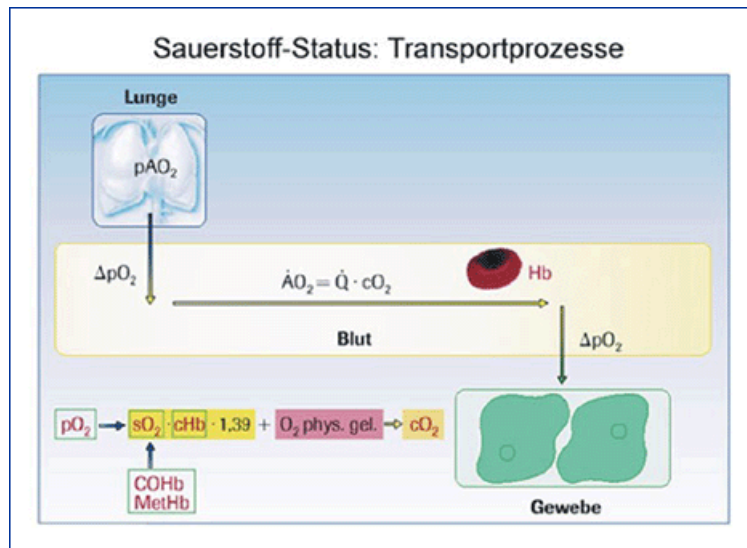


Sauerstoff von A bis Z: Alveole bis Zelle

Konvektion und Diffusion im laufenden Wechsel

Der im oxidativen Stoffwechsel aller Organe und ihrer Zellen laufend verbrauchte Sauerstoff erfordert eine kontinuierliche Nachlieferung, da der Organismus neben dem im Blut vorhandenen O_2 über keine größeren O_2 -Reserven verfügt. Die Nachlieferung erfolgt mit diffusiven und konvektiven Transportprozessen im laufenden Wechsel: Immer dann, wenn Strecken von mehr als wenigen μm zu überwinden sind, mit einer Diffusion von Sauerstoff nicht mehr zu bewältigen, müssen konvektive Transportprozesse eingesetzt werden, nämlich Ventilation und Blutkreislauf (Abb. Transportprozesse).



Der O_2 -Transport von der Lunge zum Gewebe erfolgt mit einem laufenden Wechsel von Konvektion (Ventilation und Kreislauf) und Diffusion, dem passiven Übertritt von O_2 aus der Alveole in das Blut und von dort in das Gewebe. Während die Partialdruckdifferenz (Δp_{O_2}) treibende Kraft für die Diffusion ist, wird das O_2 -Angebot neben der Durchblutung vom arteriellen O_2 -Gehalt (cO_2) bestimmt

Der Übertritt von O_2 von der Alveole in das Blut, ein Weg von wenigen μm , erfolgt durch einfache Diffusion, d. h. die treibende Kraft ist die O_2 -Partialdruckdifferenz (Δp_{O_2}), also die Differenz zwischen dem alveolären (p_{AO_2}) und dem gemischtvenösen O_2 -Partialdruck (p_{VO_2}). Am Ende der physiologischen Oxygenierung bzw. Arterialisierung des Blutes ist die alveoloarterielle Partialdruckdifferenz ($AaDO_2$) auf wenige mmHg reduziert und damit der arterielle O_2 -Partialdruck (p_{aO_2}) fast vollständig an den alveolären angeglichen. Mit dem Kreislauf, einem konvektiven Transport, aufrechterhalten von der Pumpleistung des Herzens, wird der Sauerstoff zu allen Organen und Geweben transportiert. Im Bereich der Mikrozirkulation, die für die Diffusion von O_2 vom Blut in das Gewebe mit einer extrem großen Austauschfläche und kurzen Diffusionswegen ausgestattet ist, soll O_2 möglichst effektiv alle Gewebezellen erreichen. Wieder ist die O_2 -Partialdruckdifferenz, dieses Mal zwischen Kapillarblut und Gewebezelle, die treibende Kraft für die Diffusion. Die O_2 -Versorgung des Gewebes ist somit gesichert, wenn eine ausreichend große Menge an Sauerstoff mit dem konvektiven Blutstrom nachgeliefert wird und der O_2 -Partialdruck, unter dem der Sauerstoff steht, genügend groß ist, einen diffusiven Transport auch zu den entferntesten Gewebezellen zu gewährleisten. Eine Gewebhypoxie, d. h. ein O_2 -Mangel, kann also ursächlich entweder durch eine Abnahme des konvektiven O_2 -Transports, der häufigere Fall, oder trotz ausreichender Nachlieferung durch eine Abnahme des kapillären O_2 -Partialdrucks bedingt sein, der seltenere Fall. Letzterer wäre insofern paradox, als O_2 zwar über die Kapillare antransportiert wird, aber ungenutzt am Gewebe vorbeifließt, weil er wegen des zu niedrigen p_{O_2} das Blut nicht verlassen kann (vergl. z. B. CO-Vergiftung).

O_2 -Utilisation: Bilanz von O_2 -Angebot und O_2 -Verbrauch

Unter physiologischen Bedingungen wird immer versucht, das O_2 -Angebot ($\dot{A}O_2$) so einzustellen, dass es den O_2 -Verbrauch ($\dot{Q}O_2$) deutlich übersteigt. Dies gilt gleichermaßen für das O_2 -Angebot an den Gesamtorganismus wie an die einzelnen Organe. Beide Werte können aus dem

Herzzeitvolumen (HZV) oder der regionalen Organdurchblutung (Q) sowie dem arteriellen O₂-Gehalt (caO₂) wie folgt abgeleitet werden:

$$\begin{aligned} \text{AO}_2 \text{ (l/min)} &= \text{HZV (l/min)} \times \text{caO}_2 \text{ (l/l)} \\ \text{AO}_2 \text{ (l/min)} &= \text{Q (l/min)} \times \text{caO}_2 \text{ (l/l)} \end{aligned}$$

Für die Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs wird zusätzlich die arteriovenöse O₂-Gehaltsdifferenz (avDO₂) benötigt, d. h. die Differenz zwischen arteriellem und venösem oder gemischtvenösem O₂-Gehalt (cvO₂):

$$\begin{aligned} \text{QO}_2 \text{ (l/min)} &= \text{HZV (l/min)} \times (\text{caO}_2 - \text{cvO}_2) \text{ (l/l)} \\ \text{QO}_2 \text{ (l/min)} &= \text{Q (l/min)} \times (\text{caO}_2 - \text{cvO}_2) \text{ (l/l)} \end{aligned}$$

Für einige lebenswichtige Organe des Menschen sind die Daten des O₂-Angebots und des O₂-Verbrauchs in **Tab. O₂-Utilisation** zusammengestellt.

Sauerstoff-Status: O ₂ -Utilisation						
Organ	Q (l/min)	cvO ₂ (l/l)	avDO ₂ (l/l)	AO ₂ (l/min)	QO ₂ (l/min)	UO ₂ (%)
Myocard	0,25	0,08	0,12	0,05	0,03	60
Gehirn	0,70	0,13	0,07	0,14	0,05	35
Leber*	1,4	0,14	0,06	0,28	0,08	30
Niere	1,25	0,185	0,015	0,250	0,02	8
Gesamt	5,0	0,15	0,05	1,0	0,25	25

O₂-Angebot (AO₂, l/min), O₂-Verbrauch (QO₂, l/min) und O₂-Utilisation (UO₂, %) lebenswichtiger Organe des Menschen in körperlicher Ruhe unter Verwendung der Durchblutung (Q, l/min) und des venösen (cvO₂, l/l) O₂-Gehalts im Vergleich zum Gesamt-Organismus (Q = HZV) mit dem gemischtvenösen O₂-Gehalt (cvO₂, l/l). Die arteriovenöse O₂-Gehaltsdifferenz (avDO₂) wurde mit einem arteriellen O₂-Gehalt von 0,2 l/l berechnet (Zahlen gerundet).

* incl. Magen-Darm-Trakt

Die für jedes Organ spezifische Bilanz zwischen O₂-Verbrauch und O₂-Angebot kann über die O₂-Utilisation beschrieben werden, d. h. der bezogen auf das Angebot prozentuale Verbrauch bei einmaliger Passage des Blutes durch dieses Organ. Auch diese Daten sind in **Tab. O₂-Utilisation** aufgeführt und demonstrieren folgende Fakten:

Das Organ mit der größten Utilisation ist das Myokard, das Organ mit der kleinsten Utilisation die Niere, die wegen ihrer Ausscheidungsfunktion mit einer extrem großen Durchblutung ausgestattet ist.

Grundsätzlich können alle Organe - mit zwei Ausnahmen bei unterschiedlicher Begründung - den mit dem arteriellen Blut angebotenen Sauerstoff praktisch vollständig utilisieren.

Wegen seiner speziellen O₂-Versorgungsbedingungen benötigt das ZNS zumindest zum Erhalt des Bewusstseins einen venösen pO₂ von 20 mmHg [Nunn 1993] und die Nieren haben wegen ihrer sehr großen Durchblutung keine Möglichkeit, den angebotenen Sauerstoff zu verbrauchen. Für alle anderen Organe aber gilt diese Aussage, insbesondere für das Myokard, für das der minimale pvO₂ am Menschen mit etwa 5 mmHg bestimmt wurde, und auch für die Leber, die im Tierversuch eine Utilisation von 97 - 100 % erreichen kann. Am Menschen gewonnene Befunde des gemischtvenösen Blutes können als Beleg hierfür dienen: Dialyse-Patienten (keine Nierendurchblutung) mit renaler Anämie (cHb = 10 g/dl) unter maximaler körperlicher Belastung weisen eine sO₂ von nur noch 12 % auf, Probanden unter simulierten Höhenbedingungen (4.600 m) bei körperlicher Belastung eine sO₂ unter 10 % [Zander 1996 (B)].

O₂-Verbrauch oder O₂-Aufnahme

Prinzipiell kann der O₂-Verbrauch des Menschen auf zwei Wegen bestimmt werden, die unter steady state Bedingungen gleiche Werte ergeben sollten. Einmal der aus Kenntnis des HZV und der avDO₂ ermittelte eigentliche O₂-Verbrauch QO₂ und zum anderen die über die Ventilation, d. h. das Atemzeitvolumen (AZV), zu bestimmende O₂-Aufnahme VO₂:

$$\text{VO}_2 \text{ (l/min)} = \text{AZV (l/min)} \times (\text{FIO}_2 - \text{FEO}_2)$$

Bei einem AZV von 7 l/min und einer Differenz der inspiratorischen (FIO_2) und expiratorischen (FEO_2) O_2 -Fraktionen von 0,036 (3,6 %) würde sich wieder der Wert von 0,25 l/min für die VO_2 ergeben. Tatsächlich kann diese Übereinstimmung unter klinischen Bedingungen selbst für Pneumonie-Patienten demonstriert werden [Weyland et al. 1994]. Wenn trotzdem je nach eingesetzter Methodik, nämlich respiratorische (offenes bzw. geschlossenes System) oder blutige Verfahren (HZV und $avDO_2$) von einigen Autoren Differenzen zwischen O_2 -Aufnahme und -Verbrauch beschrieben werden [Nunn 2000], dann dürfte dies am ehesten allein auf methodische Probleme hinweisen.