

BLUTGASWERTE RICHTIG VERSTEHEN UND INTERPRETIEREN

Die Blutgasanalyse (BGA) – Teil 1

Markus Renner

Im Rahmen der intensivmedizinischen Behandlung kritisch Kranker hat die Blutgasanalyse (BGA) immer mehr an Bedeutung gewonnen und sich zu einem bettseitigen Routineverfahren entwickelt. Mit einer kleinen Menge Blut kann sich der Intensivmediziner innerhalb kürzester Zeit ein Bild von Gasaustausch, Säure-Basen- und Elektrolythaushalt machen.

Einleitung

Begonnen hat die Geschichte der BGA 1952 während der schweren Polio-Epidemie in Dänemark. Aufgrund der Lähmung der Atemmuskulatur waren die Patienten auf eine invasive Beatmung angewiesen. Der damalige Chef des Laboratoriums im Blegdam Hospital in Kopenhagen, Dr. Poul Astrup, erkannte, dass eine effektive Beatmung nur unter Steuerung des Säure-Basen-Haushalts und der Oxygenierung möglich war. So entstand in Zusammenarbeit mit der Firma Radiometer das erste Gerät zur Blutgasanalyse.

Physiologie des Sauerstofftransportes und der Sauerstoffverteilung

Die Versorgung des Organismus mit Sauerstoff hat zur Energiegewinnung aus dem aeroben Metabolismus eine zentrale Bedeutung. Da der menschliche Körper nur sehr beschränkt in der Lage ist, Sauerstoff zu speichern, wird über die äußere Atmung eine kontinuierliche Zufuhr von Sauerstoff und die Ausscheidung des Stoffwechselprodukts Kohlendioxid gewährleistet. Setzt die Versorgung des Körpers mit Sauerstoff über die Lunge aus, beginnen die ersten

Organe nach wenigen Minuten irreversible Schäden davonzutragen. In Ruhebedingungen verbraucht der menschliche Körper ca. 250 ml Sauerstoff pro Minute (3–4 ml/kg/KG), unter Belastung ist ggf. die zehnfache Menge erforderlich.

Über die Einatemluft wird der Sauerstoff in die Alveolen transportiert, der Partialdruck des Sauerstoffs liegt dort beim Gesunden unter Raumluft bei etwa 105 mmHg. Die treibende Kraft für die Diffusion des Sauerstoffs in die Lungenkapillaren ist die Partialdruckdifferenz zwischen Alveole und Blut. Wichtig sind auch das Maß des intra- und extrapulmonalen Shunts, die Diffusionskapazität des Lungengewebes und die Hämoglobin-/Sauerstoffaffinität. Der Sauerstoffpartialdruck im venösen System liegt bei ca. 40 mmHg, im arteriellen System dann bei 83–108 mmHg. Eine Bewertung der Oxygenierung des Patienten kann über den Oxygenierungsindex nach Horovitz erfolgen, dabei ist ein Wert > 300 mmHg physiologisch. Jedoch ist die Versorgung der Gewebe mit Sauerstoff nicht nur an eine ausreichende Sauerstoffaufnahme gebunden, sondern mitverantwortlich ist auch ein gut funktionierendes Sauerstofftransportsystem.

Nach der Diffusion des Sauerstoffs ins Blut, wird der größte Teil chemisch an das eisenhaltige Protein Hämoglobin in den Erythrozyten gebunden. Vier Moleküle Sauerstoff können dabei von einem Molekül Hämoglobin transportiert werden. Als Sauerstoff-Sättigung (sO_2) bezeichnet man den Prozentsatz des oxygenierten Hämoglobins zur Gesamthämoglobinmenge. Das mit Sauerstoff beladene Hämoglobin wird Oxyhämoglobin genannt, das nicht mit Sauerstoff beladene Desoxyhämoglobin. Doch nicht nur die Sättigung des Hämoglobins bestimmt den Sauerstoffgehalt des Blutes, sondern auch die Menge des zur Verfügung stehenden Hämoglobins. Des Weiteren wird Sauerstoff physikalisch im Blut gelöst, dessen Anteil am Gesamtsauerstoffgehalt im arteriellen Blut beträgt allerdings lediglich 1,5%.

Über den arteriellen Blutstrom gelangt der Sauerstoff schließlich in die Körperperipherie zu den abhängigen Geweben. Je größer dabei das Herzzeitvolumen (HZV) ist, desto mehr Sauerstoff wird den Organen zur Verfügung gestellt.

Das Sauerstoffangebot an die Körpergewebe hängt also von folgenden drei Faktoren ab:

- Hämoglobin-Gehalt des Blutes
- Sättigungsgrad des Hämoglobins
- Herzminutenvolumen

Das Sauerstoffangebot (DO_2 in ml/min) kann über folgende Formel berechnet werden:

$$DO_2 = \text{arterieller Sauerstoffgehalt} \times \text{Herzminutenvolumen}$$

$$DO_2 = Hb \times 1,39 \times SaO_2 \times 10 \times \text{HZV (CO) (ml/min)}$$

In den Kapillaren wird der Sauerstoff schließlich vom Hämoglobin abgegeben, wandert entlang des Partialdruckgefälles in die Gewebszellen und steht dort in den Mitochondrien für den weiteren Stoffwechsel zur Verfügung. In den Kapillaren ist für ein effektives Partialdruckgefälle ein paO_2 von 20–30 mmHg ($saO_2 \approx 50\%$) ausreichend.

Dem Sauerstoffangebot steht der Sauerstoffverbrauch (VO_2 in ml/min) des Körpers entgegen. Berechnet wird die Sauerstoffaufnahme (Abb. 1) durch die Differenz aus dem Angebot und dem venösen Rückfluss:

$$VO_2 = \text{Sauerstoffangebot} - \text{venöser Rückfluss}$$

$$VO_2 = Hb \times 1,39 \times (SaO_2 - SvO_2) \times 10 \times \text{HZV (CO) (ml/min)}$$

Das Verhältnis von Sauerstoffaufnahme zu Sauerstoffangebot gibt die Sauerstoffextraktionsrate (O_{2ER}) wieder.

$$O_{2ER} = VO_2 / DO_2$$

Der Normalwert liegt bei 0,2–0,3%, das bedeutet, dass 20–30% des kapillären Sauerstoffangebotes von den Zellen genutzt wird. Sinkt das Sauerstoffangebot, kann die Sauerstoffextraktionsrate bis auf Werte von 50–60% ansteigen und damit die Sauerstoffaufnahme konstant halten. Fällt das DO_2 unter den Kompensationsbereich der O_{2ER} , erreicht die VO_2 ein kritisches Minimum mit Gefahr der Dysoxie.

Das Gleichgewicht zwischen Sauerstoffangebot und -verbrauch kann durch verschiedene pathophysiologische Vorgänge gestört werden. Hierzu gehören Störungen wie Anämie, Hypoxämie oder erniedrigtes Herzzeitvolumen. Deshalb hat die Überwachung von Sauerstoffaufnahme und -verbrauch bei kritisch Kranken u.a. mittels der Blutgasanalyse eine immense Bedeutung.

Entnahmeorte und Durchführung

Je nach Entnahmeort lassen sich arterielle, kapillär-arterielle und venöse BGAs unterscheiden. Hierbei ist zum einen die Gewinnung des Blutes durch Einmalpunktion möglich, zum anderen intermittierend über einen Katheter. Zur genauen Bewertung des Sauerstoff- und Säure-Basen-Haushaltes ist die arterielle Blutgasanalyse am besten geeignet.

Um aussagekräftige Messergebnisse zu erhalten, ist der Zeitpunkt für eine BGA sorgfältig zu wählen. Ungünstig wirken sich Veränderungen der Beatmungsparameter, Umlagerungsmaßnahmen und ein Absaugvorgang mit Prä- und Postoxygenierung innerhalb der letzten 30 Minuten aus. Zudem sollte der Patient schmerz- und stressfrei sein und hämodynamisch stabil.

Als mögliche arterielle Punktionsorte sind die Arteriae radialis, ulnaris und femoralis am besten geeignet. Seltener werden auch die Arteriae brachialis und dorsalis pedis genutzt. Neben der Einmalpunktion

bieten sich die genannten Arterien ebenfalls zur Katheteranlage an. Die Arteria radialis ist dabei das am besten zugängliche Gefäß. Die Arterie liegt oberflächlich, große benachbarte Venen sind nicht vorhanden und es besteht in der Regel ein Kollateralkreislauf über die Arteria ulnaris.

Erfolgt die Entnahme der Blutprobe aus einem Druckmesssystem, wird zunächst die Entnahmestelle desinfiziert und die ersten 2–5 ml Blut (je nach Länge des Schlauchsystems und den Herstellerangaben) verworfen. Eine Menge von 1 ml Blut ist in der Regel für moderne BGA-Geräte ausreichend. Anschließend wird das Schlauchsystem intermittierend gespült, um eine Thrombosierung des Katheters zu vermeiden. Der Luer-Lock-Anschluss wird erneut desinfiziert und mit einem sterilen roten Stopfen verschlossen. Nach Abschluss der Maßnahme ist die korrekte Ableitung des Blutdrucks am Monitor zu kontrollieren.

Die einfache, für den Patienten schmerzlose Durchführung und das Ausschalten der Risiken wiederholter Punktions machen die Vorteile dieser Methode aus. Dagegen stehen die Infektionsgefahr durch den Verweilkatheter und die Gefahr der Gerinnselbildung.

Bei Einmalpunktion einer Arterie sind die anschließende Kompression der Einstichstelle und die Kontrolle auf eine Nachblutung zu beachten. Vorteilhaft ist hier die schnelle Durchführbarkeit in Notfallsituationen und das geringere Probenvolumen.

Die Blutgasprobe wird nun durch leichtes Drehen in der Hand gut durchmischt, verbliebene Luftblasen entfernt und zur Analyse in das BGA-Gerät gegeben. Sollte die sofortige Verwertung nicht möglich sein, muss die Probe fachgerecht gelagert werden (s.u.). Spezielle Blutgasröhrchen verhindern durch elektrolytkompensiertes Trockenheparin eine Koagulation und Beeinträchtigung der Elektrolytmessung.

Die kapillär-arterielle Blutentnahme liefert bei korrekter Durchführung ein annähernd genaues Ergebnis – wie die arterielle BGA. Das Kapillarstromgebiet des Ohrläppchens, der Fingerbeere und bei Kindern der Ferse sind geeignete Punktionsorte. Vorab muss die Region mit hyperämischer Salbe (Finalgon®) behandelt

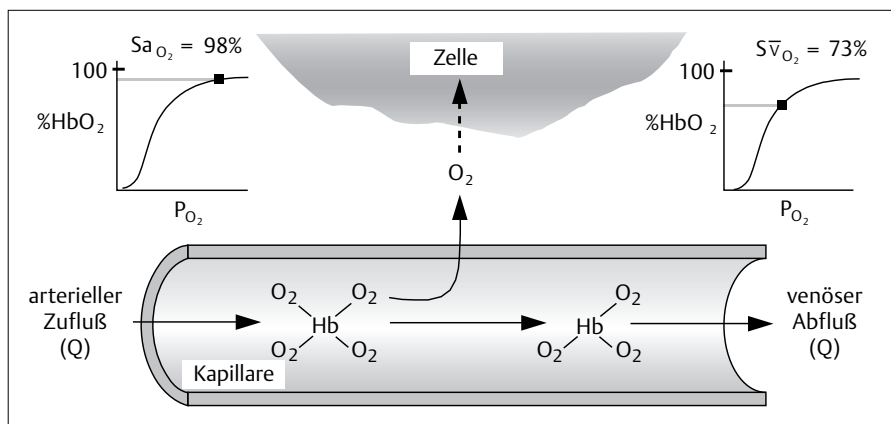


Abb. 1 Schematische Darstellung der Sauerstoffaufnahme aus der Mikrozirkulation (Marino, Paul L. (2002). Das ICU Buch, 3. Aufl., München: Urban & Fischer, Seite 17)

werden. Währenddessen sollte der Patient jeglichen Kontakt mit der Salbe vermeiden, um Reizungen z.B. von Augen oder Schleimhäuten zu umgehen. Eine Lanzette dient dem Untersucher zur Punktion, ein Quetschen der Region zur Gewinnung des Blutes sollte aber ausbleiben. Eine Verfälschung der Werte durch venöse Beimischung und erhöhtes Kalium wären die Folge. Häufig sind die Proben zudem mit Luftblasen durchsetzt, die das Ergebnis verfälschen. Der erste austretende Blutstropfen wird wegen eventueller Beimischung von Gewebwasser entfernt. Ist die Probe entnommen, sollte die hyperämisierende Salbe restlos entfernt werden. In die gefüllte Glaskapillare wird nun ein Metallstift eingelegt und die Glaskapillare mit Stopfen von beiden Seiten luftdicht verschlossen. Der Metallstift verhindert durch Bewegung innerhalb der Glaskapillare eine Gerinnung des Blutes. Vor Eingabe der Probe in den Analysator wird ein Gerinnsel fänger auf die Glaskapillare aufgesetzt.

Zur Beurteilung des gemischt-venösen Sauerstoffstatus kann eine zentral-venöse BGA aus einem ZVK oder eine gemischt-venöse BGA aus einem Swan-Ganz-Katheter herangezogen werden. Im Gegensatz zum gemischt-venösen Blut fehlt der zentral-venösen Probe der venöse Abfluss aus dem Koronarsinus. Die Probenentnahme ähnelt der Abnahme aus einem arteriellen Katheter. Zu starke Aspiration kann zur Hämolyse des Blutes führen.

Transport und Aufbewahrung

Da die entnommene Probe weiter der Stoffwechsellaktivität unterliegt, sollten zwischen Entnahme

und Analyse nicht mehr als zehn Minuten liegen. Ein erniedrigter pO_2 , ein erhöhter pCO_2 und ein erhöhtes Kalium sind ein Zeichen des fortschreitenden Stoffwechsels. Ist die sofortige Analyse nicht möglich (z. B. Gerätekalibration), wird die Probe bei 0–4 °C zur Senkung der Stoffwechselaktivität maximal 30 Minuten aufbewahrt. Geeignet sind Eiswasser oder entsprechende Kühlbehältnisse. Dabei dürfen 0 °C nicht unterschritten werden, Resultat wäre in diesem Fall eine Hämolyse mit Kalium- und Kalziumfreisetzung. Eine gute Durchmischung des ggf. sedimentierten Blutes und Entfernung der Tropfen aus dem Konus sind die Voraussetzung für ei-

ne einwandfreie Analytik im Anschluss an die Lagerung.

Durchführung der Analyse

Die Durchführung einer Analyse am BGA-Gerät soll im Folgenden am ABL 800 Flex der Firma Radiometer GmbH beschrieben werden. Befindet sich der Analysator im Modus „Messbereit“, wird die Blutprobe nach Öffnen der Einlassklappe auf den Spritzeneinlass aufgesetzt. Der Spritzenkonus sollte dabei keine Blutstropfen mehr enthalten. Über den Touchscreen wird das Ansaugen der Probe durch Betätigen des Start-Feldes in Gang gesetzt, die Einlasssonde bewegt sich dabei automatisch in

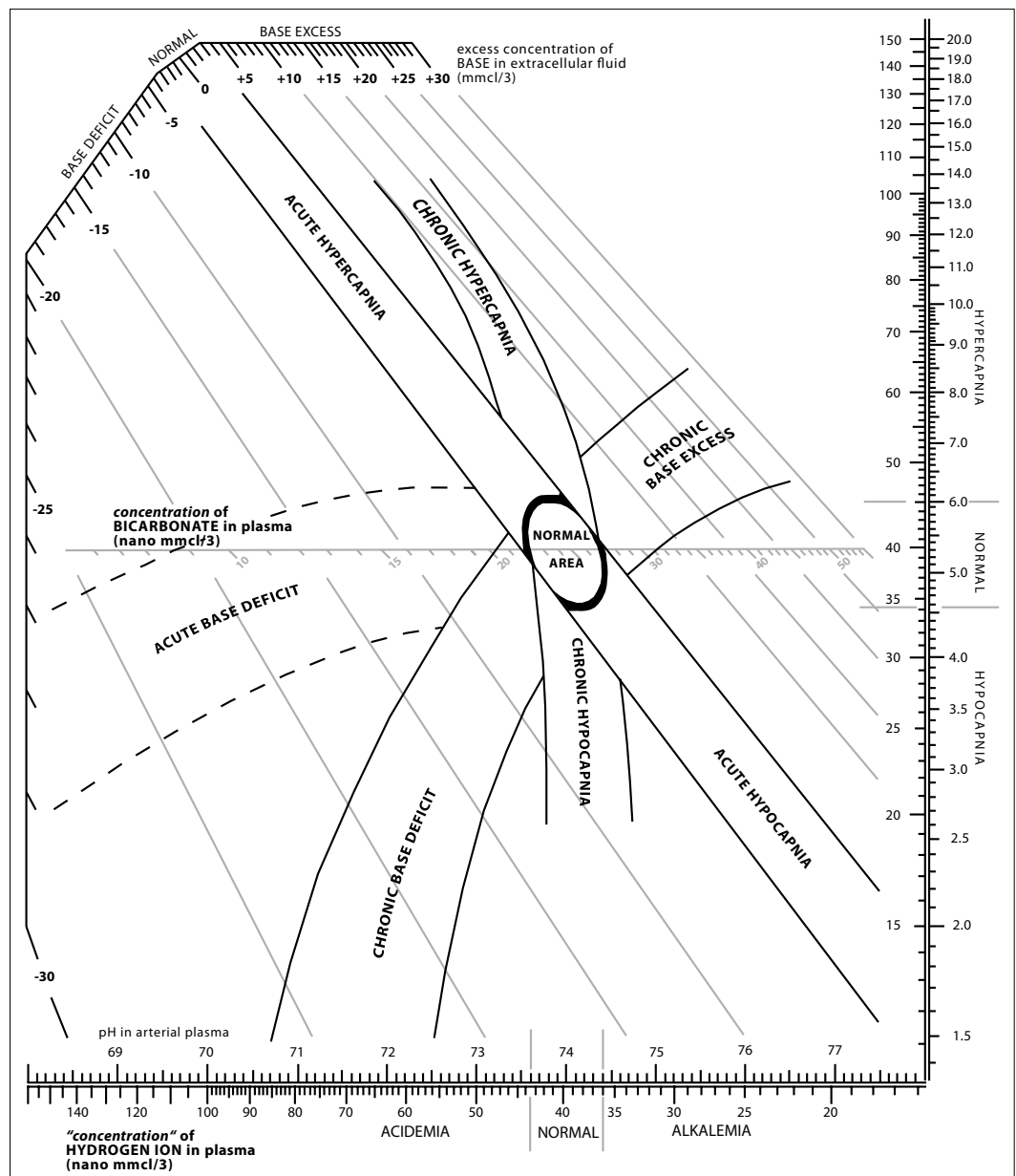


Abb. 2 Sigaard-Andersen-Diagramm (Radiometer Medical A/S (2000). Das Blutgas-Handbuch.)

die Spritze. Das Blut darf keinesfalls in den Analysator gespritzt werden. Unterdessen hat der Anwender die Möglichkeit, diverse Patientendaten oder die Probenart auf dem Touchscreen einzugeben. Erscheint im oberen Drittel des Displays die Anzeige „Einlass schließen“, kann die Probe entfernt werden. Nach Abschluss der Analyse erscheint das Ergebnis automatisch, ein Ausdruck samt Patientendaten folgt. Mit einem Fragezeichen versehene Parameter gelten als unzuverlässig (unzureichende Probenmenge, schlechte Probenqualität), rot unterlegte Parameter weisen auf eine ernsthafte Störung hin und sollten nicht verwendet werden. Mittels der Taste „Acid-Base Chart“ erhält der Anwender eine Auswertung der Probe nach dem Siggaard-Andersen-Diagramm (Abb. 2), eine Unterscheidung auf akute oder chronische Störungen.

Vor Eingabe einer kapillären Probe muss diese mit Hilfe eines Magneten gut durchmischt, das Mischstäbchen anschließend zu dem Ende der Glaskapillare bewegt werden, an dem keine Probe abgesaugt wird. Die Kapillarverschlusskappen werden entfernt und ein Gerinnselfänger aufgesetzt. Die Anwendung des Flexmodus

bietet bei der Analyse kapillären Blutes die größte Anzahl an Parametern und eine Menge von mehr als 35 µl Blut kann verwertet werden.

Sauerstoff-Dissoziationskurve (ODC)

Die Sauerstoff-Dissoziationskurve, auch Sauerstoff-Bindungskurve genannt, beschreibt die Sauerstoffsättigung des Hämoglobins in Bezug zum Sauerstoffpartialdruck. Das Hämoglobin-Molekül besitzt die Fähigkeit, vier Sauerstoff-Moleküle zu binden. Ist das erste Sauerstoff-Molekül gebunden, werden die weiteren Moleküle wesentlich leichter aufgenommen. Lediglich das letzte Sauerstoff-Molekül kann wieder nur unter schwierigeren Bedingungen eine Bindung eingehen. Dadurch weist die Kurve einen typischen s-förmigen Verlauf auf. Im unteren Abschnitt steigt sie steil an, ein geringer Anstieg des pO_2 führt zu einer relativ starken Steigerung der Sauerstoffsättigung und umgekehrt. Im oberen Abschnitt wird der Verlauf flacher, hier steigern Erhöhungen des pO_2 die Sauerstoffsättigung nur geringfügig. Ist das Hämoglobin zu 100% gesättigt, führt auch

eine extreme Erhöhung des pO_2 zu keiner weiteren Steigerung der Sättigung. Lediglich der Anteil des physikalisch gelösten Sauerstoffs kann zunehmen.

Wie in der Abbildung 3 bereits dargestellt, kann neben der Normallage der Kurve auch eine Links- bzw. Rechtsverschiebung auftreten. Dabei geht eine Linksverschiebung mit einer höheren Affinität des Sauerstoffs zum Hämoglobin einher. Die Sauerstoffaufnahme in der Lunge wird damit verbessert, allerdings verschlechtert sich die Sauerstoffabgabe an die abhängigen Gewebe. Eine Rechtsverschiebung hat den gegenteiligen Effekt.

Ursachen für eine Linksverschiebung können Alkalose, Hypokapnie, Hypokaliämie, Hypothermie, 2,3-DPG-Mangel (2,3-Diphosphoglyzerat: Regulatormolekül für die O_2 -Affinität zum Hämoglobin) und erhöhte Carboxy- und Methämoglobinwerte.

Dagegen können Azidose, Hyperkapnie, Hyperkaliämie, Hyperthermie und 2,3-DPG-Überschuss eine Rechtsverschiebung zur Folge haben.

Eine bessere Sauerstoffabgabe an das Gewebe beschreibt auch der Bohr-Effekt. Eine Rechtsverschiebung der ODC wird im Erythrozyten durch die Kohlensäurebildung aus Wasser und Kohlendioxid mit nachfolgender pH-Senkung vermittelt. Aus diesem Vorgang entsteht im Erythrozyten Desoxyhämoglobin, das wiederum das Kohlendioxid aus dem Gewebe leichter binden kann. Dieser Prozess ist als Haldane-Effekt bekannt.

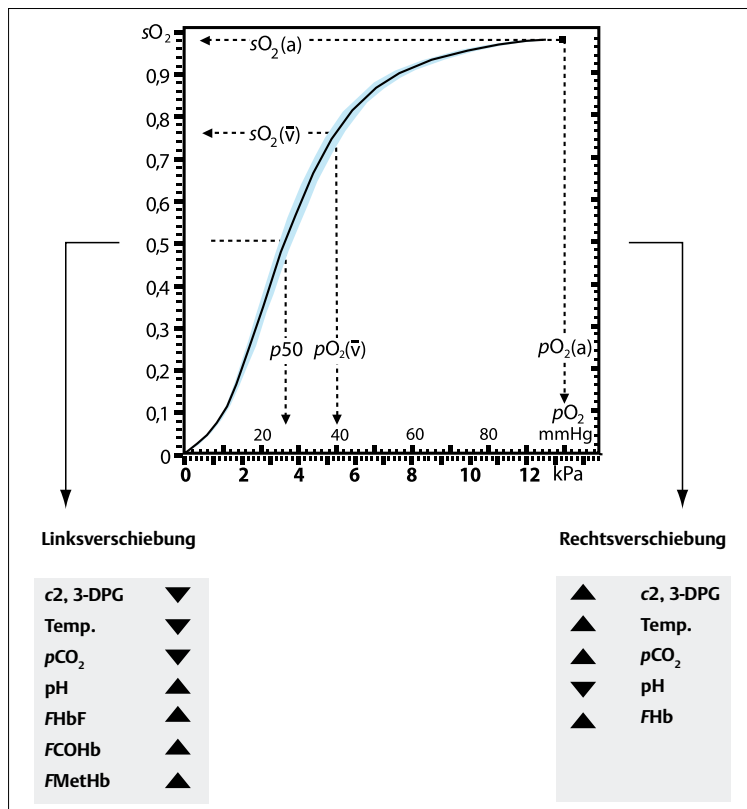


Abb. 3 Sauerstoff-Dissoziationskurve (Radiometer Medical A/S (2000). Das Blutgas-Handbuch.)

Der zweite Teil dieses Beitrags folgt in der nächsten intensiv-Ausgabe, September 2009.

Bibliografie

DOI 10.1055/s-0029-1235143
 intensiv 2009; 17: 204-207
 © Georg Thieme Verlag KG
 Stuttgart · New York · ISSN 0942-6035