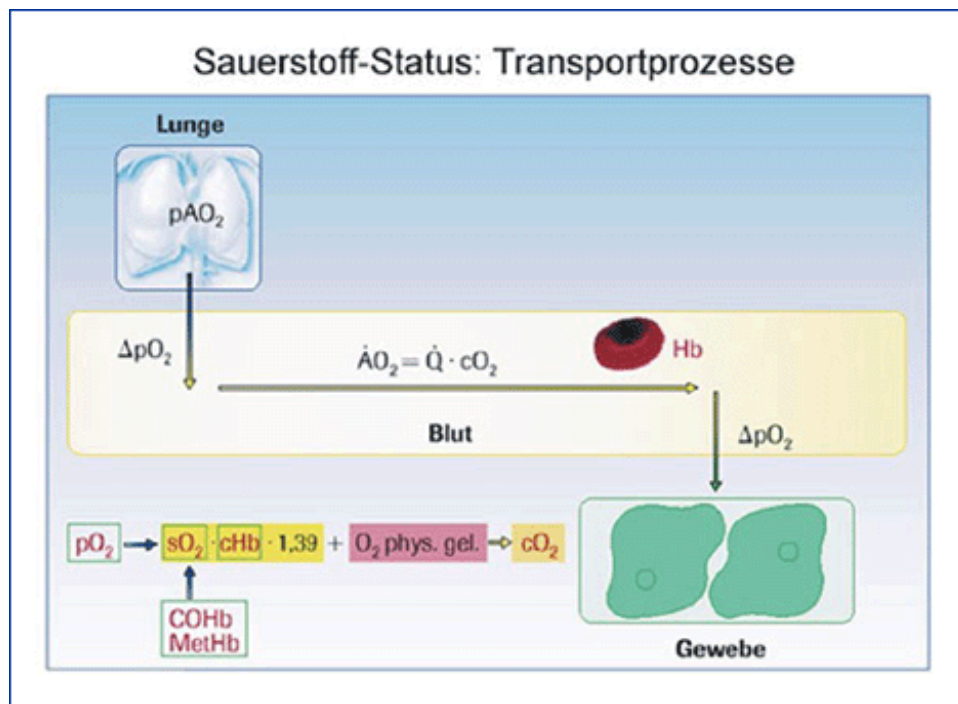


# Sauerstoff von A bis Z: Alveole bis Zelle

## 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  $\mu\text{m}$  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 ( $\Delta pO_2$ ) 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  $\mu\text{m}$ , erfolgt durch einfache Diffusion, d. h. die treibende Kraft ist die  $O_2$ -Partialdruckdifferenz ( $\Delta pO_2$ ), also die Differenz zwischen dem alveolären ( $pAO_2$ ) und dem gemischtvenösen  $O_2$ -Partialdruck ( $pVO_2$ ). Am Ende der physiologischen Oxygenierung bzw. Arterialisierung des Blutes ist die alveolo-arterielle Partialdruckdifferenz ( $AaDO_2$ ) auf wenige mmHg reduziert und damit der arterielle  $O_2$ -Partialdruck ( $paO_2$ ) 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<sub>2</sub> vom Blut in das Gewebe mit einer extrem großen Austauschfläche und kurzen Diffusionswegen ausgestattet ist, soll O<sub>2</sub> möglichst effektiv alle Gewebezellen erreichen. Wieder ist die O<sub>2</sub>-Partialdruckdifferenz, dieses Mal zwischen Kapillarblut und Gewebezelle, die treibende Kraft für die Diffusion. Die O<sub>2</sub>-Versorgung des Gewebes ist somit gesichert, wenn eine ausreichend große Menge an Sauerstoff mit dem konvektiven Blutstrom nachgeliefert wird und der O<sub>2</sub>-Partialdruck, unter dem der Sauerstoff steht, genügend groß ist, einen diffusiven Transport auch zu den entferntesten Gewebezellen zu gewährleisten. Eine Gewebehypoxie, d. h. ein O<sub>2</sub>-Mangel, kann also ursächlich entweder durch eine Abnahme des konvektiven O<sub>2</sub>-Transports, der häufigere Fall, oder trotz ausreichender Nachlieferung durch eine Abnahme des kapillären O<sub>2</sub>-Partialdrucks bedingt sein, der seltenere Fall. Letzterer wäre insofern paradox, als O<sub>2</sub> zwar über die Kapillare antransportiert wird, aber ungenutzt am Gewebe vorbeifließt, weil er wegen des zu niedrigen pO<sub>2</sub> das Blut nicht verlassen kann (vergl. z. B. CO-Vergiftung).

## O<sub>2</sub>-Utilisation: Bilanz von O<sub>2</sub>-Angebot und O<sub>2</sub>-Verbrauch

Unter physiologischen Bedingungen wird immer versucht, das O<sub>2</sub>-Angebot (AO<sub>2</sub>) so einzustellen, dass es den O<sub>2</sub>-Verbrauch (QO<sub>2</sub>) deutlich übersteigt. Dies gilt gleichermaßen für das O<sub>2</sub>-Angebot an den Gesamtorganismus wie an die einzelnen Organe. Beide Werte können aus dem Herzzeitvolumen (HZV) oder der regionalen Organdurchblutung (Q) sowie dem arteriellen O<sub>2</sub>-Gehalt (caO<sub>2</sub>) wie folgt abgeleitet werden:

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

Für die Ermittlung des Sauerstoffverbrauchs wird zusätzlich die arteriovenöse O<sub>2</sub>-Gehaltsdifferenz (avDO<sub>2</sub>) benötigt, d. h. die Differenz zwischen arteriellem und venösem oder gemischtvenösem O<sub>2</sub>-Gehalt (cvO<sub>2</sub>):

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

Für einige lebenswichtige Organe des Menschen sind die Daten des O<sub>2</sub>-Angebots und des O<sub>2</sub>-Verbrauchs in **Tab. O<sub>2</sub>-Utilisation** zusammengestellt.

Sauerstoff-Status: O <sub>2</sub> -Utilisation						
Organ	Q (l/min)	cvO <sub>2</sub> (l/l)	avDO <sub>2</sub> (l/l)	AO <sub>2</sub> (l/min)	QO <sub>2</sub> (l/min)	UO <sub>2</sub> (%)
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

O<sub>2</sub>-Angebot (AO<sub>2</sub>, l/min), O<sub>2</sub>-Verbrauch (QO<sub>2</sub>, l/min) und O<sub>2</sub>-Utilisation (UO<sub>2</sub>, %) lebenswichtiger Organe des Menschen in körperlicher Ruhe unter Verwendung der Durchblutung (Q, l/min) und des venösen (cvO<sub>2</sub>, l/l) O<sub>2</sub>-Gehalts im Vergleich zum Gesamt-Organismus (Q = HZV) mit dem gemischtvenösen O<sub>2</sub>-Gehalt (cvO<sub>2</sub>, l/l). Die arteriovenöse O<sub>2</sub>-Gehaltsdifferenz (avDO<sub>2</sub>) wurde mit einem arteriellen O<sub>2</sub>-Gehalt von 0,2 l/l berechnet (Zahlen gerundet).

\* incl. Magen-Darm-Trakt

Die für jedes Organ spezifische Bilanz zwischen O<sub>2</sub>-Verbrauch und O<sub>2</sub>-Angebot kann über die O<sub>2</sub>-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. O<sub>2</sub>-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 O<sub>2</sub>-Versorgungsbedingungen benötigt das ZNS zumindest zum Erhalt des Bewusstseins einen venösen pO<sub>2</sub> 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 pvO<sub>2</sub> 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 sO<sub>2</sub> von nur noch 12 % auf, Probanden unter simulierten Höhenbedingungen (4.600 m) bei körperlicher Belastung eine sO<sub>2</sub> unter 10 % [Zander 1996 (B)].

## O<sub>2</sub>-Verbrauch oder O<sub>2</sub>-Aufnahme

Prinzipiell kann der O<sub>2</sub>-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 avDO<sub>2</sub> ermittelte eigentliche O<sub>2</sub>-Verbrauch QO<sub>2</sub> und zum anderen die über die Ventilation, d. h. das Atemzeitvolumen (AZV), zu

bestimmende O<sub>2</sub>-Aufnahme VO<sub>2</sub>:

$$VO_2 \text{ (l/min)} = AZV \text{ (l/min)} \times (FIO_2 - FEO_2)$$

Bei einem AZV von 7 l/min und einer Differenz der inspiratorischen (FIO<sub>2</sub>) und expiratorischen (FEO<sub>2</sub>) O<sub>2</sub>-Fraktionen von 0,036 (3,6 %) würde sich wieder der Wert von 0,25 l/min für die VO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub>) von einigen Autoren Differenzen zwischen O<sub>2</sub>-Aufnahme und -Verbrauch beschrieben werden [Nunn 2000], dann dürfte dies am ehesten allein auf methodische Probleme hinweisen.