir für unsere weiteren Betrachtungen nun die dritte Einheit, das bar? Der uns umgebende Luftdruck hat einen Wert von 1 bar. Das ist schon mal ziemlich praktisch, weil 1 eine einfache Zahl ist. Da in unserem Körper auch 1 bar Druck vorherrscht, merken wir nichts davon. Praktischerweise ist unser Körper so flexibel, dass er sich auch

unter Wasser immer dem vorherrschenden Umgebungsdruck anpasst - wir merken also auch unter Wasser nichts vom höheren Druck.

A propos: Wie verändert sich der Druck unter Wasser? Zehn Meter Wassersäule erzeugen den gleichen Druck, wie eine Erdatmosphäre Luft, nämlich 1 bar. Der Druck unter Wasser berechnet sich also wie folgt:

$$\text{Umgebungsdruck} = \frac{\text{Wassertiefe}}{10 \text{ m}} \text{ bar} + \text{Luftdruck}$$

Wehe jetzt holt einer den Taschenrechner raus...

6 Gas unter Druck

6.1 Kompressibilität

Kompressibilität könnte man ganz frei mit Zusammendrückbarkeit beschreiben. Wasser ist inkompressibel, d.h. es behält sein Volumen bei, auch wenn sich der Druck verändert.

Anders ist das bei Luft: Das Volumen einer bestimmten Menge Luft verkleinert sich, wenn sich der Druck erhöht (Luftballon!). Physikalisch sieht das so aus:

$$\text{Druck} \cdot \text{Volumen} = \text{const.}^2$$

Ideales Gas

Dieser Zusammenhang wurde 1662 von Robert Boyle und unabhängig davon 1676 von Edme Mariotte entdeckt und wird daher auch *Gesetz von Boyle-Mariotte* bezeichnet. Es ist ein Spezialfall der Zustandsgleichung für ideale Gase,

$$p \cdot V = Nk_{\text{B}}T,$$

nämlich der Spezialfall für konstante Temperatur T und gleich bleibende Teilchenzahl N . Da die bei uns auftretenden Temperaturschwankungen ebenso wie die auftretenden Drücke sehr klein sind, können wir das reale Gas Luft als ideales Gas bei konstanter Temperatur betrachten.

Wenn das Produkt also konstant ist, dann muss dieses const. noch das gleiche sein, wenn wir von der Wasseroberfläche nach unten getaucht sind:

$$\text{Druck}_{\text{oben}} \cdot \text{Volumen}_{\text{oben}} = \text{Druck}_{\text{unten}} \cdot \text{Volumen}_{\text{unten}}$$

²const. bezeichnet immer eine beliebige, aber in diesem Zusammenhang konstante Größe.

Immer noch nicht klar? Das Praktische sieht man erst, wenn man für den $Druck_{oben}$ den Luftdruck mit Wert 1 bar einsetzt. Dann steht da nämlich nach Umstellen:

$$Volumen_{oben} = \frac{Druck_{unten} \cdot Volumen_{unten}}{1 \text{ bar}}$$

Die Luft, die Bilma also in 10 m Wassertiefe (2 bar) in seine 8-Liter-Lunge einatmet, hat nach dem Auftauchen ein Volumen von 16 Litern. Atmet er nicht auf dem Weg nach oben aus, dann wird sie wohl platzen.

Die Kompressibilität ist noch an anderer Stelle von Bedeutung für uns: Das Mittelohr ist luftgefüllt. Beim Abtauchen verringert sich das Volumen dieser Luft. Da die einzig flexible Stelle das Trommelfell ist, besteht die Gefahr, dass dieses reißt. Auch die Tauchmaske ist ein luftgefüllter Hohlraum. Daher müssen wir in der Maske ebenfalls einen Druckausgleich machen. Sonst saugt die ihr Volumen verringernde Luft die Augen aus den Höhlen (Nein, sie fallen nicht raus!), wobei es zu einer Netzhautablösung kommen kann. In Schwimmbrillen kann man keinen Druckausgleich machen. Daher ist der Name **Schwimmbrille** ernstzunehmen – sie sind nicht zum Tauchen geeignet! Zusätzliche Details zum Thema Druckausgleich entnehme man dem Tauchbiologieskript.

6.2 Pressluft

Das war ein passendes Stichwort zur rechten Zeit. Denn auch in Pressluftflaschen, wie wir sie gerne zum Tauchen verwenden steht Luft unter Druck – und zwar unter hohem Druck! Heutzutage werden solche Pressluftflaschen für Atemluft mit 200 bar gefüllt (noch mal zum üben, das entspricht also dem Druck in wieviel Metern Wassertiefe?). Mit dem $Druck \cdot Volumen = const.$ von oben, lässt sich das Luftvolumen, dem der Inhalt einer solchen Flasche unter Umgebungsdruck entspricht ganz leicht ausrechnen!

$$\begin{aligned} Volumen_{Flasche} \cdot Druck_{Flasche} &= Volumen_{Umgebung} \cdot Druck_{Umgebung} \\ \Updownarrow & \\ Volumen_{Umgebung} &= \frac{Volumen_{Flasche} \cdot Druck_{Flasche}}{Druck_{Umgebung}} \end{aligned}$$

Hierbei sollten wir auf Uwes weise Worte hören: Man möge beachten, dass der Lungenautomat nur bis ca. 10 bar Restdruck funktioniert. D.h. von z.B. 90 bar Flaschendruck dürfen wir nur 80 bar in unsere Berechnung einbringen. Im Falle einer Zehn-Liter-Flasche wären das an der Oberfläche noch 800 l, in 10 Meter Wassertiefe allerdings nur noch 400 l.

Nun ist es ein leichtes für uns zu berechnen, wie lange denn unser Luftvorrat noch reicht:

$$Restzeit = \frac{Volumen_{Umgebung}}{AMV} \cdot \text{min}$$

In einem Physiologiebuch schlagen wir nach, dass das AMV = AtemMinutenVolumen in Ruhe etwa acht Liter beträgt. Besagte Flasche versorgte uns an der Oberfläche also noch 100 Minuten, in 10 m Tiefe 50 min, in 20 m Tiefe 25 min usw. Die Sache hat nur einen Schönheitsfehler: Wir sind von einem Atemminutenvolumen von 8 Litern ausgegangen; das erreicht ein erwachsener Mensch, wenn er in Ruhe auf einem Stuhl sitzt und nichts tut. Beim Tauchen tun wir aber zunächst schonmal nicht nichts. Ganz davon abgesehen, beginnen viele Menschen beim Tauchen ganz unbewusst damit, Unmengen Luft in sich hineinzupumpen. Es ist somit schwierig bis unmöglich einen Richtwert anzugeben. Hier muss also jeder selbst sein Verhalten beobachten, kann sich dabei aber unter Umständen eben aufgezeigte Zusammenhänge zunutze machen.

6.3 O₂

Es gibt jedoch eine andere Situation, in der sich die Restzeit sehr wohl und sogar sehr genau berechnen lässt. Als Rettungsschwimmer kommt man nicht um erweiterte Erste-Hilfe-Maßnahmen herum. Da benutzt man gelegentlich Sauerstoffflaschen, insbesondere im Bereich des Tauchens avanciert Sauerstoff langsam zu einem Teil der Standard-Erste-Hilfe-Ausrüstung. Weil man dem Patienten Sauerstoff für gewöhnlich nicht unter Wasser verabreicht, können wir Boyle und Mariotts Formel sehr schön vereinfachen:

$$Volumen_{Umgebung} = Volumen_{Flasche} \cdot Druck_{Flasche}$$

Wir können nun ganz genau die Zeit berechnen, in der unsere Flasche noch Sauerstoff liefert, denn man kann den Sauerstoffverbrauch genau einstellen. (Wie hoch der ist, entscheidet sich natürlich von der Art des Notfalls her, dazu an anderer Stelle mehr.)

Trotzdem ein allerletztes Beispiel: Unsere 1-l-Sauerstoffflasche ist mit 60 bar gefüllt. Der Patient bekommt 2 l pro Minute. Dann bleibt uns noch wieviel Zeit?

$$Restzeit = \frac{Volumen_{Umgebung}}{O_2 - Verbrauch}$$

Na, das ist doch ganz einfach und geht sogar im Kopf, wenn man es Schritt für Schritt durchführt: Erst das resultierende Volumen, 60 l, welches man dann durch den O₂-Verbrauch, also 2 l/min teilt; heraus kommt auf ganz einfache Weise 30 min. Und weil wir jetzt wissen, dass das Ergebnis Minuten sein müssen, brauchen wir uns während der Rechnung nicht einmal mit Einheiten herumschlagen – wir teilen also nur noch 60 durch 2.

7 Laminare und turbulente Strömungen

Diese Thema wollen wir aber wirklich nur ganz kurz streifen, auf lange Erklärungen verzichten und uns lieber zwei Bilder anschauen:

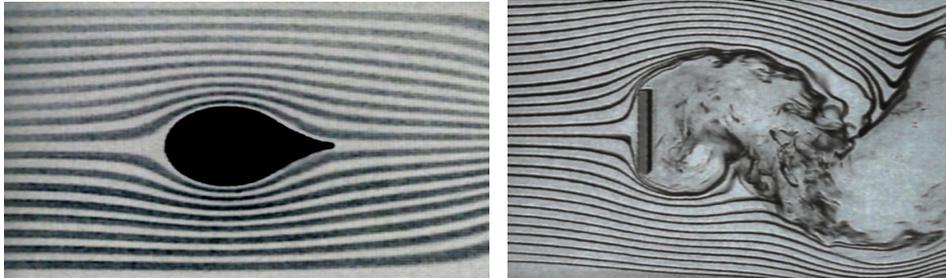


Abbildung 7: Darstellung der Stromlinien um einen tropfenförmigen Gegenstand (links) und eine Schrankwand (rechts) bei Bewegung durchs Wasser.

Im Falle des tropfenförmigen Gegenstands sehen wir sehr schön gerade Stromlinien; es handelt sich um eine *laminare Strömung*. Die Schrankwand hingegen verursacht Wirbel; das sieht recht turbulent aus und heißt daher auch turbulente Strömung. Turbulenzen verbrauchen Energie! Man braucht also deutlich mehr Energie um die Schrankwand durchs Wasser zu bewegen, als für den stromlinienförmigen Tropfen. Der Tropfen hat in der Tat die ideale Stromlinienform mit dem geringsten Wasser- bzw. Luftwiderstand. Ecken und Kanten hingegen erzeugen Wirbel und bremsen!

Beides können wir uns im Wasser zunutze machen. Beim Schwimmen möchten wir natürlich wenig gebremst werden. Also bewegen wir uns so durch's Wasser, dass wir der Stromlinienform möglichst nahe kommen. O.k. das ist vielleicht mit einem menschlichen Körper schwierig, also versuchen wir zumindest Ecken und Kanten zu vermeiden – logisch. Auch lange Badehosen erzeugen Wirbel, und zwar nicht gerade wenige, bremsen also. Wenn sie auch noch so schick aussehen, wollen wir als Rettungsschwimmer doch auf solche verzichten.

Ganz anders sieht es aus, wenn wir ins Wasser springen, und dabei möglichst flach eintauchen wollen (z.B. weil das Wasser nicht sehr tief ist und wir lieber nicht wissen wollen wie der Grund aussieht). Dann heißt das natürlich, dass wir sehr stark bremsen wollen. Entsprechend versuchen wir einfach unseren Wasserwiderstand so groß wie möglich zu machen.

Schauen wir uns zum Ende hin noch das Bild einer laminaren Strömung in einer Röhre an: Errinnern wir uns an dieses Strömungsmuster, wenn wir jemanden aus einem Fluss retten wollen, denn auch Flüsse fließen näherungsweise laminar! Auch wollen wir uns bei strömenden Flüssen daran erinnern, dass Ecken und Kanten (z.B. ein Unterwasserfelsen) Turbulenzen hervorrufen, die selbst einem Boot gefährlich werden können.

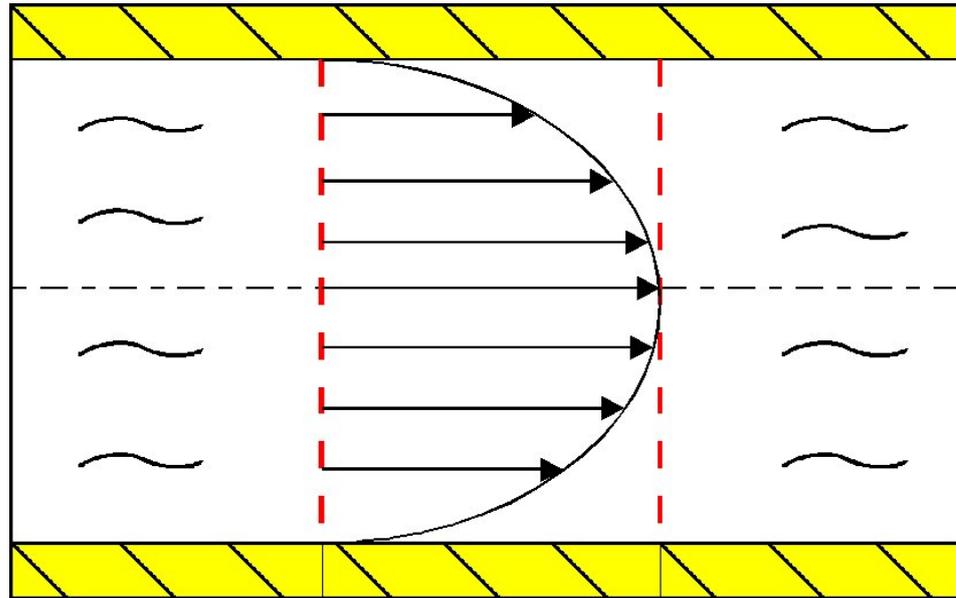


Abbildung 8: Laminare Strömung in einem Rohr.

Das soll zu diesem Thema auch schon reichen.

Literatur

- [1] Ausbilderhandbuch Teil C
- [2] Ausbilderhandbuch Teil E
- [3] Paul A. Tipler, Physik, 3. korr. Nachdr., 2000, d. 1. Aufl. (Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, 1994)
- [4] S. Silbernagel und A. Despopoulos, Taschenatlas Physiologie, 4. überarb. Aufl. (Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York, 1991)

Auf einen Blick

Wärmeleitung: Im Wasser wird uns schneller kalt, als an der Luft, weil Wasser Wärme besser leitet, als Luft.

Hören unter Wasser: Unter Wasser funktioniert unser Richtungshören nicht, weil die Schallgeschwindigkeit im Wasser höher ist, als in der Luft.

Lichtabsorption: Unter Wasser sieht alles blau aus, weil das Wasser rotes, gelbes und grünes Licht (in der Reihenfolge) besser absorbiert, als blaues Licht.

Lichtbrechung: Ohne Tauchmaske können wir unter Wasser nur verschwommen sehen, weil das Auge sich an die veränderten Lichtbrechungsverhältnisse unter Wasser nicht anpassen kann. Mit Tauchmaske können wir scharf sehen, allerdings sieht wegen der veränderten Brechungsverhältnisse alles um ein Drittel größer bzw. um ein näher aus, als es ist.

Auftrieb: Körper schwimmen, wenn ihre durchschnittliche Dichte geringe ist, als die von Wasser. Sie gehen unter, wenn ihre durchschnittliche Dichte größer ist, als die von Wasser.

Druck: An der Wasseroberfläche herrscht 1 bar Luftdruck. Unter Wasser steigt der Umgebungsdruck pro 10 m Wassertiefe um 1 bar.

Kompressibilität: Luft ist, im Gegensatz zu Wasser, kompressibel; das heißt sein Volumen verringert sich, wenn der Druck steigt. Daher müssen wir beim Tauchen einen Druckausgleich in den Ohren und in der Tauchmaske durchführen. Mit $Druck \cdot Volumen = const.$ lässt sich abschätzen, wie lange der Luftvorrat in der Tauchflasche oder der O₂-Vorrat im Sauerstoffgerät noch reichen.

Strömungsmuster: Lange Badehosen erzeugen Turbulenzen im Wasser und bremsen; daher haben sie an einem Rettungsschwimmer nichts verloren. Flüsse fließen in etwa laminar: In der Mitte ist die Strömungsgeschwindigkeit höher, als am Rand. Durch Kurven oder Unterwasserhindernisse können allerdings gefährliche Turbulenzen entstehen.

Noch Fragen?

Dann Mail an ulrich.velte@sehnde.dlrg.de schreiben und fragen!