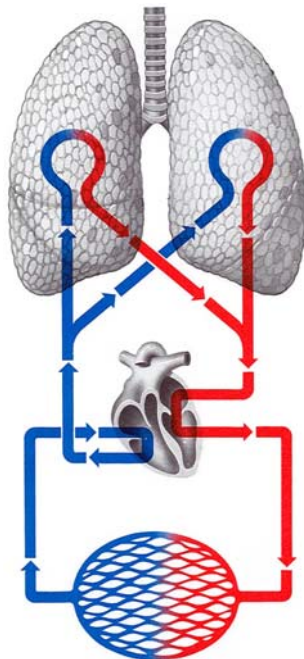




Kapitel 2

Kardiopulmonale Homöostase



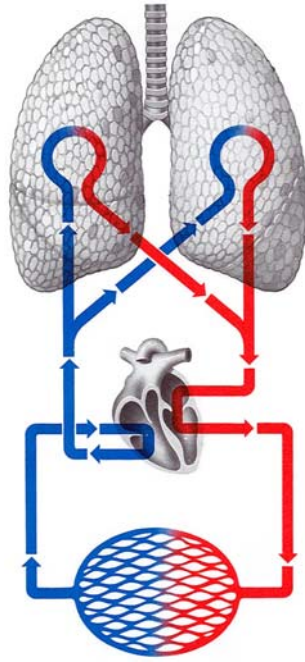
Primäre Funktion des Blutes im Rahmen der Atmung

Transport von

- O_2 aus der Lunge zum peripheren Gewebe,
- CO_2 aus der Peripherie zu den Lungen,
- H^+ vom Gewebe zu den Nieren

Blutgase (Gasspannungen im Blut) spiegeln somit die kardiopulmonale Homöostase wider, d.h. die Fähigkeit des Organismus, ein Gleichgewicht zwischen dem peripheren Bedarf (Zellatmung) und der Anlieferung von Brennstoffen sowie dem Abtransport von Schlacken zu gewährleisten:

pO_2 , pCO_2 , pH

**Externe Atmung:**

Ventilation, Verteilung, Diffusion,
pulmonaler Blutfluss,
Ventilations-Perfusions-Verhältnis,
Alveolär-arterielle O_2 -Differenz ($AaDO_2$),
Shunt

Gemischt-venöses Blut:

Sauerstoffsättigung (sO_2),
Sauerstoffgehalt (ctO_2),
Herz-Zeit-Volumen (HZV),
arterio-venöse O_2 -Differenz ($avDO_2$),
Sauerstofftransportkapazität (STK)

Innere Atmung (Metabolismus):

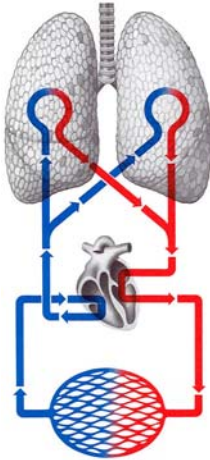
Sauerstoffverbrauch ($\dot{V}O_2$),
respiratorischer Quotient (RQ)



Kapitel 2.1

Kardiopulmonale Homöostase

Sauerstoff



HZV	5000 ml / min
ctO ₂	0,2 ml O ₂ / ml
·VO ₂	250 ml O ₂ / min

O₂ wird mit dem Blut durch den Körper gepumpt.

Das **Herz-Zeit-Volumen** (Produkt aus Auswurfvolumen und Herzfrequenz) beträgt üblicherweise etwa 5 l / min. Im normalen arteriellen Blut befinden sich pro Milliliter etwa 0,2 ml O₂ (**Sauerstoffgehalt, ctO₂**).

Die **Sauerstofftransportkapazität** errechnet sich somit aus

$$\begin{aligned} \text{STK} &= \text{HZV} \cdot \text{ctO}_2 \\ &= 5000 \text{ ml/min} \cdot 0,2 \text{ ml O}_2 / \text{ml} \\ &= 1000 \text{ ml O}_2 / \text{min} \end{aligned}$$

Ein erwachsener Mensch benötigt für den Ruhestoffwechsel in der Minute etwa 250 ml O₂ (**Sauerstoffverbrauch, ·VO₂**).

Das zum Herzen zurückkehrende Blut verliert damit 25% seines Sauerstoffgehalts, der **gemisch-venöse Sauerstoffgehalt** beträgt etwa 75% des arteriellen.

Die verbleibenden 75% nicht extrahierten Sauerstoffs bilden eine O₂-Reserve, die unter Belastung mobilisiert werden kann.



Antarktischer Weißblutfisch: keine Erythrozyten
(Anpassung an die Kälte: dünnflüssiges Blut lässt sich leichter durch den Körper pumpen.)



Physikalisch gelöster O₂

Nach dem Gesetz von Henry ist die physikalische gelöste Menge eines Gases in einer Flüssigkeit direkt proportional dem Löslichkeitskoeffizienten α (sog. Bunsen-Koeffizient) und dem Partialdruck des Gases.

α für O₂ und Vollblut bei 37°:

0,000031 ml O₂ / ml Blut / mm Hg

ctO₂ (physikalisch) =

0,000031 · 100 ml · 100 mm Hg =

0,3 ml O₂ / 100 ml Blut

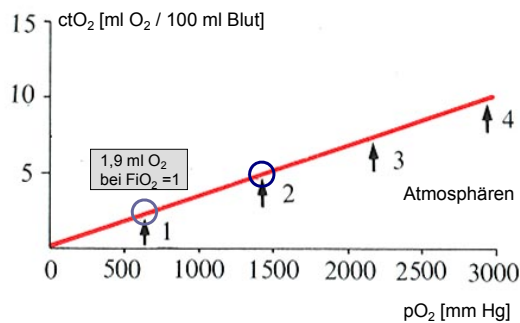
Minimalbedarf (STK = $\dot{V}O_2$)

STK = HZV · ctO₂ →

ctO₂ = STK / HZV →

ctO₂ = 250 ml/min / 5000 ml/min

= 5 ml O₂ / 100 ml Blut

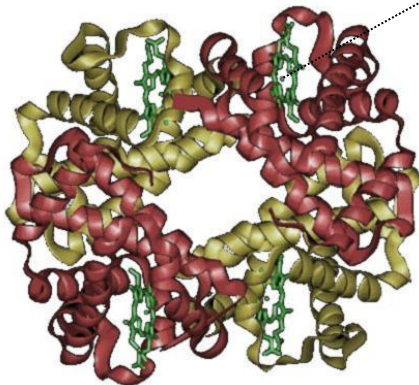
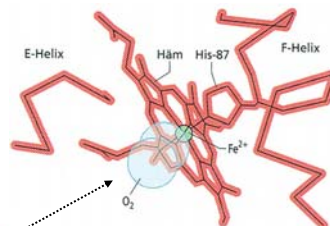


Bei lediglich physikalischer Lösung von O₂ im Blut könnte der Minimalbedarf nur bei einem Außendruck von 2 atm reinem O₂ gedeckt werden.



Hämoglobin

Hüfner'sche Zahl:
1 g Hb bindet 1,39 ml O₂



Durch Hämoglobin (Hb) wird bei Raumluftatmung die Aufnahmefähigkeit des Blutes für O₂ gegenüber dem Plasma um den Faktor 65 gesteigert.

Hb besteht aus 4 Proteinketten (Globin), in die jeweils eine eisenhaltige Häm-Einheit eingebunden ist.

An ein Hämoglobin-Molekül können somit 4 O₂-Moleküle gebunden werden (HbO₂); die Bindung ist reversibel und von verschiedenen Faktoren abhängig.



Sauerstoffsättigung (sO_2) und Gehalt (ctO_2)

Die Sauerstoffsättigung beschreibt den Anteil von HbO_2 an der maximalen Sauerstoffbindungskapazität des Hb:

$$sO_2 [\%] = \frac{HbO_2 \text{ (gemessen)}}{HbO_2 \text{ (maximal)}}$$

Ist der ctO_2 vom pO_2 abhängig ?

Bei einer Hb-Konzentration von 15 g / 100 ml Blut, einer sO_2 von 98% und unter Berücksichtigung der Hüfner'schen Zahl ergibt sich unter Raumlufatmung für den auf das Hämoglobin entfallenden **Sauerstoffgehalt (ctO_2)**:

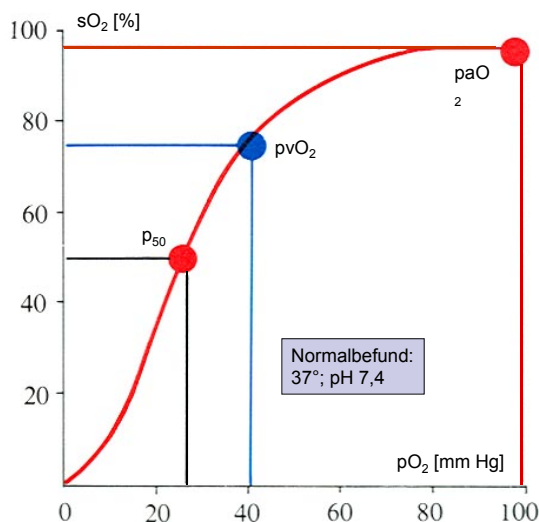
$$sO_2 \cdot Hb \cdot \text{Hüfner-Zahl} =$$

$$98 [\%] \cdot 15 [\text{g Hb}/100 \text{ ml}] \cdot 1,39 [\text{ml O}_2/\text{g Hb}] = 20 \text{ ml O}_2 / 100 \text{ ml Blut}$$

(vgl. 0,3 ml O_2 / 100 ml Blut bei rein physikalischer Lösung)



Sauerstoffbindungskurve ⁽¹⁾



Bei Raumlufatmung ($p_{aO_2}=100$) ist Hämoglobin zu etwa 98% gesättigt; eine 100%ige Sättigung wäre bei einem p_{aO_2} von ca. 250 mm Hg zu erwarten.

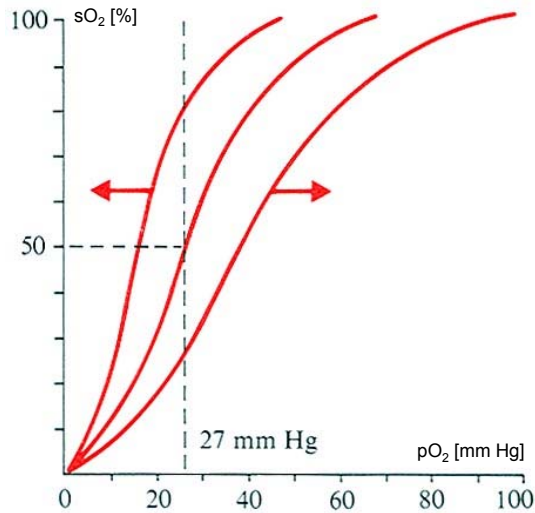
Im gemischt venösen Blut ($p_{vO_2}=40$) sind noch etwa 75% des Hämoglobins mit O_2 gesättigt.

Der steile untere Kurvenverlauf erklärt die leichte Sauerstoffabgabe im O_2 -verbrauchenden Gewebe: die Bindungsfähigkeit nimmt bei niedrigen O_2 -Partialdrücken schnell ab.

Der p_{50} -Wert beschreibt die Affinität von O_2 an das Hb unter den gewählten Bedingungen; normalerweise wird eine 50%ige Sättigung bei $p_{aO_2} = 27$ erreicht.

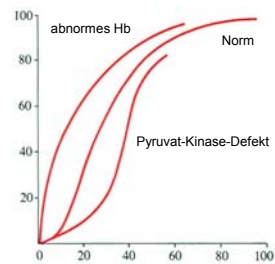


Sauerstoffbindungskurve (2)

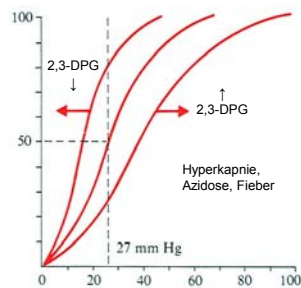
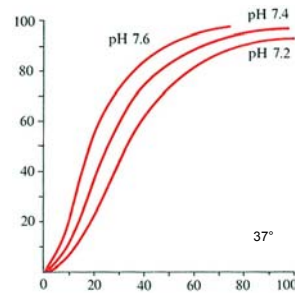
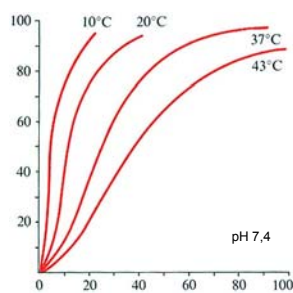


Bei einer Abnahme der Sauerstoffaffinität kommt es zu einer **Rechtsverschiebung** der Kurve: bei jedem gegebenen pO_2 ist die Sättigung vermindert bzw. die O_2 -Abgabe erleichtert. Davon profitiert eine O_2 -hungrige Peripherie, wengleich die pulmonale Aufnahme etwas behindert wird.

Bei einer Zunahme der Affinität (**Linksverschiebung**) hat es die Peripherie schwer!



Sauerstoffbindungskurve (3)



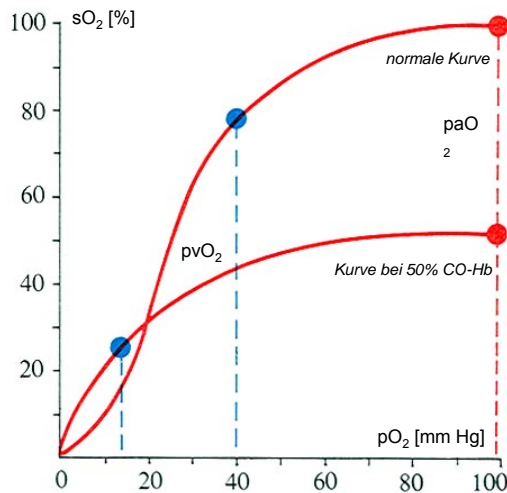
2,3-Diphosphoglycerat (2,3-DPG) entsteht innerhalb der Erythrozyten als Folge einer anaeroben Glykolyse. Es reagiert dadurch auf Hypoxie und erleichtert die O_2 -Abgabe in der Peripherie.

Die Konzentration von 2,3-DPG nimmt in Blutkonserven mit der Zeit ab!





Sauerstoffbindungskurve (4)



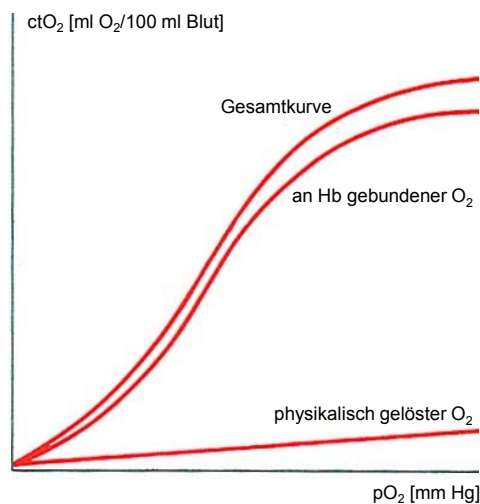
Kohlenmonoxid (CO) besitzt eine 210-fach höhere Affinität zum Hb als O_2 .

Es kommt dadurch nicht nur zu einer Verminderung der O_2 -Aufnahme, sondern auch zu einer Linksverschiebung der Bindungskurve: O_2 wird dann nur noch abgegeben, wenn in der Peripherie schon eine deutliche Hypoxie eingetreten ist.

Die „nur“ 5-15% CO-Hb, die im arteriellen Blut eines starken Rauchers zu finden sind, bedeuten für gesunde Menschen noch keine solche Gefahr, stellen aber bereits ein Risiko dar.



Sauerstoffgehaltskurve (1)



Der aktuelle Sauerstoffgehalt im Blut ändert sich mit der Sättigung, der Hämoglobinkonzentration und dem Sauerstoffpartialdruck:

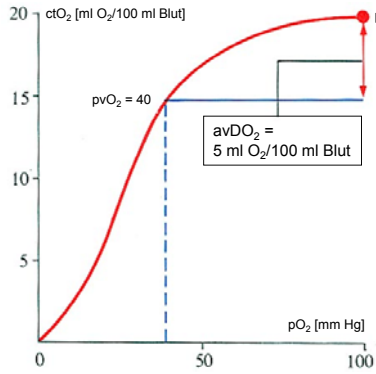
$$\begin{aligned} ctO_2 &= ctO_2 \text{ (physikalisch)} + ctO_2 \text{ (Hb)} \\ &= \alpha \cdot pO_2 + sO_2 \cdot Hb \cdot 1,39 \end{aligned}$$

Klinisch ist deshalb die **Sauerstoffgehaltskurve** (ctO_2 in Abhängigkeit vom pO_2) aussagekräftiger als die **Sauerstoffbindungskurve** (sO_2 in Abhängigkeit vom pO_2).

vgl. die Definition der O_2 -Transportkapazität:
 $STK = HZV \cdot ctO_2$

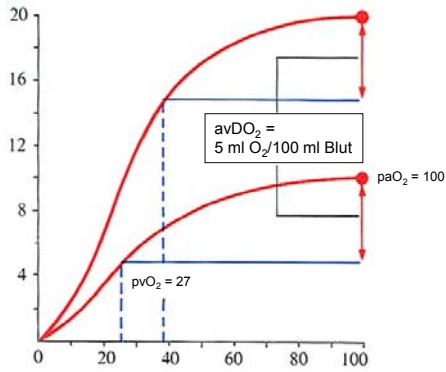


Sauerstoffgehaltskurve (2)



Normalwert, Hb= 15 g%,
ctO₂-Reserve 15 ml O₂/100 ml Blut

Anämie, Hb= 7 g%,
ctO₂-Reserve nur noch 5 ml O₂/100 ml Blut



arterio-venöse
Sauerstoffgehaltsdifferenz
 $avDO_2 = ctaO_2 - ctvO_2$

Sauerstoffgehaltskurve (3)

Was bringt eine Beatmung mit 100% O₂?
Wie groß sind dabei pvO₂ und ctO₂-Reserve?

Erinnern Sie sich an die Partialdrücke (sub-atmosphärischer Gesamtdruck) ?

	arterielles Blut bei FIO ₂ =1	gemischt-venöses Blut bei FIO ₂ =1
pO ₂	640	60
pCO ₂	40	46
pH ₂ O	47	47
pN ₂	0	0
P _{total}	727	153

