



Kapitel 2.2

Kardiopulmonale Homöostase

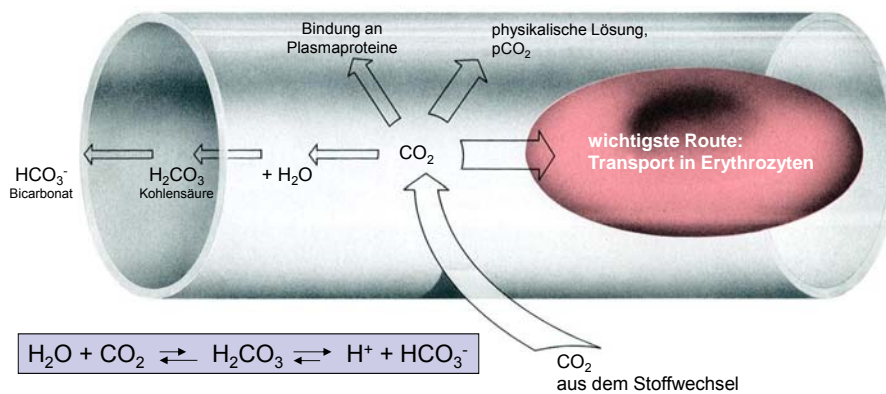
Kohlendioxid



CO₂-Transport im Plasma

Bei der Bildung von CO₂ im Stoffwechsel ist sein Partialdruck höher als im Blut, CO₂ diffundiert folglich ins Plasmawasser und löst sich dort physikalisch. Nur ein sehr geringer Teil wird an Plasmaproteine gebunden.

Die chemische Reaktion mit Wasser zu Kohlensäure verläuft ohne besondere Katalysatoren sehr langsam. Bicarbonat entsteht zwar sehr rasch aus Kohlensäure, seine Konzentration ist wegen der langsamen Bildung von H₂CO₃ aber vernachlässigbar.





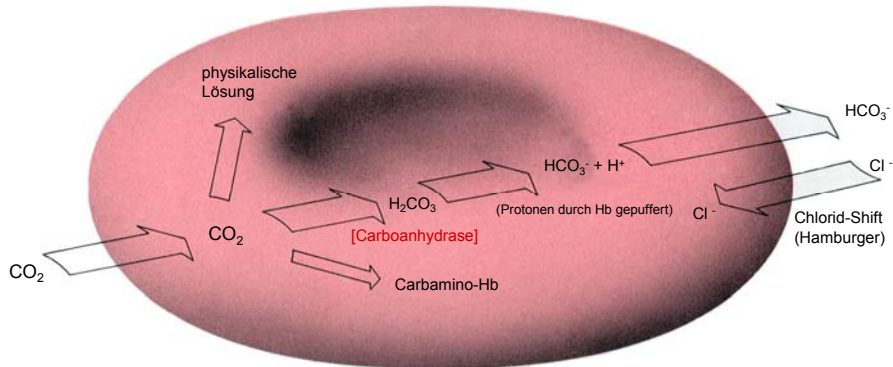
CO₂-Transport im Erythrozyten

CO₂ wird im Erythrozyten auf verschiedenen Wegen gespeichert und transportiert.

Mit Abstand am wichtigsten ist die Bildung von HCO₃⁻, das wegen der erythrozytären Carboanhydrase ca. 13.000-mal schneller entsteht als im Plasma.

Intrazellulär entstandenes HCO₃⁻ wird rasch gegen Chlorid ausgetauscht.

Der weitaus größte Anteil des Plasma-Bicarbonats (24 mval/l) stammt aus den Erythrozyten.



CO₂-Transport im Gesamtblut

CO ₂ in mmol in 1 l Blut (arteriell) bei paCO ₂ = 40 mm Hg		arteriell	venös
Plasma	physikalische Lösung	0,7	0,8
	in Form von HCO ₃ ⁻	15,2	16,2
Erythrozyten	physikalische Lösung	0,3	0,4
	Carbamino-Hb	1,0	1,4
	in Form von HCO ₃ ⁻	4,3	4,4
Summe		21,5	23,2

Nicht verwirren lassen !

(Wir haben in Erinnerung, dass der Normalwert für Plasma-HCO₃⁻ etwa 24 mval/l ist.) →

Bei einem Hämatokrit von 37% sind 630 ml Plasma in 1 l Blut vorhanden.

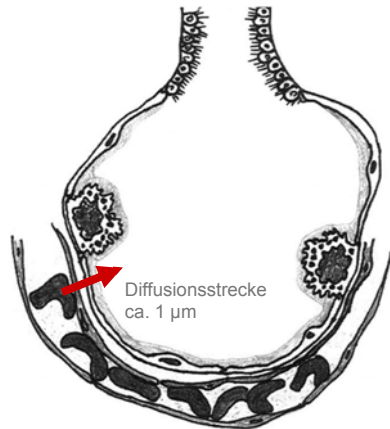
In diesem Volumen befinden sich laut Tabelle 15,2 mmol HCO₃⁻.

Das sind 15,2 / 630 • 1000 = 24,1 mmol / l Plasma.



Pulmonaler CO₂-Austausch

Passage des Erythrozyten durch die Alveolarkapillare in 0,75 sec, davon 0,3 sec Kontaktzeit mit dem Alveolarraum.



Gemischt-venöses Blut ($p\text{vCO}_2=46$) besitzt einen höheren CO₂-Partialdruck als das Alveolargas ($p\text{ACO}_2=40$). CO₂ diffundiert entsprechend dem Konzentrationsgradienten aus dem Plasma in die Alveole.

Bei der pulmonalen Bindung von O₂ an das Hämoglobin werden zuvor vom Hb gepufferte Protonen freigesetzt

(Bohr-Effekt).

Diese zerstören Teile des Carbamino-Hb und HCO₃⁻, so dass weiteres CO₂ gebildet wird, was den plasmatischen pCO₂ erhöht und die CO₂-Elimination beschleunigt

(Haldane-Effekt).

Desoxygenierung in der Peripherie erleichtert aus dem gleichen Grund die CO₂-Aufnahme in die Erythrozyten!



Kapitel 2.3

Kardiopulmonale Homöostase

Protonen (pH-Wert)



Auf dem Weg zum pH-Wert (1)

Welche Mengen der drei entscheidenden Substanzen befinden sich in 1 Liter Blut ?

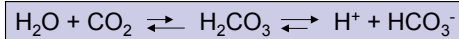
	ml / 100 ml Blut	mmol / 1000 ml Blut	mg / l Blut
O ₂	ctO ₂ = 20	200/22,4 = 8,9	8,9 · 32 = 285
CO ₂	2,15 · 22,4 = 48,2	21,5	21,5 · 44 = 946
H ⁺		40 · 10 ⁻⁶	0,00004

pH = 7,4

Hilfestellung:

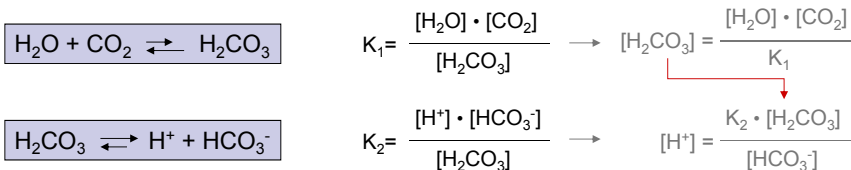
- a) 1 mol eines idealen Gases besitzt bei Atmosphärendruck ein Volumen von 22,4 l (1 mmol = 22,4 ml)
 b) Atomgewichte: H=1, C=12, O=16

Die bei weitem wichtigste Quelle für die Protonenkonzentration im Blut liegt im CO₂:



Auf dem Weg zum pH-Wert (2)

Chemische Reaktionen sind Gleichgewichtsreaktionen. Welche Produkte am Ende vorliegen, wird durch die Gleichgewichts- (oder Dissoziations-) Konstanten beschrieben.



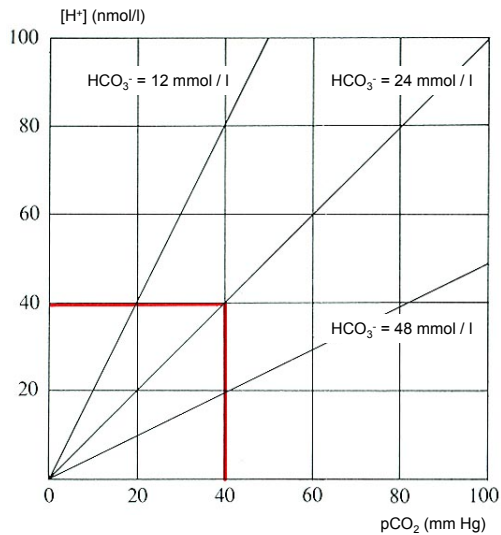
$$[\text{H}^+] = \frac{K_2 \cdot [\text{H}_2\text{O}] \cdot [\text{CO}_2]}{K_1 \cdot [\text{HCO}_3^-]} = K \cdot \frac{[\text{CO}_2]}{[\text{HCO}_3^-]} = K \cdot \frac{\alpha \cdot p\text{CO}_2}{[\text{HCO}_3^-]}$$

Mit $K = 7,84 \cdot 10^{-7} \text{ mol/l}$ und dem CO₂-Löslichkeitskoeffizienten $\alpha = 30,6 \text{ } \mu\text{mol/l}$ ($30,6 \cdot 10^3 \text{ nmol/l}$) ergibt sich eine vereinfachte **Henderson-Gleichung**:

$$[\text{H}^+] \text{ (in nmol/l)} = \frac{24 \cdot p\text{CO}_2}{[\text{HCO}_3^-]} = \frac{24 \cdot 40}{24} = 40 \text{ nmol/l}$$



Auf dem Weg zum pH-Wert (3)



Henderson'sche Pufferlinien

$$[\text{H}^+] = \frac{24 \cdot \text{pCO}_2}{[\text{HCO}_3^-]}$$

Mögen Sie lieber Logarithmen ?

Der **pH-Wert** ist definiert als der negative dekadische Logarithmus der Protonenkonzentrationen (in mol/l):

$$[\text{H}^+] = 40 \text{ nmol/l} = 40 \cdot 10^{-9} \text{ mol/l}$$

$$\begin{aligned} \text{pH} &= -\log [\text{H}^+] = \log \frac{1}{[\text{H}^+]} \\ &= \log (1 / 40 \cdot 10^{-9}) = \log (25.000.000) \\ &= 7,40 \end{aligned}$$



Henderson-Hasselbach-Gleichung

$$[\text{H}^+] = K \cdot \frac{\alpha \cdot \text{pCO}_2}{[\text{HCO}_3^-]}$$

$$\log [\text{H}^+] = \log (K) + \log \left(\frac{\alpha \cdot \text{pCO}_2}{[\text{HCO}_3^-]} \right) \longrightarrow -\log [\text{H}^+] = -\log (K) + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \cdot \text{pCO}_2} \right)$$

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{[\text{CO}_2]} \right)$$

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \cdot \text{pCO}_2} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 6,1 + \log (20) \\ &= 6,1 + 1,3 = 7,4 \end{aligned}$$

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \left(\frac{24}{0,03 \cdot 40} \right)$$

pK beschreibt den pH-Wert, bei dem 50% der Kohlensäure in H^+ und HCO_3^- dissoziiert sind.



Puffer-Parameter

In modernen Blutgas-Analysatoren werden nur 3 Parameter direkt gemessen: pO_2 , pCO_2 und pH. Die Bicarbonat-Konzentration wird nach der Henderson-Hasselbach-Gleichung berechnet.

$$pH = pK + \log \left(\frac{[HCO_3^-]}{[CO_2]} \right)$$

Das **aktuelle Bicarbonat** stammt aus der Messung der abgenommenen Blutprobe. Das von respiratorischen Störungen unabhängige und damit für metabolische Überlegungen aussagekräftigere **Standard-Bicarbonat** wird erhalten, wenn die Blutprobe zuvor voll oxygeniert und auf einen pCO_2 von 40 mm Hg bei 37° eingestellt wurde, NW ~ 22-26 mmol/l.

Das **Gesamt- CO_2** setzt sich aus dem physikalisch gelösten CO_2 (= pCO_2) und dem in Form von Bicarbonat transportierten CO_2 zusammen:

$$\begin{aligned} \text{Total } CO_2 &= \alpha \cdot pCO_2 + [HCO_3^-] \\ &= 0,0306 \cdot 40 + 24 = 1,2 + 24 = 25,2 \text{ mmol/l} \end{aligned}$$

Als **Gesamtpufferbasen** bezeichnet man die Summe der Konzentrationen aller anionischen Puffer (Bicarbonat, Phosphat, Proteine, Hämoglobin), NW ~ 44-48 mmol/l.

Für die Bestimmung des **Base Excess (BE)** wird das Blut mit einer Säure oder Base auf pH 7,4 titriert, NW ~ $\pm 2,5$ mmol/l (bei 37° , $pCO_2 = 40$ und $sO_2 = 100$). Negativer Base Excess wird oft auch als **Base Deficit** bezeichnet.

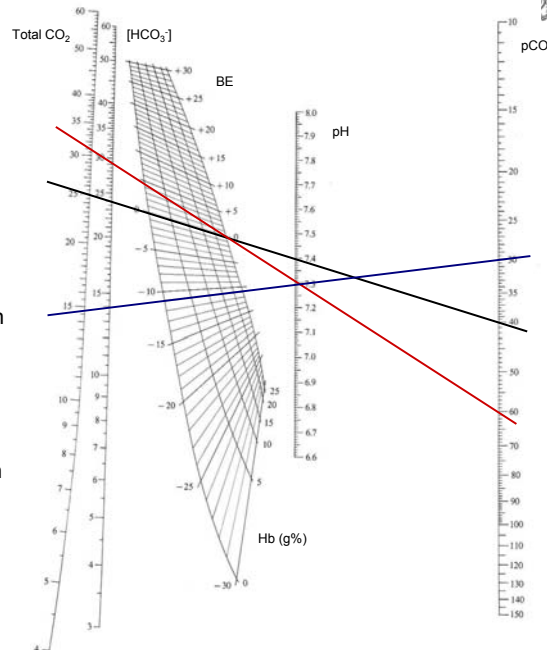


Nomogramme

Die aus den gemessenen Werten abgeleitete Parameter beruhen auf Nomogrammen, welche in den Analysatoren gespeichert sind.

Eines der bekanntesten Nomogramme ist das von **Siggaard-Andersen**.

Verbinden Sie die gemessenen Werte mit einer Linie und bestimmen Sie die korrespondierenden Werte an den Schnittpunkten der jeweiligen Kurven. Die Präzision reicht für die klinische Praxis in aller Regel aus.





Störungen im Säure-Base-Haushalt

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \left(\frac{[\text{HCO}_3^-]}{\alpha \cdot \text{pCO}_2} \right)$$

$$\text{pH} = \text{pK} + \log \left(\frac{24}{0,03 \cdot 40} \right)$$

$$\begin{aligned} \text{pH} &= 6,1 + \log(20) \\ &= 6,1 + 1,3 = 7,4 \end{aligned}$$

Bei respiratorischen Störungen ist primär der pCO_2 verändert.

Bei einem Anstieg des pCO_2 (z.B. bei Hypoventilation) wird der Nenner größer, der Quotient kleiner, und damit der pH-Wert kleiner: **respiratorische Azidose**.

Nimmt der pCO_2 hingegen ab (z.B. bei Hyperventilation), kommt es zu einem Anstieg des pH: **respiratorische Alkalose**.

Bei metabolischen Störungen ist primär das $[\text{HCO}_3^-]$ betroffen (wird z.B. bei Bildung von Milchsäure zerstört).

Bei einem Abfall wird der Zähler dabei kleiner und der pH-Wert nimmt ab: **metabolische Azidose**.

Falls jedoch Bikarbonat retiniert wird (oder sehr viel Säure verloren geht, z.B. bei starkem Erbrechen von saurem Mageninhalt), steigt der pH: **metabolische Alkalose**.

Nach einer gewissen Zeit (insbesondere bei chronischen Verläufen der zugrunde liegenden Störung) setzen Kompensationsmechanismen ein: der korrespondierende Partner ($[\text{HCO}_3^-]$ oder pCO_2) wird in seiner Konzentration so verändert, dass der Quotient wieder einen Wert von etwa 20 erreicht: **respiratorische oder metabolische (Teil-) Kompensation**.



Acid-Base Map

