

ARBEITSAUFTRÄGE

1. Nennen Sie drei Transportformen des Atemgases CO_2 durch den Körper!
2. Formulieren Sie die Reaktionsgleichungen der Prozesse, die zur Bildung von Hydrogencarbonat-Ionen führen!
3. Formulieren Sie das Massenwirkungsgesetz (MWG*) für die Reaktionsgleichung, an der Kohlensäure und Hydrogencarbonat beteiligt sind!
4. Wie wird eine Übersäuerung des Blutes (z.B. durch übersäuerte Nahrung) verhindert, bzw. Einwirkungen basischer Stoffe kompensiert?
5. Erklären Sie in eigenen Worten den Begriff „Puffersystem“!

Transport von Kohlendioxid im Blut. a) Das in den Körpergeweben produzierte Kohlendioxid diffundiert in die interstitielle Flüssigkeit und von dort in das Blutplasma. Weniger als 10% verbleibt dort als gelöstes CO_2 . Das übrige diffundiert in die Erythrocyten, wo ein Teil an das Hämoglobin gebunden und auf diese Weise transportiert wird. Das meiste CO_2 reagiert in den Erythrocyten mit H_2O und bildet Kohlensäure. (Rote Blutzellen enthalten das Enzym Carboanhydrase, welches diese Reaktion katalysiert.) Kohlensäure dissoziiert in ein Hydrogencarbonat-Ion und ein Proton (H^+). Die meisten der Hydrogencarbonat-Ionen diffundieren in das Plasma und werden auf diese Weise zur Lunge transportiert (weißer Pfeil). Hämoglobin bindet die meisten der Protonen aus der Kohlen-

säure und verhindert so eine Versauerung des Blutes. Das Kohlensäure-Hydrogencarbonat-System ist zugleich eines der wichtigsten Puffersysteme des Blutes; es hält den pH-Wert im Blut konstant, indem es bei steigendem pH-Wert Protonen abgibt und bei sinkendem pH-Wert Protonen bindet. b) Die in den Kapillaren der Körpergewebe ablaufenden Prozesse kehren sich in der Lunge um. CO_2 bildet sich aus Kohlensäure beziehungsweise wird vom Hämoglobin freigesetzt. Es diffundiert ins Blutplasma, von dort in die interstitielle Flüssigkeit und dann in den alveolären Gasraum; durch Ausatmen wird das CO_2 endgültig aus dem Körper entfernt.

Das **Massenwirkungsgesetz** (MWG) wird wie folgt formuliert: Für jedes chemische Gleichgewicht ist bei einer bestimmten Temperatur der Quotient des Produkts der Konzentration der Reaktionsprodukte und des Produkts der Konzentration der Ausgangsstoffe konstant.

Für die chemische Reaktion $\text{A} + \text{B} \rightleftharpoons \text{C} + \text{D}$ lautet die Gleichung für das

Massenwirkungsgesetz:
$$K = \frac{c(\text{C}) \cdot c(\text{D})}{c(\text{A}) \cdot c(\text{B})}$$

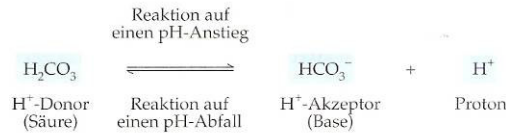


Puffer

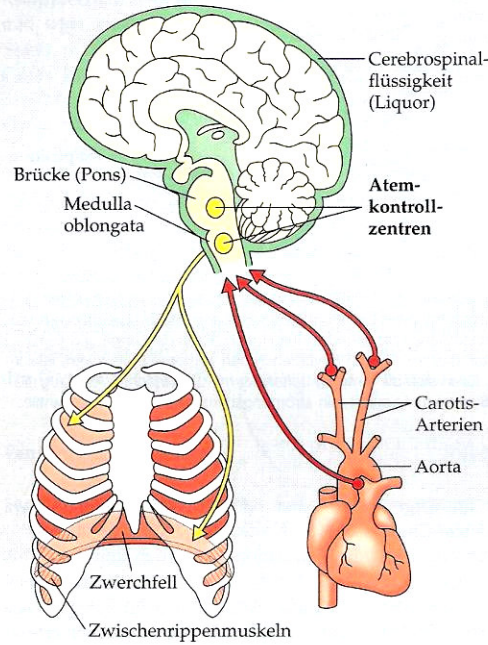
Der pH-Wert im Inneren der meisten lebenden Zellen liegt nahe bei 7. Selbst eine kleine pH-Änderung kann schädlich sein, da die chemischen Prozesse in der Zelle auf die Protonen- beziehungsweise Hydroxidionenkonzentration sehr empfindlich reagieren.

Biologische Flüssigkeiten verhindern Schwankungen ihres eigenen pH-Wertes nach Zugabe von Säuren oder Basen dadurch, dass sie **Puffer** enthalten – Stoffe, die Änderungen der H⁺- beziehungsweise OH⁻-Konzentration minimieren. Puffer im menschlichen Blut zum Beispiel halten den Blut-pH normalerweise sehr nahe bei 7,4. Ein Mensch kann nur wenige Minuten überleben, wenn sein Blut-pH auf unter 7 absinkt oder auf über 7,8 ansteigt. Unter normalen Bedingungen verhindert die **Pufferkapazität** des Blutes solche pH-Schwankungen.

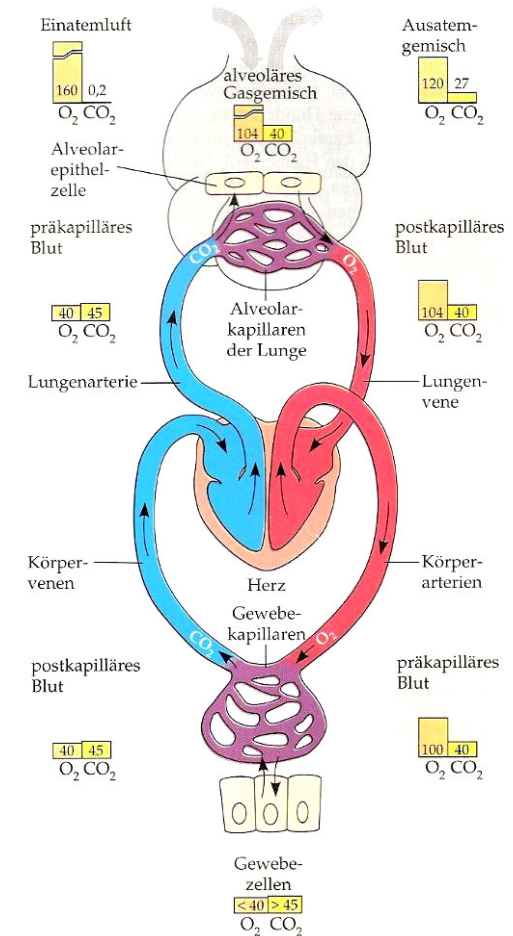
Ein Puffer funktioniert dadurch, dass er Protonen aus der Lösung aufnimmt, wenn diese im Überschuss vorliegen, und sie an die Lösung abgibt, wenn Mangel an ihnen besteht. Die meisten Puffer sind schwache Säuren oder schwache Basen, die sich reversibel mit Protonen verbinden. Einer der Puffer, der zur pH-Stabilität im menschlichen Blut und in vielen anderen biologischen Lösungen beiträgt, ist die Kohlensäure (H₂CO₃), die, wie bereits erwähnt, in ein Hydrogencarbonat (HCO₃⁻) und ein Proton (H⁺) dissoziiert:



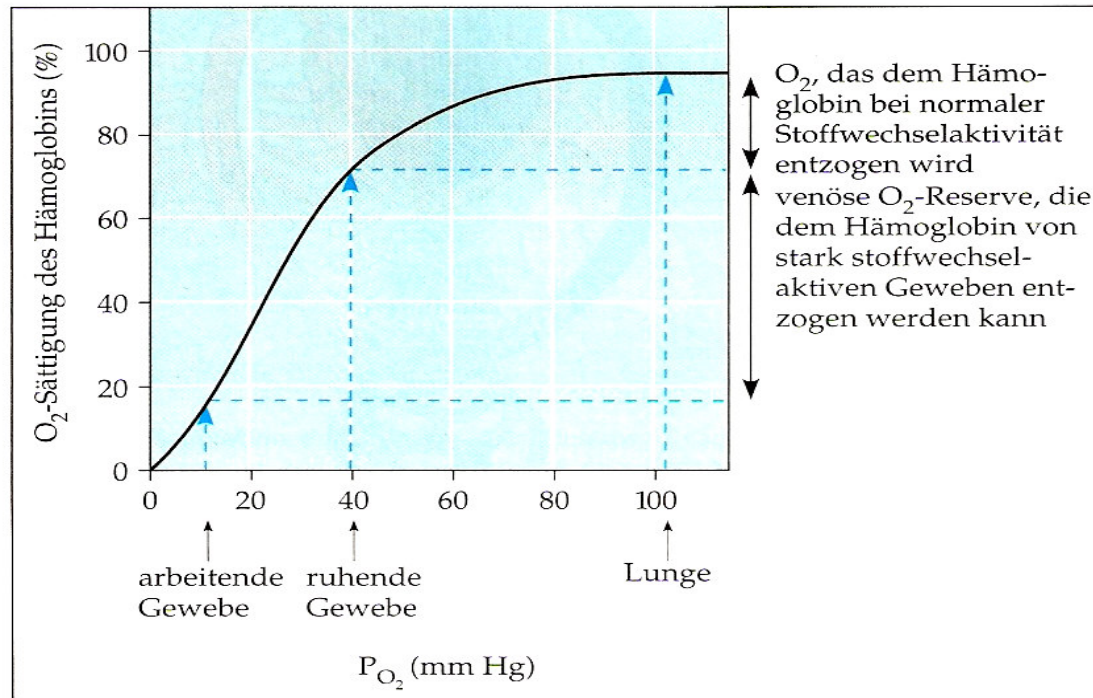
Das chemische Gleichgewicht zwischen Kohlensäure und Hydrogencarbonat wirkt als pH-Regulator. Die Reaktion verlagert sich dabei auf die linke beziehungsweise rechte Seite, wenn andere Prozesse in der Lösung Protonen erzeugen beziehungsweise entfernen. Sobald die H⁺-Konzentration im Blut abfällt (das heißt der pH-Wert ansteigt), dissoziiert mehr Kohlensäure, wodurch Protonen nachgeliefert werden. Wenn aber die H⁺-Konzentration im Blut ansteigt (der pH-Wert abfällt), wirkt das Hydrogencarbonat als Base und entfernt die überschüssigen Protonen aus der Lösung. So besteht also das Kohlensäure-Hydrogencarbonat-Puffersystem eigentlich aus einer Säure *und* einer Base, die miteinander im Gleichgewicht stehen. Die meisten anderen Puffer sind ebenfalls Säure-Base-Paare.



38.24 Die Regulation der Atmung. Das Einatmen (Inspiration) wird vom Atemzentrum in der Medulla oblongata stimuliert (gelb), einem auch als verlängertes Mark bezeichneten Gehirnbereich. Das Atemzentrum sendet Nervenimpulse aus, die Zwerchfell und Zwischenrippenmuskulatur zur Kontraktion anregen. Befinden wir uns in Ruhe, senden diese Nervenzellen mit einer Impulsfrequenz, die zu etwa 10 bis 14 Atemzügen pro Minute führt. Nach jeder Inspiration erschlafft die Atemmuskulatur, und wir atmen aus (Expiration). Ein Atemzentrum in der Brücke (Pons) moduliert den von der Medulla erzeugten Grundrhythmus der Atmung und macht die Übergänge zwischen Einatmen und Ausatmen weicher. Das Atemzentrum in der Medulla ist auch an der Regulation des CO₂-Gehalts des Blutes beteiligt. Sensoren in der Medulla selbst registrieren pH-Wechsel (ein Maß für den CO₂-Spiegel) im Blut und in der Cerebrospinalflüssigkeit, welche das Gehirn umgibt. Andere Sensoren in der Wand der Aorta und der im Hals gelegenen Carotis-Arterien messen Veränderungen des Blut-pH-Wertes und senden Nervenimpulse zur Medulla (rote Pfeile). Das Atemzentrum der Medulla reagiert auf diese Informationen, indem es die Atemtiefe und Atemfrequenz verändert. Um überschüssiges CO₂ zu entfernen, werden sie gesteigert, bei zu niedrigem CO₂-Spiegel dagegen verringert. Die Sensoren in Aorta und Carotis-Arterien registrieren auch Veränderungen im Sauerstoffgehalt des Blutes, und wenn er zu tief absinkt, signalisieren sie der Medulla, das Atemzeitvolumen zu erhöhen.

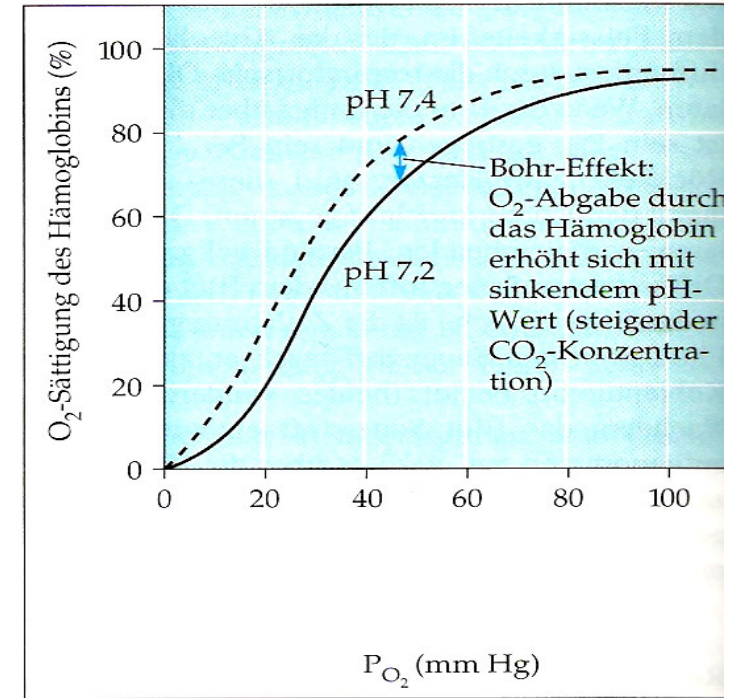


38.25 Aufnahme und Abgabe von Atemgasen. Gase diffundieren aus Bereichen mit einem höheren Partialdruck in Bereiche mit einem niedrigeren Partialdruck. Die farbigen Säulen stehen für die Partialdrücke von O₂ (P_{O₂}) und CO₂ (P_{CO₂}), die für den Gasaustausch im Kapillarnetz der Lunge und der übrigen Gewebe verantwortlich sind. Die Zahlen in den Balken sind die tatsächlichen Partialdrücke der Gase in mm Hg. (Anstelle von mm Hg werden Partialdrücke sehr oft in Kilopascal angegeben, wobei 1 mm Hg = 0,133 kPa. Allerdings konnte sich dies in der Medizin bisher nicht durchsetzen; in Biologie wird es unterschiedlich gehandhabt. Ein anderer Ausdruck für mm Hg ist Torr.)



(a)

38.26 Sauerstoff-Dissoziationskurven des Hämoglobins. a) Dies ist die Dissoziationskurve des Hämoglobins bei 37°C und pH 7,4. Die Kurve zeigt die prozentuale Sättigung des Hämoglobins mit Sauerstoff, wenn das Protein sich in einer künstlichen Pufferlösung befindet, deren Sauerstoffpartialdruck sich kontinuierlich verändert. Bei einem P_{O_2} von 100 mm Hg, wie er typischerweise in der Lunge herrscht, ist das Hämoglobin zu etwa 98 % mit Sauerstoff gesättigt. Bei einem P_{O_2} von 40 mm Hg, was der üblichen Situation im Bereich von Körpergewebe entspricht, ist das Hämoglobin nur zu 70 % gesättigt; es gibt in dieser Situation somit 28 % seines Sauerstoffs ab. Seinen übrigen Sauerstoff (die sogenannte venöse Reserve) kann es in besonders stoffwechsel-



(b)

aktiven Geweben freisetzen, etwa in schwer arbeitenden Muskeln. Protonen beeinflussen die Konformation des Hämoglobins, und dadurch verschiebt ein sinkender pH-Wert die Dissoziationskurve nach rechts. Wie Sie sehen, gibt das Hämoglobin bei gleichem P_{O_2} , beispielsweise 40 mm Hg, bei pH 7,2 mehr Sauerstoff ab als bei pH 7,4, dem normalen pH-Wert des menschlichen Blutes. Dies ereignet sich in sehr aktiven Geweben, da das in der Zellatmung produzierte CO_2 mit Wasser reagiert und Kohlensäure (H_2CO_3) bildet, die in H^+ und HCO_3^- dissoziiert und so den pH-Wert erniedrigt. Dann setzt Hämoglobin mehr O_2 frei, welche die hohe lokale Stoffwechselaktivität unterstützt. (1 mm Hg = 1 Torr = 0,133 kPa.)