

Atemphysiologie - Säure-Basen-Haushalt

Bestimmung von Blutgas- und Säure-Basen-Daten am Menschen Messungen zur Atemmechanik am Menschen

1 Voraussetzungen

1.1 Literatur

Lehrbücher der Physiologie entsprechend 1.2

1.2 Schlüsselwörter

Gasgesetze, Puffergesetze, Pufferbase, Blutgase,
Gasgehalt, Gaspartialdruck, Blutgasanalyse,
Innere und äußere Atmung,
Oxygenierung-Desoxygenierung des Hämoglobins,
CO₂-Bindung im Blut, Carbaminohämoglobin,
O₂-Bindungskurve des Hämoglobins, Rechts-/Links-Verschiebung der Kurve,
Bohr-Effekt, Haldane-Effekt,
Säuren und Basen, Puffersystemen, Standardbikarbonat, Basenüberschuss,
Carboanhydratase, Hamburger Shift,
Kohlensäure - Bikarbonat Gleichgewicht,
Henderson-Hasselbalch-Gleichung,
Azidosen und Alkalosen,
Respiratorische Störungen des Säure-Basen-Haushalts,
Nicht-respiratorische Störungen des Säure-Basen-Haushalts,
Primäre und sekundäre Störungen, Kompensation, Diagnostik,
Residualvolumen, Atemzugvolumen,
inspiratorisches Reservevolumen, expiratorisches Reservevolumen,
funktionelle Residualkapazität, Vitalkapazität,
Tachypnoe, Bradypnoe, Hypo- und Hyperventilation,
ATPS - Ambient Temperature, Atmospheric Pressure, Water Saturated,
BTPS - Body Temperature, Atmospheric Pressure, Water Saturated,
obstruktive Ventilationsstörungen,
restriktive Ventilationsstörungen,
Diffusion, Perfusion, Ventilation,
Atemzentrum, Atemmechanik, Atemantrieb,
CO₂-Antwort, Chemorezeptoren, Pressorezeptoren,
Hering Breuer Reflex,
Pathologische Atmungsformen (Kussmaul-Atmung, Cheyne-Stokes-Atmung).

2 Experimente

- Bestimmung von Blutgas- und Säure-Basen-Daten am Menschen

- Atemmechanik

2.1 Bestimmung von Blutgas- und Säure-Basen-Parametern am Menschen

2.1.1 Einführung

Der pH-Wert ist ein Maß für das Milieu im Blut und entspricht dem negativen dekadischen Logarithmus der H^+ -Ionenkonzentration. Er beträgt im Mittel ca. 7,4, wobei es Unterschiede gibt die auf Geschlecht, Alter und weitere Faktoren zurückzuführen sind. Die Konstanz der H^+ -Ionenkonzentration und damit des pH-Wertes im Blutplasma und im interstitiellen Raum ist eine wichtige Voraussetzung für die Aufrechterhaltung des Stoffwechselablaufs. Größere Abweichungen können zu einer Störung des Stoffwechsels, der Durchlässigkeit von Membranen und Elektrolytverteilung führen. Blut-pH-Werte unter 7,0 bzw. über 7,8 sind nicht mit dem Leben vereinbar. Obwohl beim aeroben Stoffwechsel CO_2 und bei Muskelarbeit Lactat (Milchsäure) entstehen und somit H^+ -Ionen anfallen bleibt der pH-Wert nahezu konstant und schwankt zwischen 7,37 und 7,43. Die Mechanismen, die auf den pH-Wert einwirken und somit zu seiner Konstanthaltung beitragen sollen in diesem Praktikum erläutert werden.

2.1.2 Puffer-Systeme

Puffer sind Substanzen, die eine durch Zusatz von H^+ - oder OH^- -Ionen hervorgerufene pH-Änderung abschwächen können. Pufferbasen sind Substanzen, die H^+ -Ionen binden.¹⁾ Für die Konstanthaltung des pH-Wertes sind zwei Mechanismen verantwortlich:

A) die Ausscheidung saurer Valenzen

- a) über die Lunge als CO_2 (schnell)
- b) über die Niere als H^+ -Ionen (langsam),

B) die Pufferfähigkeit des Blutes (Bindung von H^+ -Ionen an basische Gruppen). Im Vollblut befinden sich hauptsächlich folgende vier Pufferbasen:

• Bicarbonat [HCO_3^-]	24 mmol/l	$HCO_3^- + H^+ \leftrightarrow H_2CO_3$
• Hämoglobin-Anion [Hb^-]	20 mmol/l	$Hb^- + H^+ \leftrightarrow HbH$
• Plasma-Proteinate [$Prot_{PI}^-$]	3 mmol/l	$Prot^- + H^+ \leftrightarrow ProtH$
• Phosphate [HPO_4^{2-}]	1 mmol/l	$HPO_4^{2-} + H^+ \leftrightarrow H_2PO_4^-$

Diese verschiedenen Puffersysteme wirken zusammen und stehen über die aktuelle H^+ -Ionen-Konzentration miteinander im Gleichgewicht. Die Summe der Konzentrationen der drei wichtigsten Puffer (Gleichung 1) wird *Pufferbase* (PB) genannt. Für klinische Zwecke wird der Phosphat-Puffer wegen seines geringen Beitrages zur Pufferung vernachlässigt.

2.1.3 Pufferbasen (PB)

$$PB = [HCO_3^-] + [Hb^-] + [Prot_{PI}^-]$$

(Gleichung 1)

¹⁾ Nach Brönsted: Base + $H^+ \leftrightarrow$ Säure

Die Pufferbase PB wird gemessen in mmol/l. Bei 100% O₂-Sättigung, pCO₂ = 40 mmHg, pH = 7,4 und einer Temperatur von 37°C wird sie *Normalpufferbase* (NPB) genannt. Sie hängt von der *Hämoglobinkonzentration* des Blutes (Hb) ab. Bei normalem Hb (15 g/dl) beträgt die NPB 48 mmol/l.

Um den Anteil des Bicarbonats an der Pufferung zu messen, wird das *Standardbicarbonat* bestimmt. Als Standardbicarbonat bezeichnet man die Plasma-Bicarbonat-Konzentration in einer Blutprobe, die nach vollständiger Oxygenierung bei 37°C mit einem pCO₂ von 40 mmHg äquilibriert wurde. Es wird ebenfalls in mmol/l angegeben. Die Bezeichnung "Standard" bezieht sich auf die genannten standardisierten Bedingungen bei der Bestimmung (37°C, pCO₂ = 40 mmHg, 100% O₂-Sättigung). Der ermittelte numerische Wert ist natürlich durchaus variabel. Der Normalwert ist 24 mmol/l, somit macht der CO₂/HCO₃⁻-Puffer die Hälfte des NPB aus.

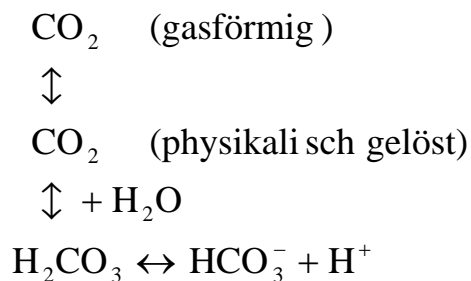


Abb. 1 Zusammenhang zwischen der CO₂-Konzentration und dem Bicarbonat-Puffer.

Aus dem in Abb. 1 gezeigten Schema ergibt sich der Zusammenhang zwischen CO₂ und HCO₃⁻. Dieses Puffersystem erlangt große Bedeutung, weil es abgesehen von der Abpufferung der H⁺-Ionen beide Pufferkomponenten unabhängig voneinander verändern kann.

- [CO₂] über die Lunge
- [H⁺] über Leber und Niere

Ein solches offenes Puffersystem weist eine weitaus höhere Pufferkapazität auf. Der wichtigste der übrigen Puffer im Blut ist das Hämoglobin in den Erythrozyten.

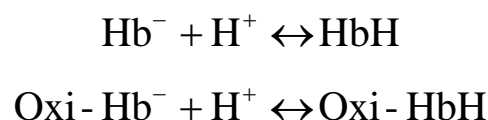


Abb. 2 Pufferung der H⁺-Ionen durch Hb⁻ und Oxi-Hb⁻.

Das relativ saure, oxigenierte Hb⁻ (Oxi-Hb⁻) bindet weniger H⁺-Ionen als das nicht oxigenierte Hb⁻. Wird in der Lunge Hb⁻ durch die Anreicherung mit O₂ zu Oxi-Hb⁻ so sinkt auch die Fähigkeit zur H⁺-Ionen Aufnahme und H⁺-Ionen werden frei, was gemäß Abb. 1 zu einer vermehrten CO₂-Produktion und -Abgabe führt.

2.1.4 Azidosen und Alkalosen

Bedingt durch verschiedenste Faktoren oder Umstände kann sich der pH-Wert des Blutes verändern, bei pH-Abfall spricht man von Azidosen, bei pH-Anstieg von Alkalosen. Ferner nimmt man eine Unterteilung gemäß der Störung (respiratorische gegenüber nicht-respiratorischen Azidosen/Alkalosen) vor. Da unser Körper sensibel auf eine Veränderung des pH-Wertes reagiert, müssen Regulationsmechanismen in Kraft gesetzt werden, die schnell greifen.

Bei den primär respiratorischen Störungen (Änderung der CO_2 -Konzentration) ändern sich die Konzentrationen von HCO_3^- - und Nichtbicarbonat-Puffern gegensinnig. Für jedes gewonnene bzw. verlorene HCO_3^- -Ion verliert bzw. gewinnt man ein pufferndes Eiweiß-Anion. Somit bleibt nach primär respiratorischen Störungen, mit Änderung der CO_2 -Konzentration, die Konzentration an PB immer gleich, auch wenn sich die einzelnen Komponenten erhöhen bzw. vermindern. Dieser Zusammenhang wird in Abb. 3 nochmals verdeutlicht.

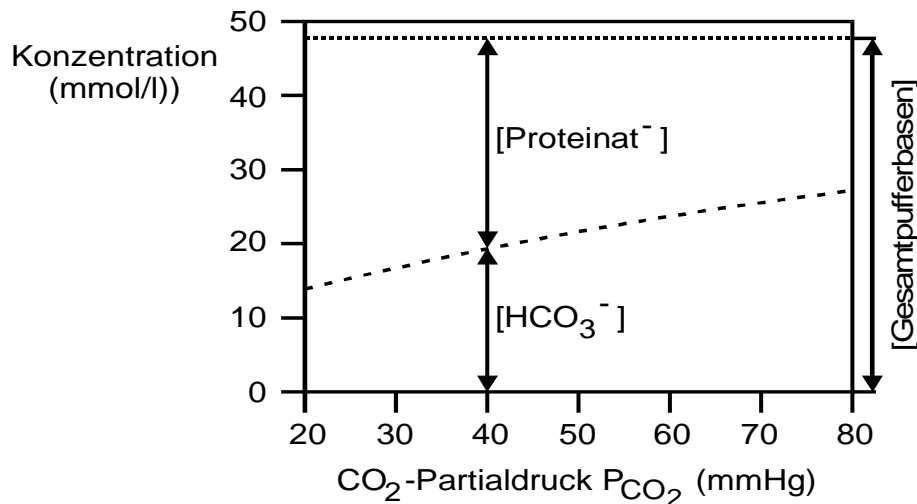


Abb. 3 Die Konzentration der Eiweißanionen und der Bicarbonatanionen ist abhängig vom $p\text{CO}_2$, aber die Summe dieser Anionen (Pufferanionen) ist unabhängig vom $p\text{CO}_2$ -Wert.

Ist dagegen der pH-Wert des Blutes geändert, weil sog. fixe Säuren (z. B. Milchsäure) vermehrt anfallen oder H^+ -Ionen in der Niere nicht ausreichend ausgeschieden wurden, so ist bei solchen sog. nicht-respiratorischen Störungen des Säure-Basen-Haushalts zwangsläufig auch die Konzentration der Pufferbase verändert.

Bei einer primären Steigerung der H^+ -Konzentration im Blut (d.h. bei *nicht-respiratorischer* Acidose) sinken die Konzentrationen sowohl von HCO_3^- als auch von Nicht-Bicarbonat-Puffer-Anionen, ($\text{Hb}^- + \text{Prot}_{\text{PI}}^-$), weil die anfallenden H^+ -Ionen von allen Puffersystemen, die ja miteinander im Gleichgewicht stehen, aufgefangen werden. Unter diesen Bedingungen einer nicht-respiratorischen Störung bleibt die PB also *nicht* konstant, sondern ändert sich. Das gleiche gilt für das Standardbicarbonat.

Veränderungen der aktuellen Pufferbase PB gegenüber der Normalpufferbase NPB bezeichnet man als *Basenüberschuss* (BÜ) (engl. *base excess* = BE).

Es gilt also folgende Gleichung:

$$\text{BÜ} = \text{BE} = \text{PB} - \text{NPB} \quad (\text{Gleichung 2})$$

Der BÜ kann positiv (nicht-respiratorische Alkalose = metabolische Alkalose) oder negativ (nicht-respiratorische Acidose = metabolische Acidose) sein. Er wird in mmol/l angegeben. Der BÜ kann quantitativ ermittelt werden, indem man Blut bei einem pCO_2 von 40 mmHg und 37°C vom aktuellen pH-Wert auf einen pH-Wert von 7,4 titriert. Die dabei verbrauchte Menge von H^+ bzw. OH^- (bezogen auf das Probenvolumen) ist ein direktes Maß für die Höhe des positiven bzw. negativen BÜ. In der Praxis wird der BÜ jedoch anders bestimmt (s.u.).

Zusammenfassung:

Der Säure-Base-Status des Blutes wird durch pH, CO_2 -Konzentration und Basenüberschuss festgelegt. Um den Anteil des Hämoglobins an der Pufferung zu bestimmen, muss die Hämoglobin-Konzentration gemessen werden. Da die Puffer-eigenschaft des Hämoglobins vom O_2 -Sättigungsgrad abhängt, ist außerdem die O_2 -Konzentration im Blut zu berücksichtigen. Apparativ können pCO_2 , pH-Wert, pO_2 und Hämoglobin direkt gemessen werden. Die anderen Parameter wie Pufferbase, Standardbikarbonat und Basenüberschuss können, wie unten beschrieben wird, berechnet werden.

2.1.5 Messprinzipien

Die Messung aller klinisch relevanten Blutgasparameter erfolgt mit Blutgasanalysegeräten, die an einer eingespritzten Blutprobe sequentiell die folgenden Messungen vornehmen.

pH-Messung

Die pH-Messung erfolgt mit einer Glaselektrode und einem hochempfindlichen Voltmeter. Diese Elektrode verhält sich infolge ihrer speziellen Glaseigenschaft wie eine für H^+ -Ionen selektive Membran. Werden zwei Lösungen unterschiedlicher H^+ -Ionenkonzentration durch eine solche Glasmembran getrennt, kann für die an der Glasmembran entstehende elektrische Potentialdifferenz V die Nernst'sche Gleichung angegeben werden:

$$V = \frac{R \cdot T}{F} \cdot \ln \frac{[\text{H}^+]_{\text{innen}}}{[\text{H}^+]_{\text{außen}}} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Nach Umformung und Einsetzen der Konstanten ergibt sich daraus:

$$V = 61 \cdot (\log [\text{H}^+]_{\text{innen}} - \log [\text{H}^+]_{\text{außen}}) \text{ mV} \quad (\text{Gleichung 4})$$

und damit

$$V = 61 (\text{pH}_{\text{außen}} - \text{pH}_{\text{innen}}) \text{ mV} \quad (\text{Gleichung 5})$$

Die Spannung V ist also abhängig von der Differenz zwischen den pH-Werten der Pufferlösung, die in der Elektrode eingeschmolzen ist, und der Außenlösung, deren pH gemessen werden soll. Die gemessene Spannung V wird direkt in den pH-Wert umgerechnet. Da die Glaselektroden (wie auch die im Folgenden erwähnten Elektroden) einen zeitlichen Drift ihrer Messeigenschaften zeigen, werden sie automatisch in regelmäßigen Intervallen mit Hilfe einer Eichlösung geeicht.

CO₂-Messung

Wie O₂ kommt auch CO₂ im Blut physikalisch gelöst und in chemischer Bindung vor. CO₂ kommt in chemisch gebundener Form zum größten Teil als Bikarbonat, sowohl im Plasma als auch in den Erythrozyten vor. Zu einem geringen Teil kommt CO₂ aber auch als H₂CO₃ und als Carbamino-CO₂ (R-NH-COO⁻) an freie Aminogruppen von Eiweißkörpern gebunden in den Erythrozyten vor, d.h.:

$$[\text{CO}_2]_{\text{total}} = [\text{HCO}_3^-] + [\text{R-NH-COO}^-] + [\text{CO}_2]_{\text{phy}} + [\text{H}_2\text{CO}_3] \quad (\text{Gleichung 6})$$

Es wird meist in mmol/l angegeben. Die H₂CO₃-Konzentration kann vernachlässigt werden. Die Konzentration des physikalisch gelösten CO₂, $[\text{CO}_2]_{\text{phy}}$, ergibt sich aus der Multiplikation von pCO₂ (40 mmHg) mit dem Bunsen'schen Löslichkeitskoeffizienten α für CO₂:

$$[\text{CO}_2]_{\text{phy}} = \alpha \text{ CO}_2 \cdot \text{pCO}_2 \quad (\text{Gleichung 7})$$

Die Werte der Löslichkeitskoeffizienten für CO₂ und O₂ angegeben in - ml Gas • ml Lösungsmittel⁻¹ • atm⁻¹ sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Löslichkeitskoeffizient	α_{O_2}	α_{CO_2}
Wasser	0,024	0,57
Blut	0,028	0,49

Tabelle 1: Bunsen-Löslichkeitskoeffizienten für O₂ und CO₂ bei 37°C.

Bei einem pCO₂ von 40 mmHg und einem p_{atm} = 760 mmHg ergibt sich für das physikalisch gelöste CO₂ im Blut 0,026 ml CO₂/ml Blut.

Zur Berechnung der CO₂-Konzentration im Blut in mmol/l benutzt man:

$$\alpha = 0.03 \frac{\text{mmol}}{\text{l} \cdot \text{mmHg}}$$

Mit diesem Wert ergibt sich für das physikalisch gelöste CO₂ bei 40 mmHg dann 1,2 mmol CO₂/l Blut.

Der CO₂-Gehalt, $[\text{CO}_2]_{\text{total}}$, liegt selbstverständlich wesentlich höher und beträgt im ganzen für das arterielle Blut 25,2 mmol/l oder 0,48 /l Blut.

Die pCO₂-Messung ist im Prinzip eine pH-Messung. Man macht sich dabei die Tatsache zunutze, daß in einer Lösung mit konstanter Bicarbonatkonzentration der pH-Wert dem log pCO₂ umgekehrt proportional ist (Gleichung 9). Dies ergibt sich leicht aus einer entsprechenden Transformation der Henderson-Hasselbalch-Gleichung. Die pCO₂-Elektrode besteht aus einer pH-empfindlichen Einstabmesskette, die mit einer CO₂-durchlässigen, aber für Ionen nicht

durchlässigen, Membran überzogen ist. Zwischen Membran und Glaselektrode befindet sich eine verdünnte Bicarbonatlösung. Nach Eintauchen in eine Blutprobe kommt es zur Equilibrierung von CO₂ zwischen Blutprobe und Bicarbonatlösung. In dieser stellt sich ein pH ein, der bei entsprechender Eichung ein direktes Maß für den pCO₂ in der Blutprobe ist.

O₂-Messung

Hier unterscheidet man zwischen *O₂-Partialdruck* (pO₂(mmHg, kPa)), *O₂-Sättigung des Hämoglobins* und *O₂-Gehalt der Blutprobe* (ml O₂/dl Blut).

Zur Überprüfung der Oxygenierungsfunktion der Lunge wird in der Klinik im allgemeinen die technisch leicht durchzuführende Messung des pO₂ bevorzugt, die O₂-Sättigung bzw. der O₂-Gehalt des Blutes werden nur im Rahmen von Spezialuntersuchungen gemessen. Liegt der pO₂ über 90 mmHg, kann in der Regel von normaler arterieller Hämoglobin-Sättigung und normalem O₂-Gehalt ausgegangen werden, wenn der Hb-Gehalt im Normbereich liegt. Die Messung des pO₂ erfolgt polarographisch mit einer kunststoffüberzogenen Platinelektrode. O₂ diffundiert aus der zu analysierenden Lösung durch eine gasdurchlässige Membran und wird an der Platin-Elektrode bei einer definierten "Polarisationsspannung" reduziert:



Der dabei auftretende Strom dient als Maß des O₂-Partialdruckes der Messlösung und wird vom Analysegerät direkt in den pO₂-Wert umgerechnet.

Hämatokrit (Hkt)-Messung

Blut wird in ein Kapillarröhrchen gesaugt, das auf einer Seite verschlossen wird. Durch Zentrifugation werden die Erythrozyten im äußeren Teil des Röhrchens zusammengepresst. Sie unterscheiden sich deutlich als rote Säule vom gelben Plasma darüber. Die Leukozyten sammeln sich in einer schmalen weißen Scheibe (buffy coat) zwischen den Erythrozyten und dem Plasma. Die Höhe der Erythrozytensäule in Bezug zur Gesamthöhe entspricht dem Volumenanteil der Erythrozyten im Blut.

Hämoglobin (Hb)-Bestimmung

Ein genau abgemessenes Volumen Blut wird in ein vorgegebenes Volumen einer Reaktionslösung pipettiert. Dadurch wird Hb durch Reaktion mit Cyanid in einen stabilen Farbkomplex umgewandelt, dessen Konzentration photometrisch bestimmt wird. Die Umrechnung auf Hb-Konzentration erfolgt direkt im Photometer.

Merke: 1g Hämoglobin bindet in vivo 1,34 ml Sauerstoff (Hüfner-Zahl).

2.1.6 Graphische oder rechnerische Bestimmung der Säure-Basen Parameter

Wie oben erwähnt, können pO_2 (bzw. O_2 -Sättigungsgrad), Hämoglobingehalt, pCO_2 und pH direkt gemessen werden. Die weiteren Parameter wie Pufferbase, Standardbikarbonat und der Basenüberschuss müssen graphisch oder rechnerisch bestimmt werden.

Zur Charakterisierung des Bicarbonatpuffersystems dient die Henderson-Hasselbalch-Gleichung

$$pH = 6,1 + \log \frac{[HCO_3^-]}{[0,03 \cdot pCO_2]} \quad (\text{Gleichung 9})$$

Die beiden anderen Puffersysteme sind zu komplex, als daß sie mit Hilfe physikochemischer Grundprinzipien mathematisch beschrieben werden könnten. Ihre Puffereigenschaften wurden empirisch bestimmt. Die resultierenden Zusammenhänge wurden in Gleichungen niedergelegt. Moderne Blutgasanalysengeräte ermitteln unter Verwendung der gemessenen Parameter automatisch die weiteren Säure-Basen-Parameter wie den Basenüberschuss, Standardbikarbonat etc. Im Praktikum erfolgt die Bestimmung des BÜ durch das Blutgasanalysegerät. Instruktiver ist jedoch die Bestimmung des BÜ mit Hilfe eines Nomogramms (s. Abb. 2). Diese Auswertung ist anschaulich und man bekommt ein Gefühl für die gegenseitige Abhängigkeit der Parameter und deren Interpretation.

2.1.7 Versuchsdurchführung

2.1.7.1 Messung

Im Praktikum wird für die Messung ein Blutgasanalysator eingesetzt. Dieses Gerät enthält drei Mikroelektroden zur Bestimmung des pH-Wertes, pO_2 und pCO_2 . Die Eichung der Elektroden erfolgt automatisch in regelmäßigen Intervallen (je nach Gerät alle 6 bis 12 Stunden). Die Elektroden sind auf 37°C thermostatisiert. Für die korrekte Berechnung der Werte müssen die aktuelle Temperatur, die das Blut im Körper hat (z.B. Fieber), und die mit dem Photometer bestimmte Hb-Konzentration eingegeben werden.

2.1.7.2 Blutentnahme

Bei einem freiwilligen Probanden in jeder Kleingruppe werden

- a) 2 ml Blut aus einer gestauten Armvene entnommen (unbedingt darauf achten, daß die Entnahmespritze heparinisiert ist – keine anderen Antikoagulantien verwenden!).
- b) Da die Entnahme einer arteriellen Probe bekanntlich schwieriger ist, wird arterielles Blut mit einer Kapillare aus dem desinfizierten Ohrläppchen des Probanden nach Einstich einer Blutlanzette (3 mm tief) entnommen.

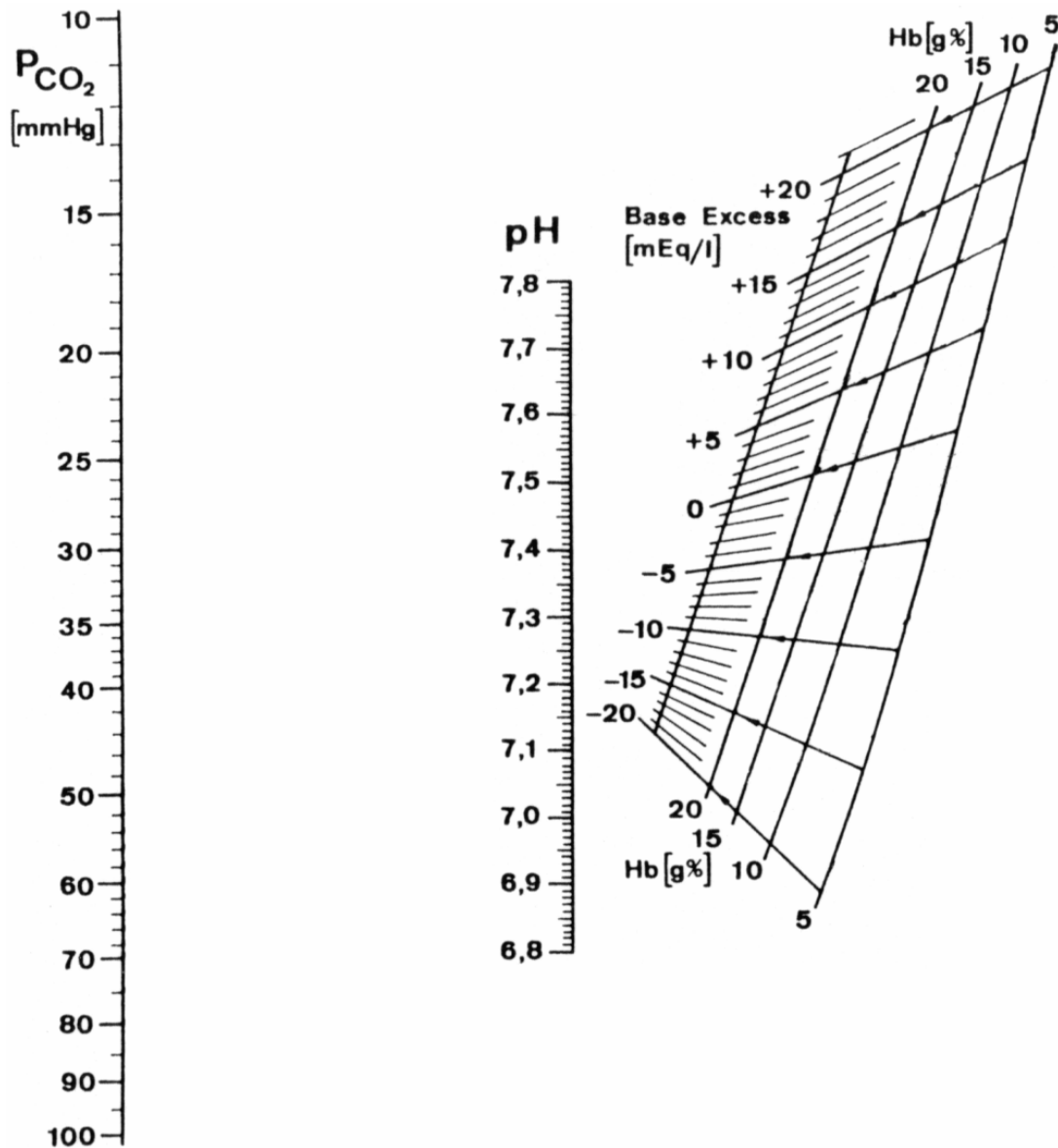


Abb. 2 Nomogramm zur Bestimmung des BÜ aus pCO_2 und pH bei variablem Hämoglobingehalt. Auswertungsvorschrift: man ziehe eine Gerade durch die gemessenen Punkte für den pCO_2 -Wert und den pH. Der Schnittpunkt der Geraden mit der BÜ-Skala wird für den korrekten Hb abgelesen. Beispiel: bei einem pCO_2 von 20 mm Hg und einem pH von 7,6 ergibt sich ein BÜ von 0,5 bei Hb = 15 g% und ein BÜ von - 1,5 bei Hb = 5 g%.

2.1.7.3 Bestimmung der Blutgasparameter

1. Von einem Teil der venösen Probe werden sofort die Blutgase bestimmt.
2. Ein Teil des venösen Blutes dient der photometrischen Hb-Bestimmung.
3. Ein Teil des venösen Blutes wird mit der Umgebungsluft äquilibriert.
4. Ein letzter Teil des venösen Blutes dient der HKT-Bestimmung in der Zentrifuge.
5. Von der (pseudo-) arteriellen Probe aus dem Ohrläppchen werden sofort nach Abnahme im Blutgasanalysegerät die Blutgase bestimmt.
6. Von dem äquilibrierten Blut werden im Blutgasanalysegerät die Blutgase bestimmt.

Die Bestimmung des BÜ erfolgt über ein Nomogramm (Abb. 2). Führen Sie diese Auswertung möglichst schon im Praktikum unter Aufsicht des Tutors durch. Bringen Sie dazu Lineal und Buntstifte mit.

2.2 Messungen zur Atemmechanik am Menschen

2.2.1 Grundlagen

Die Lunge des Menschen ist im kleinen Kreislauf zwischen dem rechten und linken Herz eingeschaltet und besteht aus drei Funktionssystemen:

1. Bronchialsystem (konvektive Zu- und Abführung der Atemgase: *Ventilation*)
2. Alveolarsystem (diffusiver Austausch der Blut- und Atemgase entsprechend dem jeweiligen Partialdruckgefälle = *Diffusion*)
3. Lungengefäß- und Kapillarsystem (konvektiver An- und Abtransport der Atem- bzw. Blutgase mit Hilfe des Blutes = *Perfusion*)

In einer gesunden Lunge sind diese drei Funktionsgrößen (Ventilation, Diffusion, Perfusion) in etwa so aufeinander abgestimmt, daß bei einer gegebenen Ventilation die Perfusion ausreicht, um einen annähernd vollständigen Gasaustausch durch Diffusion zu ermöglichen: Nahezu 100 %ige Oxygenierung des Hämoglobins der Erythrozyten und Abgabe von endogen entstandenem CO_2 . Hierdurch ist gleichzeitig auch eine *pH-Regulation* des Blutes mit Hilfe der Lunge möglich (s.Abb. 1). Unvollständige O_2 -Sättigung und CO_2 -Abgabe können auch physiologischerweise als Konsequenzen von "funktionellen Inhomogenitäten" im Verhältnis Ventilation/Perfusion oder Diffusion/Perfusion auftreten.

Eine vollständige Beurteilung der Lungenfunktion beruht also auf der Untersuchung der drei Funktionsgrößen *Ventilation*, *Diffusion* und *Perfusion*. In den durchzuführenden Praktikumsaufgaben wird die Ventilation mit Hilfe eines Spirometers oder Spirographs geprüft (Spirogramm).

Man unterteilt die Ventilationsgrößen in zwei Gruppen:

1. **Gruppe: Statische Größen** = bewegte Atemvolumina nach bestimmten Zustandsänderungen der Lunge.

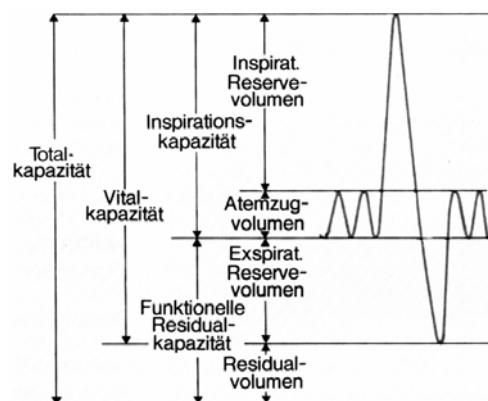


Abb. 3 Statische Atemvolumina und -kapazitäten.

Gemäß Abb. 3 unterscheidet man:

- Atemzugvolumen (VT)
- inspiratorisches (IRV) und expiratorisches Reservevolumen (ERV)
- Residualvolumen (RV)

Die Summen mehrerer Volumina heißen *Kapazitäten*

$$\text{Vitalkapazität: } VK = IRV + V_T + ERV \quad (\text{Gleichung 10})$$

$$\text{Totalkapazität} = IRV + V_T + ERV + RV = VK + RV \quad (\text{Gleichung 11})$$

$$\text{Funktionelle Residualkapazität: } FRK = ERV + RV \quad (\text{Gleichung 12})$$

2. Gruppe: Dynamische Größen = maximal bewegbare Atemgasvolumina in festgelegten Zeiträumen

- relative Sekundenkapazität (SK_{rel})
- absolute Sekundenkapazität (SK_{abs})
- maximale Atemstromstärke bei Ausatmung (peak flow)

Da *wahre* Lungen-Volumina bzw. -Kapazitäten gesucht werden, müssen alle in dem Kesselspirometer bzw. mit der Spirometerglocke bei Raumtemperatur (Umgebungsbedingungen = ATPS: Ambient Temperature, Atmospheric Pressure, Water Saturated) gemessenen Werte auf "Lungen-Bedingungen" = BTPS (Body Temperature, Atmospheric Pressure, Water Saturated) umgerechnet werden.

Hierzu wird die den allgemeinen Gasgesetzen abgeleitete Gleichung 13 benutzt:

$$V_{BTPS} = V_{ATPS} \cdot \frac{T_{BTPS}}{T_{ATPS}} \cdot \frac{p_{Baro} - p_{Wa,ATPS}}{p_{Baro} - p_{Wa,BTPS}}$$

Gleichung 13

wobei:

V_{BTPS} = Volumen bei Körpertemperatur (body, $37^\circ\text{C} = 310\text{ K}$)

V_{ATPS} = Volumen bei Raumtemperatur (ambient)

p_{Baro} = aktueller Atmosphären-Druck

T_{BTPS} = Körpertemperatur (body temperature = 310 K)

T_{ATPS} = Raumtemperatur (ambient temperature, umzurechnen von $^\circ\text{C}$ in K)

$p_{Wa,ATPS}$ = Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei T_{ATPS}

$p_{Wa,BTPS}$ = Sättigungsdruck des Wasserdampfes bei $T_{BTPS} = 37^\circ\text{C}$

Zur Messung der Umgebungstemperatur und des aktuellen Atmosphärendrucks stehen ein Thermo- und ein Barometer zur Verfügung. Die Dampfdrücke des Wassers bei T_{ATPS} und T_{BTPS} können aus Tabelle 2 abgelesen werden.

Temperatur ($^\circ\text{C}$)	18	19	20	21	22	23	24	25	...	37
p_{Wa} (mmHg)	15,5	16,5	17,5	18,7	19,8	21,1	22,4	23,8	...	47,1

Tabelle 2: Druck des gesättigten Wasserdampfes in Abhängigkeit von der Temperatur

2.2.2 Versuchsdurchführung

- a) Bestimmung der VK (Kesselspirometer) im *Stehen* bei allen Gruppenmitgliedern
- b) Bestimmung der VK (Kesselspirometer) im *Liegen* bei allen Gruppenmitgliedern
- c) Bestimmung des Atemstoßwertes (peak flow) bei allen Gruppenmitgliedern

- d) Bestimmung von VT, IRV, ERV, VK und SK_{rel} bei zwei Probanden

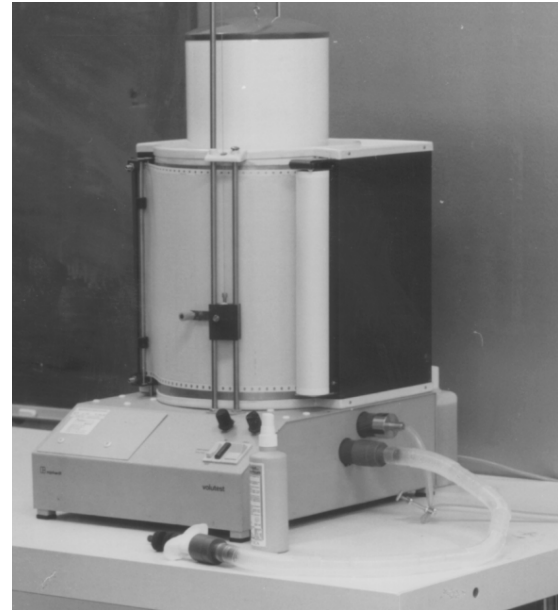


Abb. 4 *Links: Kesselspirometer zur Bestimmung der Vitalkapazität im Stehen. Rechts: Spirometer zur Bestimmung der Atemvolumina und der relativen Sekundenkapazität.*