

Seminar BGA-Bausteine: pO₂, SatO₂, ctO₂, Oxygenierung



Prof. Dr. Tobias Hilbert, D.E.S.A.

Klinik und Poliklinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin, Universitätsklinikum Bonn

SAEURE-BASE 37.0 °C

pH	7.364 ↓	
pCO ₂	38.6	mmHg
pO ₂	83.1	mmHg
HCO ₃ ^{-act}	21.5	mmol / L
HCO ₃ ^{-std}	21.4	mmol / L
BE(B)	- 3.6	mmol / L
BE(ecf)	- 3.9	mmol / L
ctCO ₂	22.7	mmol / L

CO-OXYMETRIE

Hct	10	%
tHb	3.5 ↓	g / dL
sO ₂	91.4	%
FO ₂ Hb	88.7 ↓	%
FCOHb	2.1 ↑	%
FMetHb	0.9	%
FHHb	8.3 ↑	%

SAUERSTOFFSTATUS 37.0 °C

ctO ₂ (a)	4.6	mL / dL
----------------------	-----	---------

KORRIGIERT 36.8 °C

pH(T)	7.367	
pCO ₂ (T)	38.3	mmHg
pO ₂ (T)	82.0	mmHg

ELEKTROLYTE

Na ⁺	134.4 ↓	mmol / L
K ⁺	4.01	mmol / L
Ca ⁺⁺	1.07 ↓	mmol / L
Ca ⁺⁺ (7.4)	1.05	mmol / L
Cl ⁻	106 ↑	mmol / L
AnGap	10.9	mmol / L

METABOLITE

Glu	101 ↑	mg / dL
Lac	1.88 ↑	mmol / L

Temperatur 36.8 °C

pAtm 760 mmHg

BGA:

- Säure-Basen-Haushalt
- Gasaustausch
- Hämoglobin (inkl. Unterfraktionen), Hämatokrit
- Elektrolytstatus
- Metabolismus (Blutglukose, Laktat)

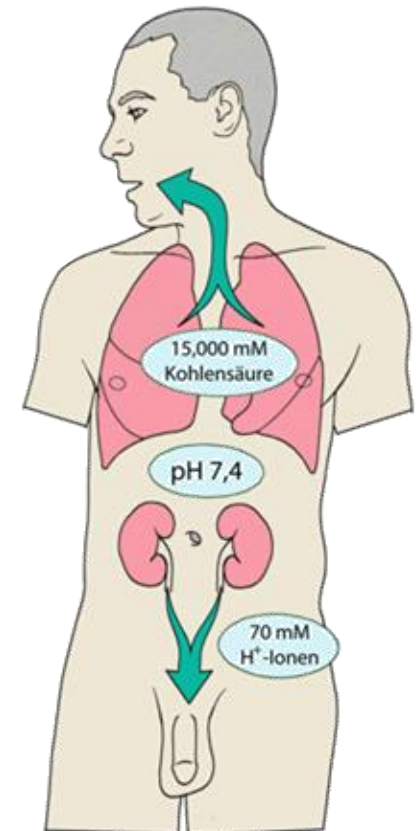
Direkt gemessen:

- pH
- pO₂
- pCO₂

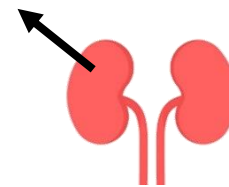
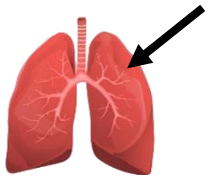
Berechnet:

- HCO₃⁻
- *base excess* (BE)
- sO₂

- **Säure:** gibt ab → **Proton** (H^+ -Ion) → **Base:** nimmt auf
- **pH-Wert:** negativer dekadischer Logarithmus der H^+ -Ionen-Konzentration (*potentia hydrogenii* = „Kraft/Potential des Wasserstoffs“):
 $\text{pH} (\text{Blut}) = 7,4 \rightarrow c(\text{H}^+) = 10^{-7,4} \text{ mol/l} = 0,0000000398 \text{ mol/l} = \sim 40 \text{ nmol H}^+/\text{l}$
- Täglich fallen im Körper >15 Mol saure Valenzen an.
- Der Blut-pH wird im Wesentlichen im physiologischen Bereich (zwischen **Azidose** ($<7,37$) und **Alkalose** ($>7,45$)) gehalten durch:
 - chemische **Pufferung** (→ Anwesenheit von Pufferbasen verschiebt den Blut-pH leicht in den alkalischen Bereich)
 - alveoläre **Ventilation** (Ausscheidung von Kohlendioxid aus dem Fett- und Kohlenhydrat-Metabolismus)
 - renale **Ausscheidung** (von „nicht-flüchtigen“ Säuren aus Nahrung oder Protein-Katabolismus)

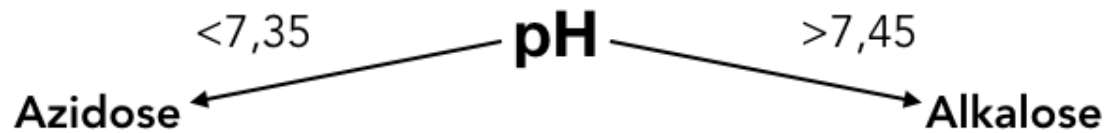


- Puffer halten durch Aufnahme bzw. Abgabe von Protonen den pH-Wert stabil.
- **c(Pufferbasen)** im Blut = **48 mmol/l** (→ Abweichung davon: **base excess**, BE):
 - 24 mmol/l **Bikarbonat** („Standardbikarbonat“)
 - 24 mmol/l **Nicht-Bikarbonat-Puffer** (Hämoglobin, Proteine, Phosphat)
- Bildung und Rückresorption von Bikarbonat finden in der **Niere** statt.
- hohe Pufferkapazität des Bikarbonatpuffers, da **offenes System**:



- Besonderheit des „**dynamischen**“ **Hämoglobin-Puffers**:
 - saures Milieu „treibt“ O_2 vom Hämoglobin (→ bessere O_2 -Abgabe im unterversorgten Gewebe) → **Bohr-Effekt**
 - fallender pO_2 steigert die Bindungsfähigkeit für CO_2 (→ im Gewebe bessere CO_2 -Aufnahme, in der Lunge bessere Abgabe von CO_2) → **Haldane-Effekt**

BGA Beurteilung



$\text{HCO}_3 \blacktriangledown + \checkmark \text{CO}_2 = \text{metabolische Azidose}$
 $\text{HCO}_3 \checkmark + \blacktriangle \text{CO}_2 = \text{resp. Azidose}$
 $\text{HCO}_3 \blacktriangle + \blacktriangle \text{CO}_2 = \text{metabolisch teilkompensierte Azidose}$

$\text{HCO}_3 \blacktriangle + \checkmark \text{CO}_2 = \text{metabolische Alkalose}$
 $\text{HCO}_3 \checkmark + \blacktriangledown \text{CO}_2 = \text{resp. Alkalose}$
 $\text{HCO}_3 \blacktriangledown + \blacktriangledown \text{CO}_2 = \text{metabolisch teilkompensierte Alkalose}$

Was trifft auf das Bikarbonat zu?

- (1) Im Pulmonalkreislauf wandert es in die Erythrozyten.
 - (2) Es ist die zur Kompensation respiratorischer Azidosen bedeutendste Pufferbase.
 - (3) Es stellt die Hälfte der Pufferbasenvalenzen.
 - (4) Für seine Umwandlung in H_2CO_3 ist Karboanhydrase nötig.
-
- a) 1, 2 und 3 sind richtig
 - b) 1 und 3 sind richtig
 - c) 2 und 4 sind richtig
 - d) nur 4 trifft zu
 - e) alle Aussagen treffen zu

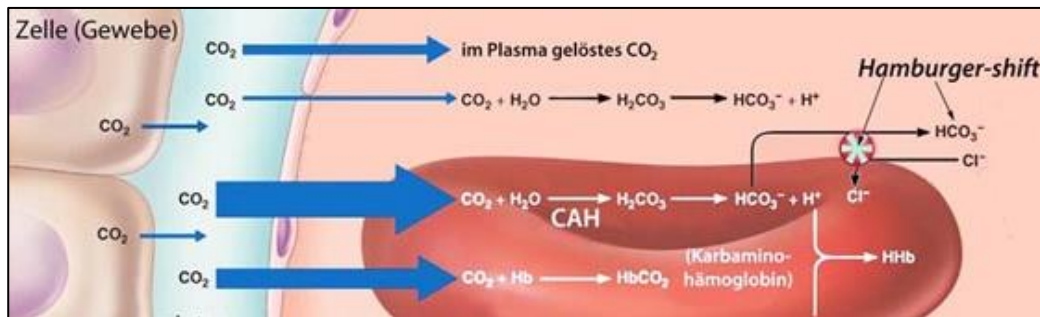
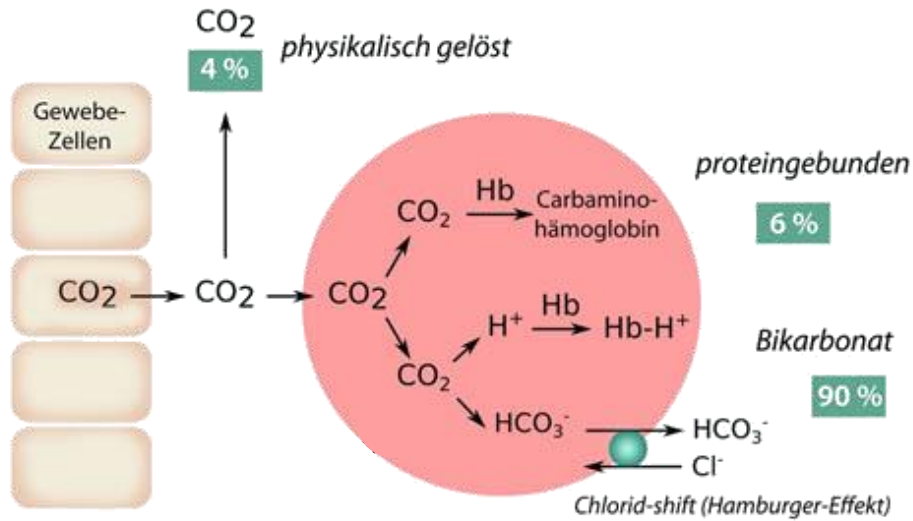


Von einem ungenügend durchbluteten aktiven Muskel wird eine venöse Blutprobe genommen. Was ist darin verringert?

- (1) Pufferbasenkonzentration
 - (2) Kaliumkonzentration
 - (3) Sauerstoffsättigung
 - (4) Wasserstoffionenkonzentration
-
- a) 1, 2 und 3 sind richtig
 - b) 1 und 3 sind richtig
 - c) 2 und 4 sind richtig
 - d) nur 4 trifft zu
 - e) alle Aussagen treffen zu



- CO₂-Transport im Blut:



- In der Alveole laufen diese Vorgänge umgekehrt ab.

- 4 % physikalisch gelöst** → pCO₂

paCO₂ 40 → pvCO₂ 46 mmHg

CO₂ im Blut ~20x besser löslich als O₂

paCO₂ = CO₂-Produktion / alv. Ventilation

- 6 % als Carbamino-Hb**

- 90 % als Bikarbonat:**

- CO₂ diffundiert rasch in Erythrozyten.
- Dort katalysiert die **Carboanhydrase** die Umwandlung von CO₂ (und Wasser) in Kohlensäure.
- Diese zerfällt sofort in HCO₃⁻ und H⁺.
- 2/3 des HCO₃⁻ verlassen die Erythrozyten (**Hamburger-Shift**) und werden im Blutplasma transportiert. Eine Akkumulation von HCO₃⁻ in den Erythrozyten würde die Carboanhydrase zum Erlahmen bringen und wird so verhindert.

Was trifft zu?

- (1) Bei fixem pCO₂ transportiert oxygeniertes Blut mehr Kohlendioxid als desoxygeniertes.
 - (2) Die Transportfähigkeit des Blutes ist für Sauerstoff höher als für Kohlendioxid.
 - (3) In den Lungenalveolen wandert Bikarbonat aus den Erythrozyten, im Austausch gegen Chlorid.
 - (4) Die Sauerstofftransportkapazität des Hämoglobins nimmt mit dem pH zu.
-
- a) 1, 2 und 3 sind richtig
 - b) 1 und 3 sind richtig
 - c) 2 und 4 sind richtig
 - d) nur 4 trifft zu
 - e) alle Aussagen treffen zu



- Parameter des **Oxygenierungsstatus** des Blutes in der BGA:
 - Hämoglobingehalt [**c(Hb)**]
 - Sättigung [**sO₂**]
 - Partialdruck [**pO₂**]
 - Sauerstoffgehalt [**ctO₂**]

- Hämoglobingehalt c(Hb) und Sättigung sO₂:**

- Gesamt-Hb = O₂-Hb + HHb + COHb + MetHb**

tHb	3.5 ↓	g / dL
FO ₂ Hb	88.7 ↓	%
FCOHb	2.1 ↑	%
FMetHb	0.9	%
FHHb	8.3 ↑	%

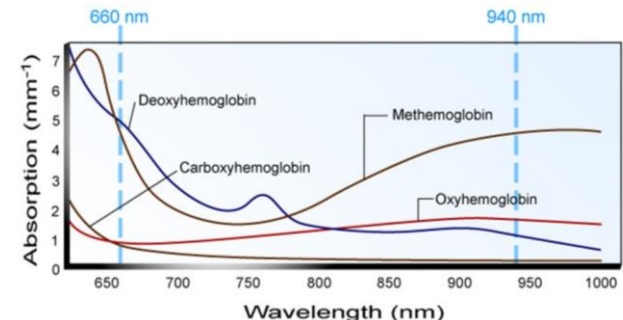
- Sättigung:**

sO ₂	91.4	%
-----------------	------	---

- $$sO_2 [\%] = \frac{c(O_2-Hb)}{c(O_2-Hb) + c(HHb) + c(COHb) + c(MetHb)} * 100$$

→ funktionelle bzw. fraktionelle Sättigung

(= prozentuale Ausnutzung der Sauerstofftransportkapazität des Hämoglobin)



- O_2 -Transport im Blut:

- **3 % physikalisch gelöst** → pO_2

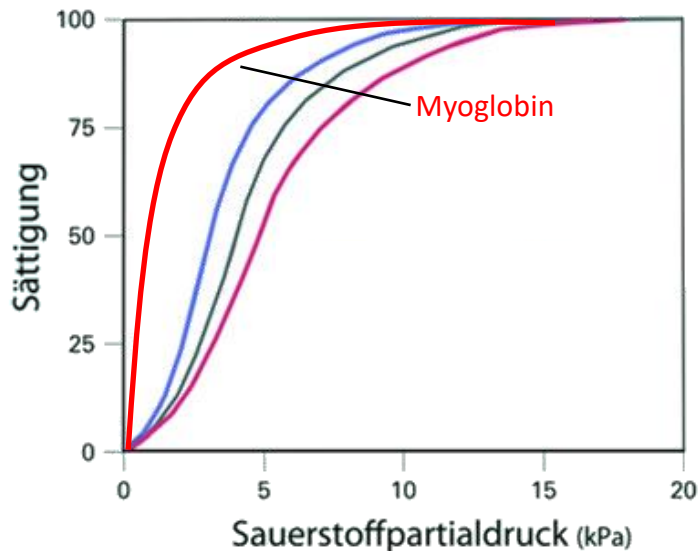
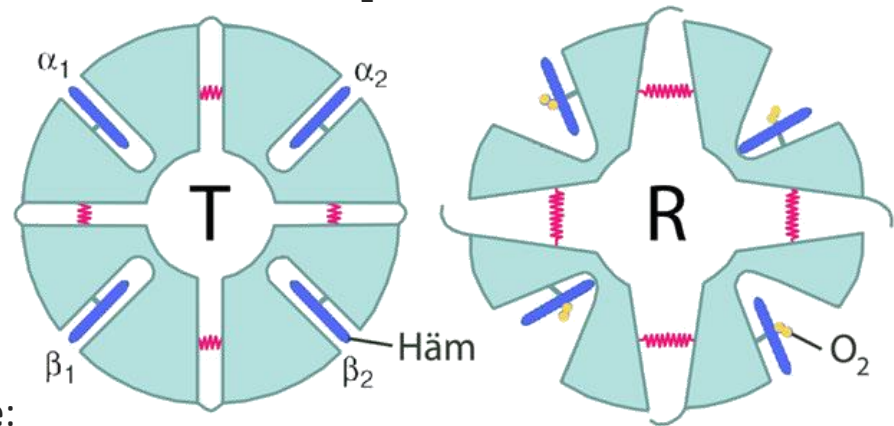
- pO_2 100 mmHg → ~3 ml O_2 /l Blut (= 0,3 Vol%; entspricht bei einem HZV von 6 l/min ~18 ml O_2 /min (demgegenüber ein Bedarf von 300 - 5.000 ml O_2 /min!))

$pO_2(T)$ 82.0 mmHg

- **97 % als Oxy-Hb:**

- 1 g Hb bindet **1,34 ml O_2** (Hüfner-Zahl):
~150 g Hb/l Blut → ~200 ml O_2 /l Blut
 - **allosterische Enzymkinetik:** je mehr O_2 gebunden wird, desto höher die O_2 -Affinität des Gesamtmoleküls

→ **sigmoide Form der O_2 -Bindungskurve:**



- niedriger pO_2 → starke Zunahme der Sättigung
- hoher pO_2 → gute Abgabe an die Umgebung



Temperatur -
pH +
 pCO_2 -
[2,3-DPG] -

bessere O_2 -Aufnahme
(in der Lunge)



Temperatur +
pH -
 pCO_2 +
[2,3-DPG] +

bessere O_2 -Abgabe
(im Gewebe)

Die mit dem Blut transportierte Sauerstoffmenge hängt bei einem pO_2 von >150 mmHg (entspr. 20 kPa) vor allem ab von...

- (1) dem pH-Wert des Blutes.
- (2) der 2,3-DPG-Konzentration in den Erythrozyten.
- (3) der Bluttemperatur.
- (4) dem Hämatokrit.

- a) 1, 2 und 3 sind richtig
- b) 1 und 3 sind richtig
- c) 2 und 4 sind richtig
- d) nur 4 trifft zu
- e) alle Aussagen treffen zu



- **Sauerstoffgehalt ctO_2 :**

$ctO_2(a)$ 4.6 mL/dL

- ctO_2 [ml/dl Blut] = $(1,34 * c(Hb) * sO_2) + (pO_2 * 0,003)$

→ Normwert ♀ 18 bis ♂ 23 ml/dl

- **CtO_2** integriert die wichtigen Parameter **Hb**, **Sättigung** und **Partialdruck!**

- Aus der ctO_2 und dem HZV ergibt sich das **Sauerstoffangebot DO_2** :

$$DO_2 = HZV * [(1.34 * Hb * SaO_2) + (paO_2 * 0.003)]$$

Normbereich 800 - 1000 ml/min

- Der **Sauerstoffverbrauch VO_2** beträgt in Ruhe etwa 1/4 des Angebotes (→ Abfall der sO_2 von ~100 % auf ~75 % (gemischtvenös)):

$$VO_2 = HZV * [1.34 * Hb * (SaO_2 - SvO_2)]$$

Normbereich 200 - 250 ml/min

- Die restliche Reserve steht bei Bedarf zur Verfügung (Mehrausschöpfung, z.B. bei Minderperfusion oder akuter Anämie (→ weiterer Abfall der SvO_2)).
- Der Herzgesunde steigert zunächst das HZV, die SvO_2 bleibt unverändert.

Die arterio-venöse Sauerstoffdifferenz ($avDO_2$)...

- (1) ist unabhängig von der metabolischen Aktivität des betreffenden Organs.
 - (2) ist in der Niere geringer als im Gehirn.
 - (3) hängt vom Hämatokrit ab.
 - (4) ist im Myokard schon bei körperlicher Ruhe sehr hoch.
-
- a) 1, 2 und 3 sind richtig
 - b) 1 und 3 sind richtig
 - c) 2 und 4 sind richtig
 - d) nur 4 trifft zu
 - e) alle Aussagen treffen zu



- paCO₂↑↓:
 - Störungen der alveolären Ventilation und des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses (Hypo-/Hyperventilation, Pumpversagen, Lungenembolie, Totraumventilation, Bronchokonstriktion, Atelektase, Shunt)
- ctO₂↓ (Hypoxämie):
 - **hypoxisch** (sO₂ ↓, pO₂ ↓ → desaturiertes Blut → Zyanose! (CAVE: bei schwerer Anämie fällt klinisch oft keine Zyanose auf!))
 - **anämisch** (c(Hb) ↓ → Transfusion; bei schwerer Anämie trotz guter sO₂ auch supportive O₂-Gabe sinnvoll, da der Beitrag des physikalisch gelösten O₂ an der ctO₂ zunimmt)
 - **toxisch** (sO₂ ↓ (COHb, MetHb) → funktionelle Sättigung „falsch“ hoch → keine Zyanose!) → hyperbare O₂-Therapie, Methylenblau
- sO₂↓, pO₂↓ (Hypoxie):
 - Störungen der alveolären Ventilation und des Ventilations-Perfusions-Verhältnisses
 - je nach differentialdiagnostischer Überlegung: adäquate FiO₂ (CAVE bei Minimal-Flow-Anästhesie!), Bronchoskopie, Rekrutierung & ausreichendes PEEP-Niveau (Therapie von Atelektasen, Erhöhung des alveolären pO₂), Kreislauftherapie, Lyse

SÄURE-BASE 37.0 °C		
pH	7.364 ↓	
pCO ₂	38.6	mmHg
pO ₂	83.1	mmHg
HCO ₃ ^{-act}	21.5	mmol / L
HCO ₃ ^{-std}	21.4	mmol / L
BE(B)	- 3.6	mmol / L
BE(ecf)	- 3.9	mmol / L
ctCO ₂	22.7	mmol / L
CO-OXYMETRIE		
Hct	10	%
tHb	3.5 ↓	g / dL
sO ₂	91.4	%
FO ₂ Hb	88.7 ↓	%
FCOHb	2.1 ↑	%
FMetHb	0.9	%
FHHb	8.3 ↑	%
SAUERSTOFFSTATUS 37.0 °C		
ctO ₂ (a)	4.6	mL / dL
KORRIGIERT 36.8 °C		
pH(T)	7.367	
pCO ₂ (T)	38.3	mmHg
pO ₂ (T)	82.0	mmHg
ELEKTROLYTE		
Na ⁺	134.4 ↓	mmol / L
K ⁺	4.01	mmol / L
Ca ⁺⁺	1.07 ↓	mmol / L
Ca ⁺⁺ (7.4)	1.05	mmol / L
Cl ⁻	106 ↑	mmol / L
AnGap	10.9	mmol / L
METABOLITE		
Glu	101 ↑	mg / dL
Lac	1.88 ↑	mmol / L
Temperatur	36.8 °C	
pAtm	760	mmHg

Vielen Dank!



Für Interessierte: „physiologie.cc“ ...