

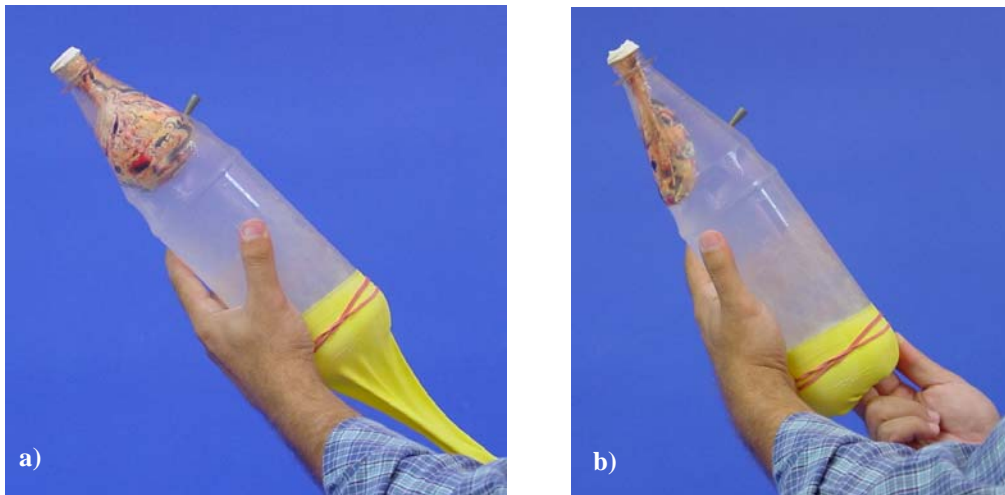
Unterrichtsvorschläge zum Atmen, Schweredruck und Tauchen

Unterrichtseinheit 1. Die Atmung beim Menschen

Schritt 1: Ein- und Ausatmen

Anhand von Folien oder den Lerntexten (s. Anhang) werden die Anatomie der Atmungsorgane und der Atmungsvorgang erläutert. Nähere Informationen dazu finden Sie in der Lehrerinformation. Insbesondere wird herausgestellt, dass das Lungengewebe von sich aus (teilweise) kollabieren würde und sich zwischen Brustkorb und Lunge der flüssigkeitsgefüllte Pleuraspalt befindet.

Mit einem einfachen Modell wird das Ein- und Ausatmen simuliert.



Einatmen durch Erweiterung (a) und Ausatmen durch Verengung (b) des Brustkorbmodells

In den Boden einer Plastikflasche schneidet man ein Loch und zieht einen Gummihandschuh über die Flasche, der evtl. noch mit einem Gummiring festgemacht wird. Der Handschuh wird nun nach innen gestülpt, das Modell mit Wasser gefüllt und ein Luftballon in den Flaschenhals gehängt. Damit dieser nicht schwimmt, legt man ein paar kleine Steine o.ä. hinein.

Mit Hilfe dieses Brustmodells wird durch das Verhalten des Luftballons demonstriert, dass die Luft durch Erweiterung des Brustkorbs in die Lunge (Luftballon) fließt, durch Verengung ausgestoßen wird.

Wird der Handschuh aus dem Modell herausgezogen (das würde in der Realität der Wirkung der nach vorne (M. intercostales externi) und nach unten (Zwerchfell) ziehenden Muskeln entsprechen), nimmt das Volumen des Modellbrustkorbs zu (Bild a). Dadurch strömt Luft in den Ballon (Einatmen). Hört der Zug auf (Bild b), so wird das Modellvolumen wieder kleiner und die vorher eingeströmte Luft entweicht (Ausatmen).

Das Wasser im Modell symbolisiert das Gewebe und die Flüssigkeit, die sich im Körper zwischen Brustkorb und Lunge befinden. Die Volumenänderung des Luftballons ist dann erheblich größer und damit die Simulation der Lungenausdehnung sehr viel überzeugender.

Schritt 2: Bestimmung des Lungenvolumens

Die ausgeatmete Luft lässt man durch einen Schlauch in einen umgestülpten Messbecher unter Wasser strömen. Verglichen werden sollten die Gasvolumina bei ruhiger und bei tiefer Atmung.

Als Überleitung vom Luftdruck zum Schweredruck des Wassers kann auf die Atmung zurückgegriffen werden. Zunächst kann noch angesprochen werden, dass beim Bergsteigen das Atmen mit zunehmender Höhe schwerer fällt und dass durch die Druckabnahme mit wachsender Höhe sich pro Volumeneinheit weniger Sauerstoffmoleküle in der Luft befinden. Dadurch kann der Fall eintreten, dass der Körper nicht ausreichend mit Sauerstoff versorgt wird. Stellt man nun die Frage, welche Besonderheiten sich für die Atmung in der Tiefe unter Wasser ergeben, wird klar, dass zunächst die Eigenschaften der umgebenden Flüssigkeit bekannt sein müssen.

Die Atmung

In Bild 1 kannst du den Aufbau der Atmungsorgane sehen.

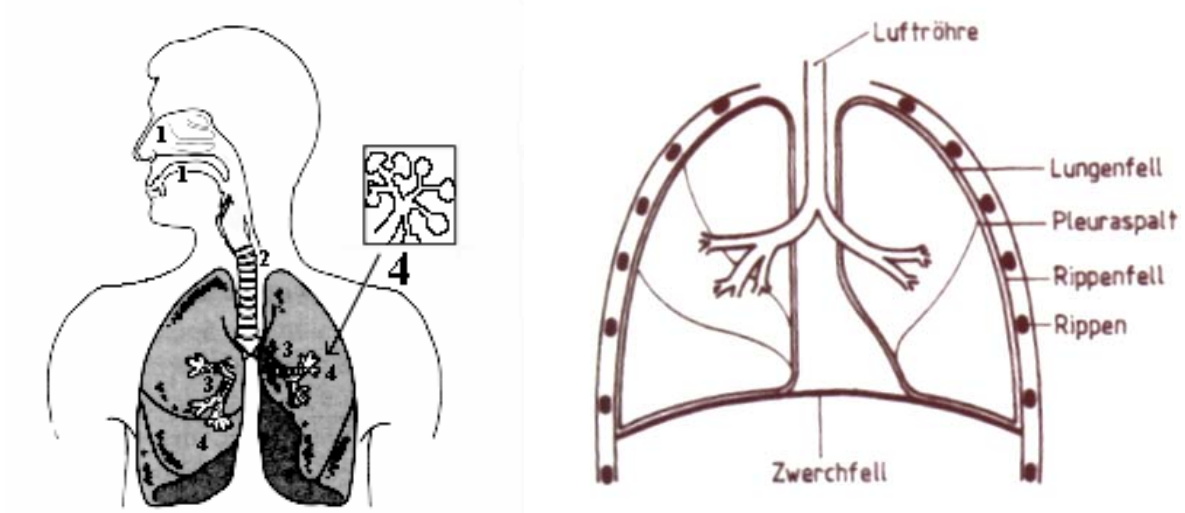


Bild 1: Die Luft bewegt sich durch Nasenhöhle bzw. Mund (1), Luftröhre (2), Bronchien und Bronchiolen (3) und verteilt sich dann auf die immer feineren Verzweigungen bis in die Alveolen (4), wo der Gasaustausch stattfindet. Im Feld ist die Vergrößerung eines Endgliedes der Luftröhren dargestellt, an dem die Alveolen hängen.

Die Atmung erfolgt durch Erweitern und Verengen des Brustkorbs mit Hilfe von Muskeln, die an den Rippen angreifen und diese heben und senken. Durch diese Volumenänderungen werden unterschiedliche Druckdifferenzen zwischen dem Luftdruck außerhalb und innerhalb des Brustraumes hergestellt (Bild 2).

Neben der Verkleinerung und Vergrößerung des Brustkorbs spielt die Bewegung des Zwerchfells eine wichtige Rolle. Das Zwerchfell ist eine sehnig-muskulöse Platte, die den Brustraum nach unten gegen den Bauchraum abschließt. Bei Anspannung flacht sich das Zwerchfell nach unten ab und vergrößert dadurch den Brustraum und damit die Lungen.

Zwischen Lunge und Brustkorb befindet sich eine sehr dünne Flüssigkeitsschicht im Pleuraspalt, so dass Lunge und Brustkorb bei den Atembewegungen leicht aneinander vorbei gleiten können. Da sich die Flüssigkeit nicht ausdehnt, wird die Lunge bei Ausdehnung des Brustkorbes mit vergrößert.

Einatmen

Während sich die Atemmuskeln und das Zwerchfell anspannen, erweitert sich der Brustkorb:

- Im Brustkorb wird ein im Vergleich zum äußeren Luftdruck noch größerer Unterdruck hergestellt
- Die Lungen folgen der Erweiterung des Brustkorbs
- In den Lungen entsteht ein Unterdruck
- Luft strömt von außen in die Lungen

Ausatmen

Während die Atemmuskeln und das Zwerchfell sich entspannen, verengt sich der Brustkorb:

- Im Brustkorb verkleinert sich der Unterdruck
- Die Lungen ziehen sich zusammen
- In den Lungen entsteht ein Überdruck
- Die verbrauchte Luft wird aus den Lungen ausgestoßen

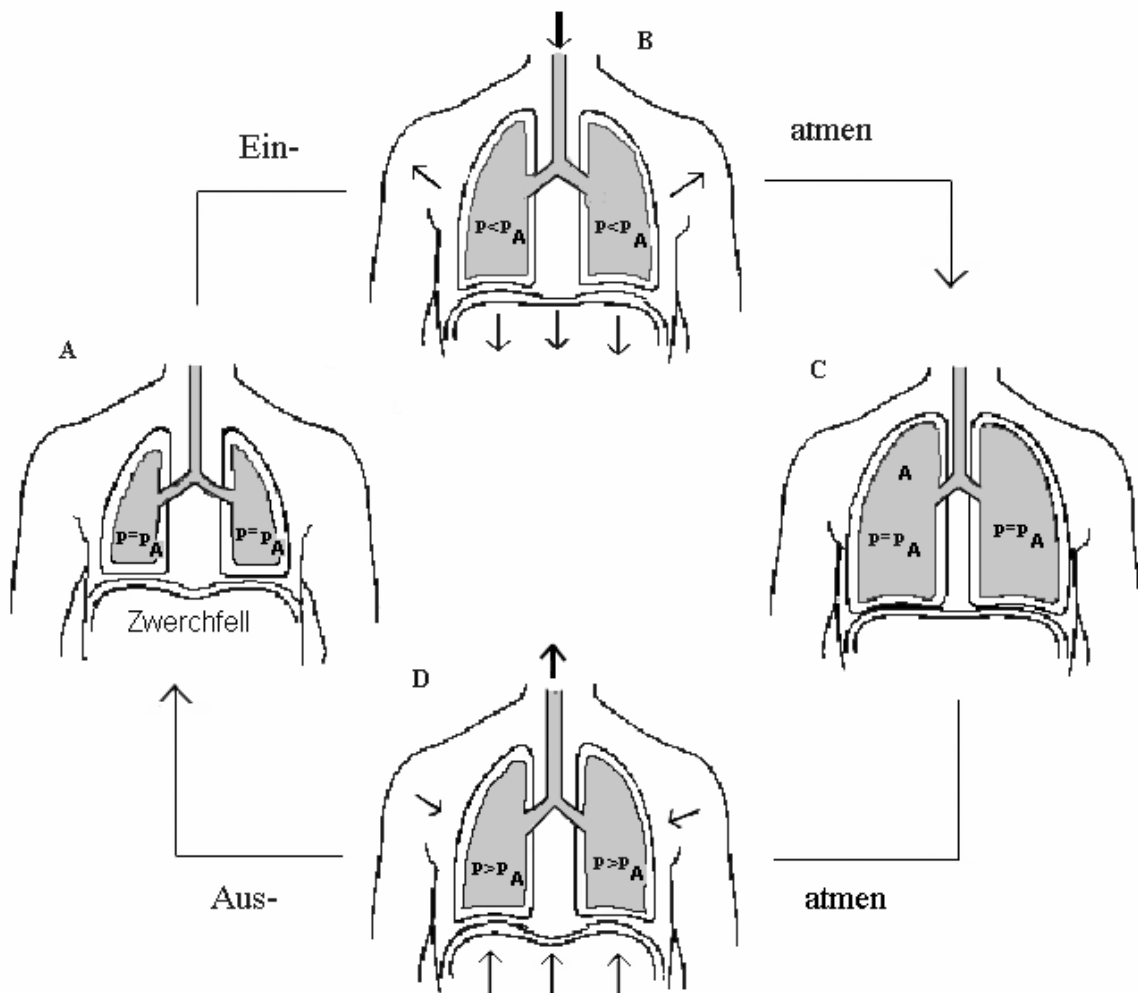


Bild 2: Beim Einatmen (A zu C über B) vergrößert sich der Brustkorb und Luft strömt von außen in die Lunge. Beim Ausatmen (C zu A über D) verkleinert sich der Brustkorb und Luft strömt aus der Lunge heraus. P_A ist der äußere Luftdruck.

Unterrichtseinheit 2: Der Schweredruck im Wasser

Die Einführung des Schweredrucks beim Wasser erfolgt weitgehend traditionell. Deshalb werden hier nur sehr kurzgefasste Hinweise gegeben.

Da der Luftdruck in der Atmosphäre bereits als Schweredruck eingeführt worden ist, kann begrifflich daran angeknüpft werden. Der Druck zeigt sich u.a. dadurch, dass gegen die einschließenden Wände gedrückt wird.

Bei allen Betrachtungen sollte im Unterricht konsequent der Luftdruck mitberücksichtigt werden, falls er eine Rolle spielt.

Schritt 1: Einführung – Anknüpfen an Druck in Gasen

Die folgende Analogie wird hergestellt: Wenn der Atmosphärendruck durch die Gewichtskraft der aufeinanderliegenden Luftschichten hervorgerufen wird, dann müsste es doch bei aufeinanderliegenden Schichten von Flüssigkeiten, z.B. bei Wasser, ebenfalls so sein, dass in der Flüssigkeit ein Druck entsteht, der mit der Tiefe zunimmt. Bei einem Gas ist es offensichtlich so gewesen, dass es umso schneller aus einer Öffnung herausströmt, je größer die Druckdifferenz ist.

Im Gegensatz zu ausströmenden Gasen kann man den austretenden Wasserstrahl sehr gut sehen. Bei einer horizontal herausgedrückten Flüssigkeit zeigt sich ein höherer Druck durch eine flachere Parabel. (Dies sollte mit einer Spritze demonstriert werden.)

Dies wird durch den bekannten Versuch mit der Säule mit mehreren übereinanderliegenden Öffnungen demonstriert. Als qualitatives Ergebnis wird festgehalten, dass der Druck in der Flüssigkeit mit der Tiefe zunimmt.

Schritt 2: Der quantitative Zusammenhang

Über die Druckdefinition $p = F/A$ lässt sich recht einfach für eine Flüssigkeitssäule die Formel

$$p = \rho g h$$

für den Schweredruck herleiten.

Dies wird mit der Drucksonde experimentell bestätigt.

Hier sollte auch besprochen werden, dass der Druck in der obersten Flüssigkeitsschicht in einem oben offenen Gefäß gerade dem Luftdruck entspricht. In diesem Fall muss in der obigen Formel auf der rechten Seite noch der Atmosphärendruck p_A hinzugefügt werden:

$$p = \rho g h + p_A.$$

Schritt 3: „Allseitigkeit“ des Schweredrucks

Mit der Drucksonde wird als nächstes die Allseitigkeit des Drucks gezeigt. Dass auf den Rücken eines Tauchers auf Grund der darauf lastenden Wassersäule ein erheblicher Druck wirkt, ist plausibel. Dass auch von unten auf den Bauch ein etwa gleicher Druck wirkt, ist dagegen für viele Schülerinnen und Schüler verblüffend. Die Demonstration mit der Drucksonde kann noch deutlicher erfolgen, wenn direkt über der Sonde eine Scheibe angebracht wird, so dass nach naivem Verständnis das Gewicht der darüber liegenden Wassersäule von der Scheibe getragen wird und demzufolge der von der Sonde angezeigte Druck kleiner sein sollte.

Schritt 4: Ergänzungen und Anwendungen

Ergänzende Themen wie verbundene Gefäße, Stempeldruck, hydraulische Presse, usw. können folgen.

Unterrichtseinheit 3: Das Tauchen

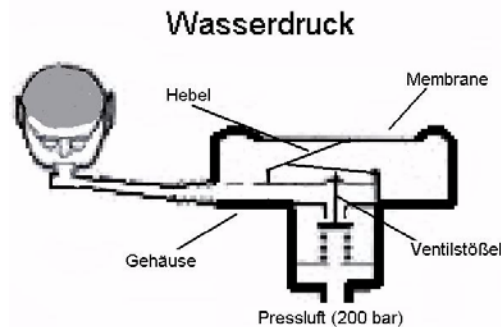
Schritt 1: Der Auftrieb

Von der Sachsystematik her wäre es durchaus angebracht, an dieser Stelle den Auftrieb ausführlicher zu behandeln. Für die hier vorgeschlagenen Themen ist allerdings nur die Kenntnis erforderlich, dass es Gegenstände gibt, die im Wasser sinken, dort schweben oder an der Oberfläche schwimmen und dass man durch geeignete Kombination schwimmender und sinkender Körper schwebende Körper herstellen kann. Letzteres wird bei Tauchern angestrebt, die schweben oder nur leicht sinken sollen.

Hier kann auch die Schwimmblase bei Fischen angesprochen werden.

Schritt 2: Das Atmen unter Wasser

Als erstes wird geklärt, dass unter Wasser von außen auf den Brustkorb auf jeden Fall ein höherer Druck lastet als außerhalb des Wassers. Atmet ein Taucher unter Wasser aus einer Gasflasche, muss der Atemluftdruck dem Druck des umgebenden Wassers angepasst werden. Dies geschieht durch den sogenannten Lungenautomaten (vgl. Bild). Ist der Druck im Wasser größer als im Gehäuse, so wird die Membran nach innen gedrückt. Die Hebel sorgen dafür, dass das Ventil geöffnet wird, so dass Luft aus der Flasche nachströmen kann. Sobald ein Druckgleichgewicht herrscht schließt das Ventil die Luftzufuhr aus der Flasche ab. Beim Einatmen sinkt der Druck im Gehäuse, das Ventil wird geöffnet und Luft strömt nach. Atmet der Taucher aus, so entsteht ein Überdruck, der durch ein Ventil im Mundstück ausgeglichen wird. Bei modernen Taucherausrüstungen wird der Druck aus der Flasche, der bei einer frisch gefüllten Flasche ca. 200 bar beträgt, durch zwei Ventile an den Umgebungsdruck unter Wasser angepasst. Das erste Ventil befindet sich am Ausgang der Flasche und reduziert den Druck auf ca. 6 – 14 bar, das zweite Ventil im Mundstück gleicht den Druck an den Umgebungsdruck an.



Schematischer Aufbau des Lungenautomaten

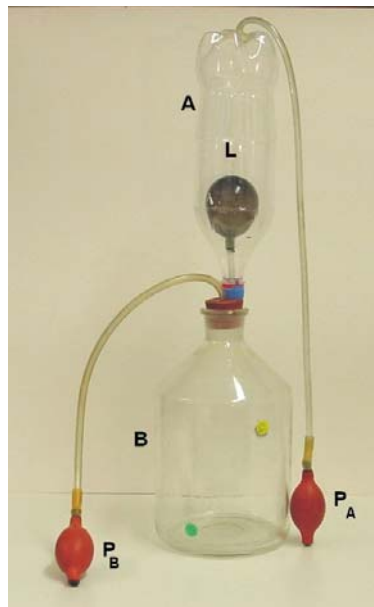
Das Arbeitsblatt bietet eine Übersicht über verschiedenen Umgebungsdrücke.

Schritt 3: Lungenriss bei Panikaufstieg

Wenn ein Taucher in Panik gerät kann es passieren, dass er zu schnell nach oben flüchtet und dabei auch noch zwanghaft die Luft anhält. Die angehaltene und komprimierte Luft in den Lungen dehnt sich aus und kann schon ab 0,1 bar Überdruck zu einer Überdehnung und sogar zu einem Riss des Lungengewebes führen. Die Gefahr von Geweberissen ist überall dort gegeben, wo komprimierte Gasblasen im Körper vorhanden sind, deren Volumen bei Druckanstiegen nicht konstant gehalten werden kann. Bei Überdehnung kann Luft in die Kapillaren eindringen und zur Embolie führen. Beim Riss des Lungengewebes kann Luft in den Pleuraspalt eindringen und zum Pneumothorax führen (die Lungenflügel kollabieren; siehe Schritt 4).

Das Zerreißen des Lungengewebes kann durch folgende Anordnung simuliert werden. Ein aufgeblasener Luftballon, der die Lunge darstellen soll, befindet sich in einem fast vollständig mit Wasser gefüllten Behälter (A), in dem ein Überdruck herrscht (vgl. Bild). Durch die Pumpen P_A bzw. P_B wird der Druck in den Behältern A bzw. B erhöht. Das Versuchssystem stellt einen Taucher in der Tiefe dar, wobei ein Überdruck sowohl in dem umgebenden Wasser als auch in der Luft der Lungen (Luftballon) herrscht. Wenn nun die komprimierte Luft vom Behälter A abgelassen wird (der Wasserschweredruck verringert sich durch den Aufstieg), vergrößert sich der Luftballon L und er platzt, wenn der Druck im Behälter B genügend groß ist. Das Volumen des Behälters B spielt eine wichtige Rolle: Je größer das Volumen in B ist, desto kleiner ist der nötige Druck, um den Luftballon zum Platzen zu bringen. Das Volumen B stellt den Totraum dar. Das ist jenes Luftvolumen, das beim Ausatmen nicht ausgestoßen wird.

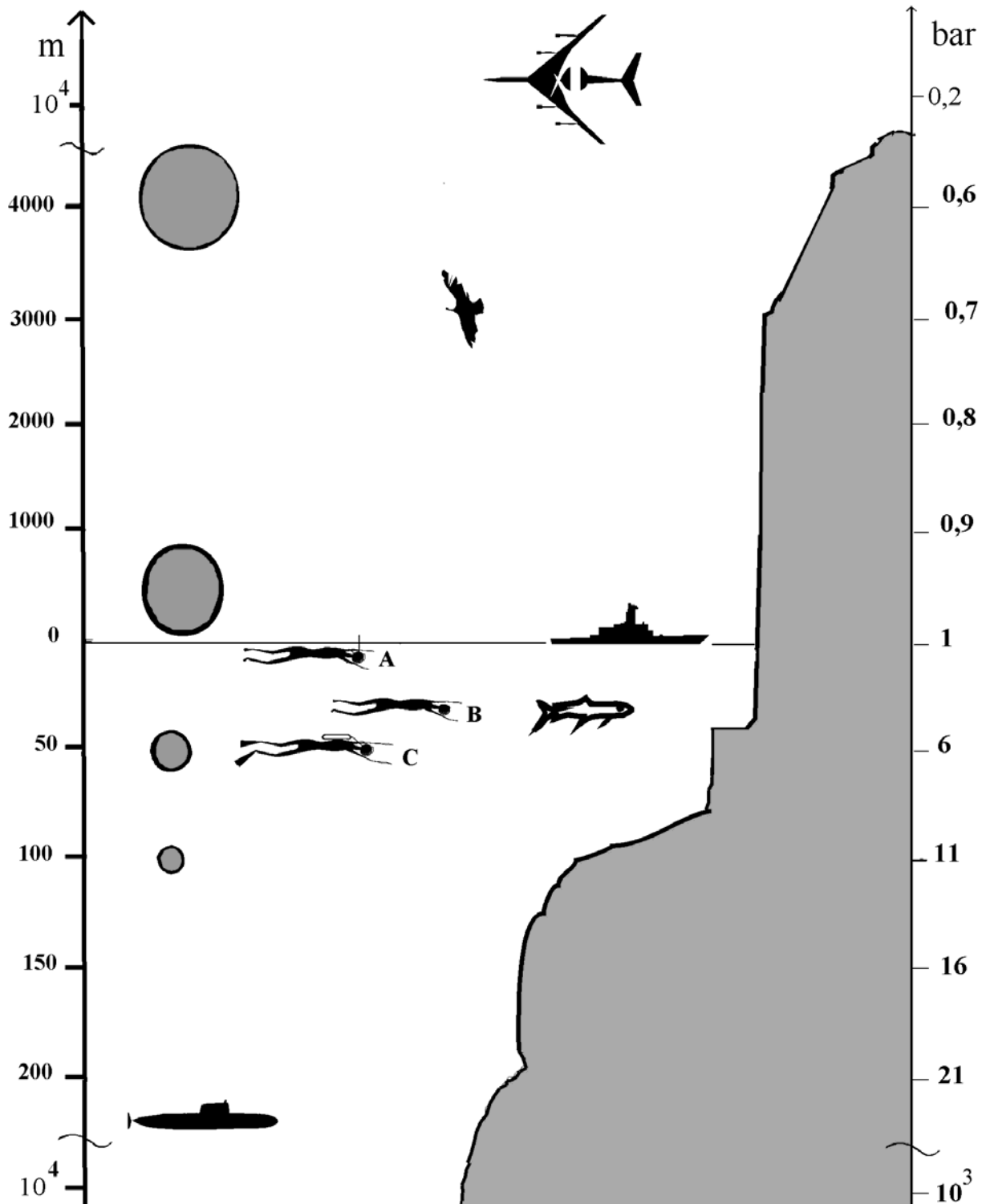
Trotz des Nachteils, dass die Volumenverhältnisse nicht der Realität entsprechen, ist der Modellversuch recht nützlich.



Bei Verminderung des Druckes im Behälter A und Beibehaltens des Druckes in B (Aufstieg ohne Atmen) reißt der Luftballon (Lunge)

Überblick über unterschiedliche Umgebungsdrücke

In jeder Luftschicht um die Erde wirkt ein Druck, der durch das Gewicht der darüberliegenden Luftschichten gegeben ist. Deswegen nimmt der Druck mit zunehmender Höhe ab. Im Wasser nimmt der Druck mit größerer Tiefe schneller zu als in der Luft, weil die Dichte des Wassers größer als die der Luft ist.



Die Abbildung enthält „Objekte“, auf die unterschiedliche Umgebungsdrücke wirken. Achte darauf, dass der Maßstab über und unter der Wasseroberfläche verschieden ist. Auf der rechten Seite ist der jeweilige Druck angegeben. Auf der linken Seite des Bildes ist ein Luftballon dargestellt, dessen Volumen sich aufgrund der unterschiedlichen Umgebungsdrücke ändert.

Das Körpergewebe ist weich, deswegen sollen große Druckunterschiede im Körper vermieden werden. Sonst können Dehnungen, Durchblutungsstörungen usw. auftreten. Beim Atmen muss daher der Druck der Atemluft ungefähr gleich demjenigen Druck sein, der von außen auf den Körper wirkt.

Fülle mit Hilfe der Abbildung die folgende Tabelle aus:

Objekt	Umgebungsdruck in bar	Druck auf das Objekt in bar	Atemluftdruck in bar
Flugzeugpassagiere Adler	0,2 (Außer der Kabine)	0,8	0,8
Schnorchelschwimmer (A)			
Apnoetaucher* (B)			--
Hai			--
Caissonarbeiter ** (zeichne das Objekt im Bild ein)		5	5
Froschmann (C)			
U-Bootfahrer im U-Boot			

* Apnoetaucher: Taucher ohne Atemgerät (Apnoe = Atempause)
 ** Caissonarbeiter arbeiten unter einer Taucherglocke. Drücke einen Glasbehälter im Wasser mit der Öffnung nach unten, dann wird dir das Prinzip der Taucherglocke klar sein.

Ausgefüllte Tabelle:

Objekt	Umgebungsdruck in bar	Druck auf dem Objekt in bar	Atemluftdruck in bar
Flugzeugpassagiere	0,2 (außer der Kabine)	0,8	0,8
Adler	0,7	0,7	0,7
Schnorchelschwimmer (A)	1,02	1,02	1
Apnoetaucher (B)	3	3	*
Hai	3	3	--
Caissonarbeiter	5	5	5
Froschmann (C)	6	6	6
U-Bootfahrer	20 (außer der Kabine)	1	1

* Die Luft in den Lungen beträgt wegen der Verengung des Innenbrustvolumens mehr als 1 bar, in Abhängigkeit der Tiefe.

Die folgenden Fragen können zur Vertiefung diskutiert werden.

Fragen:

- 1) Warum spüren wir den atmosphärischen Druck nicht?
- 2) Ein Flugzeug fliegt in großer Höhe. Plötzlich geht eine Tür auf. Verlässt Luft die Kabine oder tritt Luft von außen ein?
- 3) Ein U-Boot ist untergetaucht. Wird bei einer Undichtigkeit Wasser eintreten oder Luft den Schiffsrumpf verlassen?
- 4) Soll ein absteigender Taucher Luft in die Taucherbrille durch die Nase einblasen oder soll Luft aus der Taucherbrille entlassen werden.

Antworten:

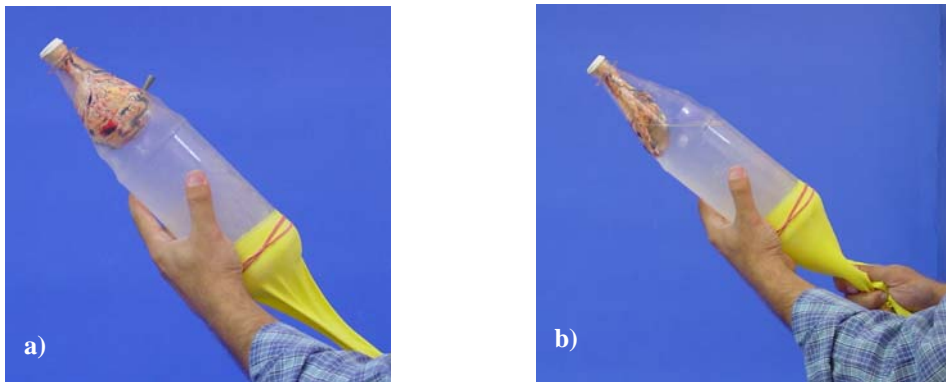
- 1) Weil innerhalb und außerhalb unseres Körpers der Druck gleich groß ist.
- 2) In großer Höhe ist der Druck geringer als derjenige, der im Flugzeug gehalten wird. Daher strömt Luft aus der Kabine.
- 3) Der Wasserdruck in der Tiefe ist viel größer als derjenige, der im U-Boot gehalten wird. Auch bei einer geringen Undichtigkeit tritt daher Wasser in das U-Boot ein.
- 4) Wenn die Taucherbrille nicht elastisch ist, muss der Taucher Luft hineinblasen, damit der Druck in der Brille dem äußeren Druck entspricht. Sonst tritt entweder Wasser in die Taucherbrille ein, oder es können wegen des Unterdrucks in der Taucherbrille Augenskapillaren platzen. Wenn der Taucher wieder aufsteigt, soll Luft aus der Brille entweichen.

Schritt 4: Pneumothorax

Wenn Luft aus den Lungen oder durch die Brustwand in den Pleuraspalt eindringt (Lungenriss bei Panikauftieg, Lungenentzündung, Brustperforation bei Unfällen, Operationen usw.), steigt der Intrapleuraldruck (dieser ist normalerweise immer kleiner als der Atmosphärendruck) und die Alveolen fallen zusammen (kollabieren). Da die Lungen räumlich getrennt sind, kann nur ein „Flügel“ kollabieren. In leichten Fällen kann eine spontane Heilung eintreten. In schweren Fällen muss die Luft aus dem Pleuraspalt abgesaugt werden.

Um den Ablauf eines Pneumothoraxes zu simulieren, benutzt man ein Modell, wie es zur Demonstration der Vorgänge beim Ein- und Ausatmen verwendet wurde (vgl. Bild). Auf Höhe des Luftballons ist in die Flasche ein zusätzliches Loch gebohrt.

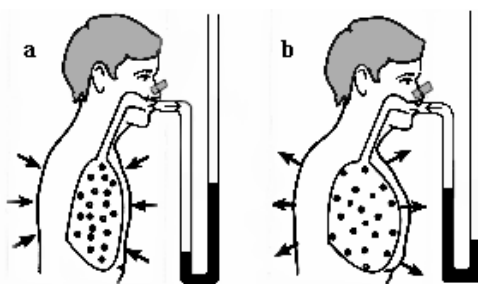
Man drückt den Handschuh in die Flasche und schließt das Loch mit einem passenden Stöpsel. Zieht man nun den Handschuh heraus, so entsteht im Modell ein Unterdruck, der Ballon bläst sich auf (dies entspricht dem Einatmen). Dann zieht man den Stöpsel heraus und öffnet damit den Luftweg zum Inneren des Modells. Luft wird in das Modell eintreten (dies entspricht dem Eintreten von Luft in den Pleuraspalt), wobei der Druck atmosphärisch wird und der Ballon zusammenfällt. Das Aufblasen (Einatmen) ist nicht mehr möglich.



Simulation eines Pneumothoraxes

Schritt 5: Maximaler Atemdruck

Eine grobe Abschätzung der beim Aus- und Einatmen erreichbaren Druckdifferenzen kann durch ein U-Rohr-Manometer erfolgen. In einen etwa 3 m langen, dünnen und u-förmig gehaltenen Schlauch wird Wasser eingefüllt (etwa eine Wassersäule von 1 m bis 1,5 m) und, wie im folgenden Bild gezeigt, gegen diese Säule ein- bzw. ausgeatmet. Einem Abstand der beiden Oberflächen der Wassersäule von 1 m entspricht eine Druckdifferenz von 10 kPa. Beim Ausatmen kann bei trainierten Sportlern ein Druck von 15 kPa erreicht werden, beim Einatmen gibt eine maximale Anstrengung Werte um -10 kPa (Bild b). Diese Zahlen sind ein Maß für die Kraftentfaltung der Muskeln und sie zeigen, dass schon bei 100 cm Wassertiefe das Atmen sehr anstrengend wird.

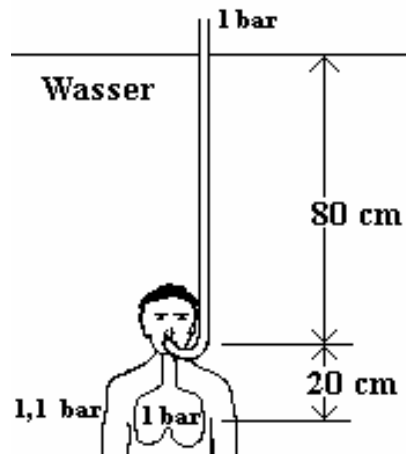


Messung durch den geschlossenen Atemweg mit maximalem Atemdruck beim Ausatmen (a) und beim Einatmen (b).

Schritt 6: Verlängerung eines Schnorchels

Nach der Erfahrung, wie schwierig es ist, gegen eine 1 – 1,5 m hohe Wassersäule zu atmen, kann jetzt die Frage diskutiert werden, warum man nicht einfach mit einem mehrere Meter langen Schnorchel taucht.

Das Bild verdeutlicht die Situation. Der Schweredruck im Wasser ist bei 1m Tiefe gleich 10 kPa, das ist etwa 1/10 des Luftdrucks.



Druckdifferenz zwischen Lungeninnerem und Umgebung beim Atmen unter Wasser durch einen langen Schnorchel

Wegen der Schnorchelverbindung bleibt im Lungeninnenraum der Druck atmosphärisch (ca. 1 bar). Hingegen ist der Druck, der in der Tiefe wirkt, ca. 1,1 bar.

- Die Atmung wird beeinträchtigt, denn der Schweredruck unter Wasser ist so groß, dass die Atemmuskeln den Brustkorb nicht einfach ausdehnen können.
- Obwohl die Druckdifferenz nur 0,1 bar beträgt, können Gewebeflüssigkeit und Blut aus den Lungenkapillaren in die Alveolen austreten. Das bringt die Gefahr des Erstickens mit sich.
- Eine weitere Gefahr birgt die Pendelatmung. Die Luft im Schnorchel wird mehrfach ein- und ausgeatmet und so findet kein Luftaustausch statt, was eine Kohlendioxidvergiftung zur Folge hat.

Deswegen besitzen Schnorchel ein relativ dünnes Rohr (weniger als 2,5 cm) und eine maximale Länge von etwa 40 cm. (Sehr dünne Schnorchel besitzen ein kleines Volumen aber erhöhen den Strömungswiderstand).

Zur Vertiefung können die folgenden Fragen diskutiert werden:

- 1) Kannst Du schätzen wie groß die durch eine Druckdifferenz von 0,1 bar verursachte zusätzliche Kraft ist, die auf die Vorderseite des Brustkorbes wirkt? Nimm an, dass der Brustkorb eine Fläche von $0,1 \text{ m}^2$ hat.
- 2) Um die Pendelatmung zu verhindern kann ein sehr dünner Schnorchel benutzt werden. Ist dies eine Lösung oder können dabei andere Schwierigkeiten auftreten?
- 3) Ist es bei der Schnorchelatmung besser flach oder tief zu atmen?

Antworten:

- 1) Die Kraft ist $(P_u - P_a) \cdot A = 0,1 \text{ bar} \cdot 0,1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ Pa} \cdot 0,1 \text{ m}^2 = 1000 \text{ N}$, wobei A die Fläche, P_u und P_a der Umgebung- bzw. der atmosphärische Druck ist. Um eine bessere Vorstellung zu haben: 1000 N sind ca. die Gewichtskraft eines dicken Menschen, d. h. Atmen unter Wasser auf 1 m Tiefe ist gleich Atmen in liegender Position mit einem dicken Menschen auf der Brust.
- 2) Mit einem sehr dünnen Schnorchel steigt der Strömungswiderstand und das Atmen wird anstrengender.
- 3) Es ist besser tief zu atmen, sonst kommt keine frische Luft bis in die Alveolen.

Weitere Fragen zur Atmung:

- 1) Vergrößern sich die Lungen der Passagiere bei einem schlagartigen Abfall des Kabinendrucks im Flugzeug?
- 2) Ist die Lungengröße in Apnea (ohne atmen) unter Wasser größer, kleiner oder gleich der Lungengröße an der Wasseroberfläche?
- 3) Ist das Lungenvolumen unter Wasser bei druckgeregelter Atmung größer, kleiner oder gleich groß als an der Oberfläche?
- 4) Warum ist es leichter mit geöffnetem Mund zu atmen?
- 5) Welchen Vorteil hat es durch die Nase zu atmen?
- 6) Ein Taucher atmet je nach der Tauchtiefe mehr oder weniger komprimierte Luft. Wenn bei 30 m Tiefe seine Lungen mit 6 l Luft gefüllt sind und er, ohne auszuatmen, an die Oberfläche steigt, welches Volumen würde dann die in den Lungen befindliche Luft haben?

Antworten:

- 1) Mit Ausnahme der ersten Sekunden, vergrößern sich die Lungen der Passagiere nicht, denn der Druckabfall betrifft sowohl den Brustkorb als auch die Innenlungen der Passagiere. Hingegen kann sich das interstinal angeschlossene Gasvolumen enorm vergrößern, mit einer bedingten Verlagerung des Zwerchfells nach oben, die zu einer Einschränkung der Atmung führen kann.
- 2) Unter Wasser in Apnea sind die Lungen kleiner als an der Oberfläche, denn der Schweredruck des Wassers komprimiert den ganzen Körper, auch der Bauch wird zusammengedrückt und bewirkt dadurch eine Anhebung des Zwerchfelles.
- 3) Das Lungenvolumen ist unter Wasser bei druckgeregelter Atmung gleich groß, wenn die Druckdifferenz zwischen Innenlungen und Umgebung gleich groß gehalten wird.
- 4) Mit geöffnetem Mund fließt Luft durch geringen Weg und großen Durchmesser, daher ist der Wegwiderstand niedriger.
- 5) Der Vorteil ist, dass die Luft durch die Nase besser erwärmt und befeuchtet wird.
- 6) Das Volumen ist indirekt proportional zum Druck. Wenn der Druck von 4 bar (3 bar für 30 m Wassertiefe + 1 bar Oberflächendruck) auf 1 bar fällt, würde das Volumen von 6 l auf $(6 \cdot 4) \text{ l} = 24 \text{ l}$ steigen.