

Berechnung der arteriellen O₂-Konzentration

R. Zander

Physiologisches Institut der Universität Mainz, BRD

Einleitung

Die O₂-Konzentration des Blutes beinhaltet den großen Anteil chemisch an Hämoglobin gebundenen Sauerstoffs sowie den kleinen Anteil physikalisch gelösten Sauerstoffs. Während sich der chemisch gebundene O₂ nur in den Erythrozyten befindet, verteilt sich der physikalisch gelöste O₂ auf Erythrozyten und Plasma.

Für den Fall, daß die Kenntnis der O₂-Konzentration (O₂-Gehalt) des arteriellen Blutes erforderlich ist, ein entsprechendes Meßverfahren aber nicht zur Verfügung steht, kann man den Versuch unternehmen, die O₂-Konzentration aus anderen, bisweilen bekannten Daten zu ermitteln. Notwendig für die Berechnung des chemisch gebundenen Sauerstoffs ist die Hb-Konzentration (cHb, g/dl) und die O₂-Sättigung (sO₂, %), für die Berechnung des physikalisch gelösten Sauerstoffs wird der O₂-Partialdruck (pO₂, mm Hg) und die O₂-Löslichkeit (α_{O_2} , ml/ml/atm) benötigt. Stehen diese Daten nicht vollständig zur Verfügung, so kann die O₂-Konzentration des arteriellen Blutes nur näherungsweise bestimmt werden. Dazu können zwei Beispiele angeführt werden:

Neuere Mehrwellenlängen-Oxymeter (CO- oder Häm-Oxymeter) mit 4–7 Wellenlängen können zwar aus den gemessenen Daten von cHb und sO₂ den chemisch gebundenen O₂ berechnen, die so erhaltene O₂-Konzentration vernachlässigt aber den physikalisch gelösten Sauerstoff. Zum Beispiel wird für den Fall einer Hyperoxie dabei eine O₂-Konzentration berechnet, die deutlich unterhalb der tatsächlichen cO₂ liegen muß.

Blutgasanalytoren, die zum Teil schon die Hb-Konzentration messen können, berechnen aus den Daten des Säure-Basen-Status und dem

gemessenen pO_2 die O_2 -Sättigung, und daraus dann mit cHb den chemisch gebundenen O_2 . Mit einer vorgegebenen O_2 -Löslichkeit und dem gemessenen pO_2 kann dann der physikalisch gelöste O_2 ermittelt und die O_2 -Konzentration berechnet werden.

Auch dieses Vorgehen kann die tatsächliche O_2 -Konzentration nur näherungsweise ermitteln, da einige vereinfachende Annahmen gemacht werden müssen (normale O_2 -Bindungskurve, O_2 -Löslichkeit) und nur die sogenannte partielle O_2 -Sättigung (psO_2 , %) benutzt werden kann. Auf letzteren Punkt (psO_2) wird an anderer Stelle dieses Buches eingegangen.

Für die exakte Berechnung der O_2 -Konzentration des arteriellen Blutes sollen an dieser Stelle die notwendigen Daten genannt und das Vorgehen beschrieben werden.

Chemisch gebundener Sauerstoff

Aufgrund der Tatsache, daß 1 mol Hb maximal 4 mol O_2 binden kann, ergibt sich für die sogenannte theoretische Hüfnersche Zahl ein Wert von 1,39 ml O_2 /g Hb, wenn ein Molekulargewicht von 64 458 g für das Hämoglobinmolekül und ein Molvolumen für Sauerstoff von 22,394 l/mol angenommen wird. Diese Angabe wird immer mit dem Namen Hüfners verbunden, weil dieser 1894 erstmals den Versuch unternommen hat, diesen Zahlenwert experimentell zu bestätigen [3]. Aber sowohl Hüfner als auch einer Reihe anderer Autoren nach ihm gelang es nicht, diesen Zahlenwert zu messen. Alle später bestimmten Werte lagen zwischen dem von Hüfner mit 1,34 ml/g gemessenen und dem theoretischen Wert von 1,39 ml/g.

Die Ursachen liegen darin begründet, daß einerseits Spuren von COHb, MetHb und SulfHb kaum experimentell zu beseitigen sind, andererseits die notwendige Korrektur des physikalisch gelösten Sauerstoffs Schwierigkeiten bereitet hat. Aus diesem Grunde kann empfohlen werden, nur eine theoretische Hüfnersche Zahl von 1,39 ml/g zu verwenden und etwaige Spuren von COHb, MetHb und SulfHb, die zu einer Abnahme der O_2 -Konzentration führen können, bei der O_2 -Sättigung des Blutes zu berücksichtigen.

Damit ist der Weg zur Berechnung der Konzentration des chemisch gebundenen O_2 vorgezeichnet. Bei Kenntnis der Hb-Konzentration (cHb) und der O_2 -Sättigung (sO_2) wird die O_2 -Konzentration wie folgt erhalten:

$$cO_2 \text{ (ml/dl)} = cHb \text{ (g/dl)} \times sO_2 [1] \times 1,39 \text{ (ml/g)}$$

Dabei ist darauf hinzuweisen, daß die tatsächliche (nicht die partielle)

sO₂ zu verwenden ist und daß die Sättigung als Bruchteil von 1 einzusetzen ist (z. B. sO₂ = 50% als 0,5).

Für eine Hb-Konzentration von 15 g/dl und eine O₂-Sättigung von 97% ergibt sich dann zum Beispiel eine O₂-Konzentration für den chemisch gebundenen O₂ allein von 20,2 ml/dl.

Physikalisch gelöster Sauerstoff

Gemäß dem Gesetz von Henry ergibt sich die Konzentration des physikalisch gelösten O₂ aus dem Produkt von O₂-Partialdruck und dem O₂-Löslichkeitskoeffizienten α_{O_2} . Letzterer wird üblicherweise als sogenannter Bunsenscher Löslichkeitskoeffizient angegeben: ml O₂/ml Flüssigkeit/1 atm Partialdruck (ml/ml/atm). Er ist abhängig von der Temperatur.

Während heute eine sehr große Zahl von O₂-Löslichkeitskoeffizienten für verschiedene Flüssigkeiten auch bei 37 °C bekannt ist, weist die Bestimmung der O₂-Löslichkeit im Blut eine besondere Schwierigkeit auf. Die vergleichsweise kleine Konzentration des physikalisch gelösten O₂ muß im Beisein der sehr großen Konzentration an chemisch gebundenem O₂ ermittelt werden. Mit einer Ausnahme [2] wurde dabei immer so vorgegangen, daß das Hämoglobin oxidiert (Bildung von MetHb) und damit eine reversible Anlagerung von O₂ unterbunden wurde.

Mit dem Ziel, die O₂-Löslichkeit im Blut des Menschen bei 37 °C unter weitgehend physiologischen Bedingungen zu bestimmen, wurde ein anderes Verfahren benutzt [6]. Einmal wurde die O₂-Konzentration in Blutproben gemessen, deren pO₂ zwischen 170 und 700 mm Hg betrug, d. h. das Hämoglobin war immer mit O₂ gesättigt und die Zunahme der O₂-Konzentration mit zunehmendem pO₂ entsprach der O₂-Löslichkeit. Zum anderen wurde die O₂-Konzentration in solchen Blutproben gemessen, die zuvor mit 30% CO begast wurden, so daß das Hämoglobin keinen O₂ anlagern konnte.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Abbildung 1 zusammengestellt und können wie folgt zusammengefaßt werden: Ausgehend von der bereits früher bestimmten O₂-Löslichkeit des Plasmas [5] nimmt die O₂-Löslichkeit des Blutes mit zunehmender Hb-Konzentration zu, die Ergebnisse unterscheiden sich je nach methodischem Vorgehen nicht (Ausschaltung des Hb mit hohen pO₂-Werten oder mit CO), auch Erythrozytenmembranen beeinflussen die O₂-Löslichkeit nicht. Es ist offen-

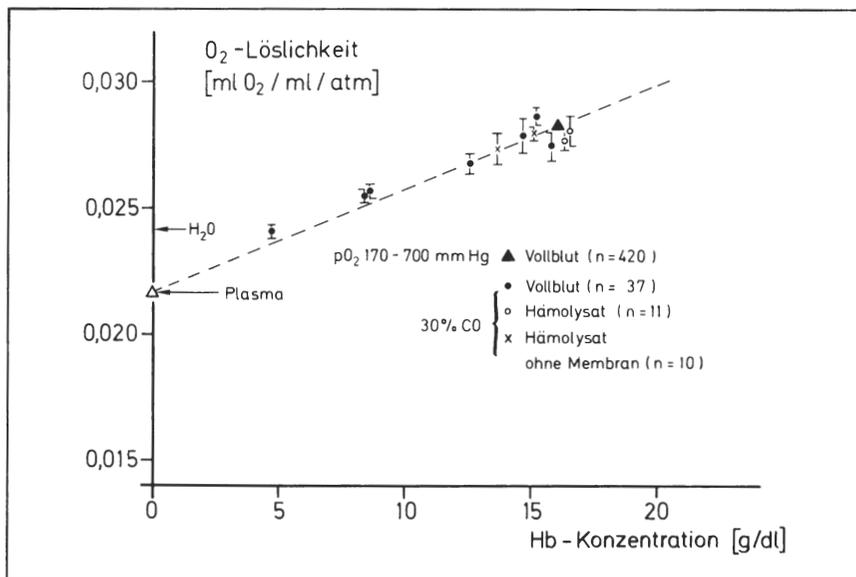


Abb. 1. Meßwerte der O₂-Löslichkeit des Blutes bei 37 °C in ml/ml/atm als Funktion der Hb-Konzentration (cHb) in g/dl (Daten aus [6]). Ausgehend von der O₂-Löslichkeit des Plasmas steigt die O₂-Löslichkeit des Blutes mit zunehmender Hb-Konzentration linear an, Erythrozytenmembranen haben keinen Einfluß auf die O₂-Löslichkeit. Das experimentelle Vorgehen zur Ausschaltung der O₂-Bindung an Hb (pO₂ 170–700 mm Hg oder Blockierung mit 30% CO) beeinflusst die Meßwerte offensichtlich nicht.

sichtlich, daß die hier mitgeteilten Werte der O₂-Löslichkeit deutlich über dem meist zitierten Wert aus der Arbeitsgruppe von Van Slyke [4] liegen (0,0237 ml/ml/atm für Normalblut bei 37 °C).

Bei Kenntnis der Hb-Konzentration (g/dl) oder des Hämatokrits (Vol.%) kann unter Verwendung der gemessenen O₂-Löslichkeit des Plasmas von 0,0217 ml/ml/atm [5] die O₂-Löslichkeit des Blutes in ml/ml/atm wie folgt erhalten werden:

$$\alpha_{O_2} = cHb \cdot 0,00041 + 0,0217 \text{ oder}$$

$$\alpha_{O_2} = Hkt \cdot 0,000137 + 0,0217$$

Für eine Hb-Konzentration von 15 g/dl (Hkt = 45%) würde sich demnach ein O₂-Löslichkeitskoeffizient von 0,0279 ml/ml/atm ergeben.

Aus Praktikabilitätsgründen kann man den O₂-Löslichkeitskoeffizienten in ml/dl/mmHg angeben (anstatt ml/ml/atm), woraus sich folgende Werte ableiten lassen:

0,0037 ml/dl/mm Hg für cHb = 15 g/dl,
 0,0034 ml/dl/mm Hg für cHb = 10 g/dl,
 0,0031 ml/dl/mm Hg für cHb = 5 g/dl,
 0,0029 ml/dl/mm Hg für Plasma.

Die Berechnung der Konzentration des physikalisch gelösten Sauerstoffs kann nun bei Kenntnis des O₂-Partialdrucks (pO₂, mm Hg) aus dem Produkt von pO₂ und αO₂ erfolgen:

$$cO_2 \text{ (ml/dl)} = pO_2 \text{ (mm Hg)} \cdot \alpha O_2 \text{ (ml/dl/mm Hg)}$$

Für einen pO₂ von 90 mm Hg und ein αO₂ von 0,0037 ml/dl/mm Hg, d. h. Normalblut, würde sich demnach eine O₂-Konzentration von 0,33 ml/dl ergeben, für einen pO₂ von 600 mm Hg (Hyperoxie) ein Wert von 2,2 ml/dl.

Berechnung der O₂-Konzentration

Da sich die O₂-Konzentration aus der Summe von chemisch gebundenem und physikalisch gelöstem O₂ ergibt, kann die O₂-Konzentration (cO₂, ml/dl) wie folgt erhalten werden:

$$cO_2 \text{ (ml/dl)} = (cHb \cdot sO_2 \cdot 1,39) + (pO_2 \cdot \alpha O_2)$$

wobei cHb in g/dl, sO₂ als Bruchteil von 1, pO₂ in mmHg und αO₂ in ml/dl/mm Hg einzusetzen ist. Für Normalblut würde sich dann zum Beispiel bei cHb = 15 g/dl, sO₂ = 97% und pO₂ = 90 mmHg eine O₂-Konzentration von 20,6 ml/dl ergeben.

Für praktische Zwecke kann empfohlen werden, den Anteil des physikalisch gelösten O₂ konstant mit 0,3 ml/dl anzusetzen, solange der pO₂ zwischen 60 und 100 mmHg und die Hb-Konzentration zwischen 10 und 20 g/dl liegt: Die Abweichungen des physikalisch gelösten O₂ und damit der O₂-Konzentration des Blutes betragen in diesem Falle maximal ± 0,1 ml/dl, d. h. immer unter ± 1% der O₂-Konzentration des Blutes.

Zusammenfassung

Für die Berechnung der O₂-Konzentration des arteriellen Blutes wird die Kenntnis der Hb-Konzentration (cHb, g/dl), der O₂-Sättigung (sO₂, %), der theoretischen Hüfnerschen Zahl von 1,39 ml/g, des O₂-Partialdrucks (pO₂, mmHg) und der O₂-Löslichkeit (αO₂, ml/ml/atm) benötigt. Neue Daten über die O₂-Löslichkeit im Blut des Menschen erlauben die genaue Berechnung der O₂-Konzentration vor allem für den Fall der Hyperoxie.

Literatur

- 1 Christoforides, C.; Hedley-Whyte, J.: Effect of temperature and hemoglobin concentration on solubility of O₂ in blood. *J. appl. Physiol.* 27: 592–596 (1969).
- 2 Fasciolo, J.; Chiodi, H.: Arterial oxygen pressure during pure O₂ breathing. *Am. J. Physiol.* 147: 54–65 (1946).
- 3 Hüfner, G.: Neue Versuche zur Bestimmung der Sauerstoffkapazität des Blutfarbstoffes. *Arch. Anat. Physiol.*: 130–176 (1894).
- 4 Sendroy, J.; Dillon, R. T.; Van Slyke, D. D.: Studies of gas and electrolyte equilibria in blood. XIX. The solubility and physical state of uncombined oxygen in blood. *J. biol. Chem.* 105: 597–632 (1934).
- 5 Zander, R.: Sauerstofftransportvermögen von Blutersatzflüssigkeiten im Vergleich mit anderen Infusionslösungen. *Klin. Wschr.* 56: 567–573 (1978).
- 6 Zander, R.: Oxygen solubility in normal human blood; in Kovach, Dora, Kessler, Silver. *Oxygen transport to tissue. Adv. Physiol. Sci. Vol. 25*, pp. 331–332 (Pergamon Press, Budapest 1981).