

# Praktikumsanleitung zum Versuch „Energieumsatz und Atmungsregulation“

UNIVERSITÄT LEIPZIG  
MEDIZINISCHE FAKULTÄT  
CARL-LUDWIG-INSTITUT FÜR PHYSIOLOGIE  
AUSGABE FÜR PHARMAZIE-STUDIERENDE

VERSION 2024

**Stichwörter für Energieumsatz:** *Sauerstoffaufnahme, Sauerstoffverbrauch, Energiebegriff, Energieformen, Metabolismus, Energieumsatzniveaus von Zelle und Organismus, Grundumsatz (Bedingungen, spezifisch-dynamische Wirkung), Leistungsumsatz, Leistungszuwachs, Wirkungsgrad, direkte Kalorimetrie, indirekte Kalorimetrie (O<sub>2</sub>-Messung, respiratorischer Quotient, kalorisches Äquivalent, physikalischer und physiologischer Brennwert)*

**Stichwörter für Atmungsregulation:** *Partialdruck: pO<sub>2</sub>, pCO<sub>2</sub>; Sauerstoffsättigung, Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins, alveoläre Ventilation, Totraumventilation, Ventilationskoeffizient, Atemäquivalent, Zusammensetzung von atmosphärischer Luft und Alveolarluft; Atemzentrum, Chemorezeptoren, Propriozeptoren des Thorax und Dehnungsrezeptoren der Lunge (Hering-Breuer-Reflex), CO<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Antwortkurven.*

## Lernziele zur Praktikumsvorbereitung:

Nach der Vorbereitung zum Praktikumsversuch sind die Studierenden in der Lage:

- den Zusammenhang zwischen Sauerstoffaufnahme und Energieumsatz zu erklären,
- die Messung der Sauerstoffaufnahme und die Bestimmung des Energieumsatzes mittels der Indirekten Kalorimetrie zu erläutern sowie den Begriff Grundumsatz zu definieren,
- den Zusammenhang zwischen Sauerstoffsättigung und Sauerstoffpartialdruck im Blut zu erklären,
- die chemische Atmungsregulation zu beschreiben und die unterschiedlich starken Einflüsse von pO<sub>2</sub> und pCO<sub>2</sub> zu interpretieren.

## 1 Messung des Energieumsatzes mittels indirekter Kalorimetrie

### 1.1 Bestimmung des Umsatzes einer ruhenden, sitzenden Versuchsperson mittels indirekter Kalorimetrie

Die indirekte Kalorimetrie geht davon aus, dass im lebenden Organismus letztlich alle Energie aus der Oxidation der Nahrungsstoffe stammt. Bei der geringen O<sub>2</sub>-Speicherkapazität des Organismus muss dann der augenblickliche Energieumsatz  $E$  dem O<sub>2</sub>-Verbrauch  $V_{O_2}$  proportional sein. Es erfolgt die spirographische Messung des Sauerstoffverbrauchs pro Zeit (Sauerstoffaufnahme). Der Energieumsatz ergibt sich als Produkt aus Sauerstoffaufnahme (O<sub>2</sub>-Verbrauch/min) und dem nahrungsabhängigen kalorischen Äquivalent  $K\ddot{A}$  als Proportionalitätsfaktor. Für europäisches Essen kann  $K\ddot{A} = 20,2$  kJ/l angenommen werden. Die Sauerstoffaufnahme muss hierzu auf Normalbedingungen (STPD) mit dem wetterabhängigen Faktor  $k_{STPD}$  (**s. Anhang II**) reduziert werden.

Die innerhalb der Messzeit  $t_{Ruhe}$  umgesetzte Energie ist somit:

$$E = V_{O_2}^{STPD} \cdot K\ddot{A} = V_{O_2} \cdot k_{STPD} \cdot K\ddot{A}$$

Die innerhalb der Messzeit  $t_{Ruhe}$  erfolgte Sauerstoffaufnahme (Sauerstoffverbrauch pro Zeit) ist:

$$\dot{V}_{O_2} = \frac{V_{O_2}}{t_{Ruhe}}$$

Der Energieumsatz (Energie pro Zeit = Leistung) in Ruhe errechnet sich dann zu:

$$\text{Energieumsatz} = P = \frac{E}{t} = \frac{V_{O_2}^{STPD} \cdot K\ddot{A}}{t_{Ruhe}} = \dot{V}_{O_2} \cdot k_{STPD} \cdot K\ddot{A}$$

### 1.1.1 Allgemeine Grundsätze:

- Die Versuchsperson (Vp) ist über den geplanten Ablauf der einzelnen Versuche genau zu informieren. Kommandos sind vor Beginn zu verabreden.
- Besondere Beaufsichtigung der Vp bei den Versuchen zur Atmungsregulation (CO<sub>2</sub>-Überschuss, O<sub>2</sub>-Mangel). Bei O<sub>2</sub>-Mangel kann die eigene Wahrnehmung der Vp eingeschränkt sein!
- Anschluss der Vp an das Spirometer mit Mundstück und Schlauch. Sicherer Verschluss der Nase mit einer Klemme!
- Kalibrierung des Spirometers in vertikaler Richtung (y-Achse): **1 cm = 300 ml**

### 1.1.2 Versuchsablauf:

1. Registriergeschwindigkeit (nur bei eingeschaltetem Gerät) einstellen: **60 mm/min**
2. Atemsystem mit O<sub>2</sub> spülen und füllen:  
O<sub>2</sub>-gefüllte Spirometerglocke durch Herabdrücken bei gleichzeitiger Öffnung des Ventils am Inspirationsschlauch/Spirometergehäuse (Herabdrücken des Metallhebels) entleeren; anschließend erneute ausreichende O<sub>2</sub>-Füllung der Spirometerglocke.
3. Anschluss der Vp: Nasenklammer aufsetzen; Mundstück wie bei einem Schnorchel in den Mund nehmen; maximal 2 Minuten Atmung bei geöffnetem Bypass (oben am Metallmundstück) bis zur Gewöhnung.
4. Bypass am Mundstück durch Drehen am hinteren Ende vollständig (!) verschließen. Der Start des Versuchs ist durch die Aufzeichnung regelmäßiger Atembewegungen zu kontrollieren. Die Aufzeichnung erfolgt dann über einen Zeitraum von **maximal 10 Minuten (mind. 5 Minuten)**.
5. Zur Kontrolle der Konstanz des Energieumsatzes der Vp ist während des Versuches einmal pro Minute der Puls mittels des mobilen Pulsoximeters/Kapnographen (CAPNOX) zu messen. Die Pulsfrequenz [min<sup>-1</sup>] wird über die gesamte Versuchsdauer gezählt und zeitgerecht in das Spirogramm eingetragen.

### 1.1.3. Ergebnisse:

1. mittlerer O<sub>2</sub>-Verbrauch pro Minute (O<sub>2</sub>-Aufnahme); Korrektur auf STPD
2. Ruhe-Energieumsatz und Abweichung vom Soll-Grundumsatz . Angabe erfolgt in %, wobei Soll-Grundumsatz = 100 %).

Schätzung des Soll-Grundumsatzes nach: Mifflin, MD, St Jeor, ST, Hill, LA, Scott, BJ, Daugherty, SA, Koh, YO: A new predictive equation for resting energy expenditure in healthy individuals. American Journal of Clinical Nutrition, 51:241–247, 1990.

#### Frauen:

$$\text{Grundumsatz} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Tag}} \right] = -674 + 41,8 \cdot \text{Körpergewicht} + 2617 \cdot \text{Körpergröße} - 20,6 \cdot \text{Alter}$$

#### Männer:

$$\text{Grundumsatz} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{Tag}} \right] = 21 + 41,8 \cdot \text{Körpergewicht} + 2617 \cdot \text{Körpergröße} - 20,6 \cdot \text{Alter}$$

Körpergewicht in kg, Körpergröße in m, Alter in Jahren.

### 1.1.3. Diskussion:

Wodurch sind Abweichungen des Ruhe-Umsatzes vom Soll-Grundumsatz zu begründen?

Probandendaten	
Geschlecht	
Alter [Jahr]	
Größe [cm]	
Gewicht [kg]	
Soll-Grundumsatz [kJ/Tag]	
Wetterabhängige Daten	
Luftdruck [hPa]	
Raumtemperatur [°C]	
$k_{\text{STPD}}$	
Energieumsatz	
Messdauer $t_{\text{Ruhe}}$ [min]	
O <sub>2</sub> -Verbrauch [l] ( $V_{O_2}$ , unkor.)	
O <sub>2</sub> -Aufnahme [l/min] ( $\dot{V}_{O_2}$ , unkor.)	
O <sub>2</sub> -Aufnahme [l/min] ( $\dot{V}_{O_2}$ , STPD)	
Ruhe-Energieumsatz [kJ/min]	
Ruhe-Energieumsatz [Watt = J/s]	
Ruhe-Energieumsatz [kJ/Tag]	
Abweichung vom Soll-Grundumsatz in %	

**Tabelle 1:** Daten der Energieumsatzmessung

## ***2 Versuche zur Atmungsregulation***

Die Zusammensetzung der in ständigem Gasaustausch mit dem Blut stehenden Alveolarluft wird durch die äußere Atmung in engen Grenzen konstant gehalten. Es wird periodisch ein Teil der Alveolarluft ausgeatmet und durch eingeatmete atmosphärische Luft ersetzt. Die Häufigkeit dieses Vorganges (Atemfrequenz) und die Größe des in die Alveolen gelangten Gasvolumens (Atemzugvol. minus Totraumvol.) sind variabel. Ihre Einstellung erfolgt - in einem noch unvollkommen bekannten Prozess - unter Vermittlung von Rezeptoren (Chemorezeptoren, Mechanorezeptoren) und des nervösen Atemzentrums vorwiegend als Anpassung an die Erfordernisse des Stoffwechsels (O<sub>2</sub>-Verbrauch, CO<sub>2</sub>-Bildung) und an die mechanischen Gegebenheiten im Thorax-Lungenbereich.

Die Atemform („Atemmuster“) ist durch Angabe der Atemfrequenz und des Atemhubes (sowie dessen Ausgangsposition) gekennzeichnet. Das als Förderleistung des Atemapparates bezeichnete Atemminutenvolumen (Maß für die Ventilation) AMV ergibt sich aus dem Produkt von Atemzugvolumen und Atemfrequenz. Das Atemminutenvolumen ist in alveoläre Ventilation und Totraumventilation aufteilbar. Nur die alveoläre Ventilation steht in Zusammenhang mit den pro Minute ausgetauschten Volumina an O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>. Ein ungünstiges Atemmuster, wie flache Atmung bei gesteigerter Frequenz (Hechelatmung) führt zu einer Vergrößerung der Totraumventilation und damit des Atemäquivalents (Verhältnis von ventilierter Luftmenge zu aufgenommener O<sub>2</sub>-Menge).

## Fingerpulsoximeter

Auf Intensivstationen, bei Operationen, in der Geburtshilfe usw. gehört mittlerweile die Anwendung von sog. Fingerpulsoximetern zum Standard der Patientenüberwachung.

Bei diesem nichtinvasiven und kontinuierlichen Verfahren wird die Fingerkuppe mit zwei verschiedenen Wellenlängen monochromatischen Lichtes durchstrahlt und die Extinktion gemessen. Grundlage der Messung ist im Anhang dargestellt (s. Anhang III).

Da sich die Extinktion in Abhängigkeit von der arteriellen Pulsation rhythmisch verändert, lassen sich neben der Sauerstoffsättigung die Herzfrequenz und die periphere Pulskurve erfassen und anzeigen.

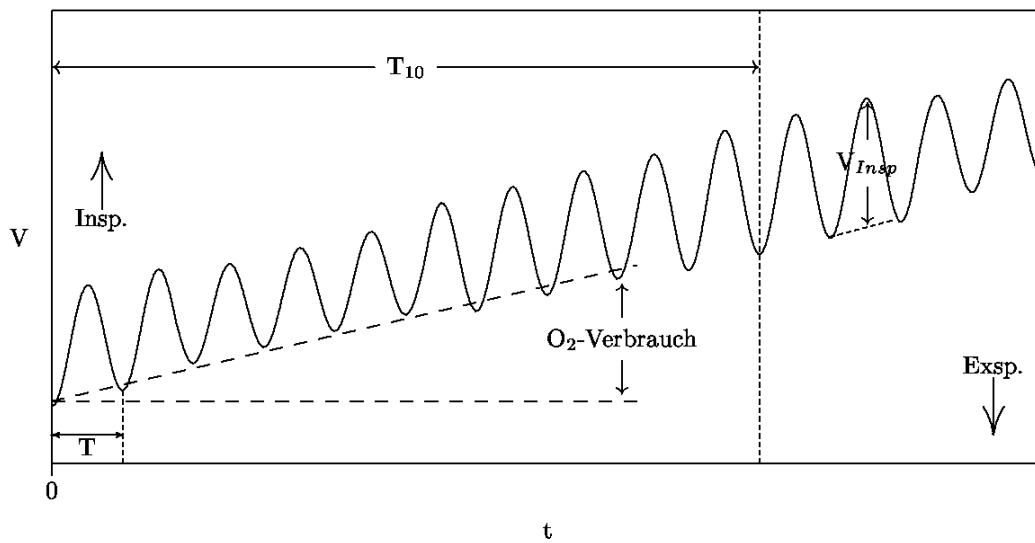
## 2.1 Auswertung der Ruheatmung (siehe Versuch 1.1 zum Ruheumsatz)

### 2.1.1 zu bestimmende Werte:

- mittleres Atemzugvolumen  $V_T$  [Liter] (bezogen auf BTPS-Bedingungen): aus einigen Atemzügen
- mittlere Atemperiodendauer (Dauer eines Atemzugs)  $T_{TOT}$  [s]: aus 10 aufeinanderfolgenden Atemzügen
- mittlere Atmungsfrequenz  $f_R$  [ $\text{min}^{-1}$ ]: Berechnen aus  $T_{TOT}$
- mittleres Atemminutenvolumen AMV [l/min] (bezogen auf BTPS-Bedingungen)
- O<sub>2</sub>-Aufnahme [ml/min] (bezogen auf STPD-Bedingungen): aus Versuchsergebnissen zu 1.1 (Tabelle 1) übernehmen
- Atemäquivalent für Sauerstoff  $EQ_{O_2}$  (unkorrigierte Werte = ATPS verwenden) nach der Formel:

$$EQ_{O_2} = \frac{\text{Atemminutenvolumen} \left[ \frac{l}{\text{min}}, \text{ATPS} \right]}{O_2 - \text{Aufnahme} \left[ \frac{l}{\text{min}}, \text{ATPS} \right]}$$

- Pulsfrequenz bei Ruhe [ $\text{min}^{-1}$ ]



**Abbildung 2:** Parameter der Ruheatmung

- V** Volumen
- T** Atemperiodendauer
- V<sub>Insp</sub>** Inspirationsvolumen
- t** Zeit
- T<sub>10</sub>** Dauer von 10 Atemperioden

**2.1.2 Ergebnisse:**

**k<sub>BTPS</sub>:**

Volumen	unkorrigiert	korrigiert	Normwert
Atemzugvolumen [ml]		BTPS:	
Atemminutenvolumen <i>AMV</i> [l/min]		BTPS:	
O <sub>2</sub> -Aufnahme $\dot{V}_{O_2}$ [ml/min], aus Tab. 1		STPD:	

Atemperiodendauer [s]	
Atmungsfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	
Atemäquivalent EQ <sub>O<sub>2</sub></sub>	
Mittlere Pulsfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	

**Tabelle 2:** Wertetabellen für die Ruheatmung

## 2.2 Einfluss von Kohlendioxid-Überschuss auf die Atmung: Atmung mit steigendem Kohlendioxid-Gehalt der Einatemungsluft (Rückatmungsversuch)

### 2.2.1 Durchführung:

An den Inspirationsstutzen wird ein Plaste-Zwischenstück angesteckt, das zwei Verbindungsschläuche zu einem Messgerät für die fortlaufende CO<sub>2</sub>-Messung enthält. Entleerung der Glocke und Füllung des Spirographen nur zu **2/3 mit Sauerstoff**, nachdem der CO<sub>2</sub>-Absorber (vom Assistenten! ) aus dem System entfernt wurde. Anschluss der Vp und diese wieder ca. 2 Minuten mit Raumluft bei geöffnetem Ventil adaptieren lassen. Danach Beginn der Registrierung (Registriereschwindigkeit 60 mm/min). Puls zählen und protokollieren (s. Aufgabenteil 2.1). Die Registrierung erfolgt so lange, bis erhebliche subjektive Atemnot den Abbruch nötig macht. Bei Abbruch sollten erhebliche Änderungen der Atmung deutlich sichtbar sein.

Zusätzlich zu den physiologischen Zeichen der CO<sub>2</sub>-Überschussatmung wird der Partialdruck des CO<sub>2</sub> (**pCO<sub>2</sub>**) über den **Kapnographen/Pulsoximeter (CAPNOX)** abgeschätzt. Die Anzeige erfolgt grafisch als ansteigende pCO<sub>2</sub>-Kurve (mmHg), wobei der mittlere Abschnitt des Displays folgendermaßen skaliert ist: untere Kante: 0 mmHg; untere gestrichelte Linie: 30 mmHg; obere gestrichelte Linie: 60 mmHg; obere Kante: 100 mmHg. Der Messwert ist in Minutenabständen zu erfassen. Außerdem wird der pCO<sub>2</sub> bestimmt, bei dem der Proband subjektiv einen **Atemantrieb** spürt. Dazu ist vor Versuchsbeginn mit der Vp eine entsprechende Zeichengebung zu vereinbaren (z.B. Heben eines Armes). Der pCO<sub>2</sub> beim Versuchsabbruch ist ebenfalls zu registrieren.

### 2.2.2 Ergebnisse:

	letzte 3 AZ jede Minute	Zahl der Atemzüge		minütlich ablesen	minütlich ablesen
Min	Atemzugvolumen (unkorr.) [l]	Atemfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	AMV (unkorr.) [l/min]	Pulsfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	pCO <sub>2</sub> [mm Hg]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

**Tabelle 4:** Messwerte für CO<sub>2</sub>-Überschuss

### 2.2.3 Auswertung:

- während des Versuches gibt die Vp ein Zeichen, ab wann deutliche Atemnot empfunden wird! Zeitpunkt und ggf. CO<sub>2</sub>-Konzentration markieren!
- das **Atemzugvolumen jeder Registrierminute** wird durch den **Mittelwert aus den jeweils letzten 5 Atemzügen** erfasst und auf BTPS-Bedingungen umgerechnet.
- die **Atemfrequenz** wird für jede Minute durch **Auszählen der registrierten Atemperioden** ermittelt (angefangene Atemzüge werden mitgewertet, wenn die Expiration bereits begonnen hat)
- das **Atemminutenvolumen** jeder Registrierminute wird als **Produkt aus Atemzugvolumen und Frequenz** berechnet.

Protokollieren Sie die Symptome, die Sie am Probanden beobachten konnten:

- Ab welchem pCO<sub>2</sub> wird Atemnot empfunden?
- Symptome bei Abbruch:
  - Gesichtsfarbe:
  - subjektive Empfindungen (Hitze, Kopfschmerzen, ...):

## 2.3 Einfluss von Sauerstoffmangel auf die Atmung

### 2.3.1 Durchführung:

Nach ausreichender Erholung der Vp (Rückkehr von Pulsfrequenz und Atmung auf die im Aufgabenteil 2.1 ermittelten Ruhewerte, Pausendauer mind. 15 min, wird der Spirograph, in den der CO<sub>2</sub>-Absorber (vom Assistenten!) wieder eingesetzt wurde, zu **1/2 mit atmosphärischer Luft** gefüllt. Es müssen auch die Verbindungsschläuche mit Luft gespült werden. Dazu sind die Schlauchverbindungen am Atemventil vorsichtig zu lösen. Die Spirometerglocke wird mehrfach über die Atemschläuche gefüllt und entleert. Anschluss der Vp und eine 2 minütige Adaptation bei geöffnetem Ventil. Nach Ventilschluss Beginn der Registrierung und Pulskontrolle wie im Aufgabenteil 3.2. Die Registrierung erfolgt bis zum Einsetzen von Hypoxiezeichen (Zyanose, Blässe, Pulsfrequenzanstieg). Die Vp soll während des Versuches eine absteigende Zahlenreihe in 3er Schritten, beginnend bei 1000, schreiben (1000, 997, 994...). **Treten als Anzeichen einer zerebralen Hypoxie Schriftunsicherheit und Schreibfehler auf, wird der Versuch sofort abgebrochen.** Subjektive Atemnot wird bei O<sub>2</sub>-Mangel **nicht empfunden**, die Atmungsvergrößerung ist gering.

Ebenfalls über den **Kapnographen/Pulsoximeter (CAPNOX)** lässt sich die **O<sub>2</sub>-Sättigung** messen. Die O<sub>2</sub>-Sättigung wird einmal pro Minute registriert.



### 2.3.2 Ergebnisse:

	letzte 3 AZ jede Minute	Zahl der Atemzüge		minütlich ablesen	minütlich ablesen
Min	Atemzugvolumen (unkorr.)[l]	Atemfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	AMV (unkorr.) [l/min]	Pulsfrequenz [min <sup>-1</sup> ]	O <sub>2</sub> -Sättigung [%]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

**Tabelle 5:** Messwerte für O<sub>2</sub>-Mangel

### 2.3.3 Auswertung:

- Welche Veränderungen im Schriftbild sowie bei den Rechenaufgaben waren zu beobachten?
- Symptome bei Abbruch:
  - Gesichtsfarbe:
  - Zyanose? (Ohrläppchen, Fingerkuppen, Lippen):
  - subjektive Empfindungen (Schwindel, motorische oder sensorische Störungen, Bewusstseinstörungen, ...):
- Etwa welchem pO<sub>2</sub> entspricht die gemessene O<sub>2</sub>-Sättigung bei Abbruch?

## 2.4 Graphische Auswertung und Diskussion zu Versuchen 2.2 und 2.3:

- Zeichnen Sie den zeitlichen Verlauf des AMV für Aufgabenteil 2.2 und 2.3 **in ein Diagramm** (x-Achse: Zeit in min, y-Achse: AMV in l/min)
- Beschriften Sie in der Kurve für die CO<sub>2</sub>-Überschussatmung folgende Datenpunkte:
  - erstmalig pCO<sub>2</sub> ≥ 40 mmHg
  - Einsetzen des Atemantriebs
  - Angabe des pCO<sub>2</sub> bei Abbruch
- Vergleichen Sie die in den Aufgabenteilen 2.2 und 2.3 erhaltenen Atmungssteigerungen!
  
- Als Maximalwerte der Ventilation (AMV) wurden ermittelt:
  - a) unter CO<sub>2</sub>-Überschuss
  
  - b) unter O<sub>2</sub>-Mangel
  
- Was sagen diese Werte über den jeweiligen Atmungsantrieb aus?

## Anhang I: Durchführung aller Versuche

1. Ruheatmung (Energieumsatz + Atmungsregulation)
  - Glocke mit **Sauerstoff** füllen (einmal spülen)
  - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in Stabhalterung
  - Vp atmet ca. 10 min (bei großen Probanden kürzer) in sitzender Position
2. Kohlendioxid-Überschuss (Atmungsregulation)
  - **CO<sub>2</sub>-Absorber ausbauen** lassen!
  - Glocke mit **Sauerstoff** füllen (einmal spülen)
  - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in Stabhalterung
  - Vp atmet bis **Atemnot** eintritt
  - Puls und O<sub>2</sub>-Sättigung kontrollieren (CAPNOX)
  - **pCO<sub>2</sub>** in der Atemluft jede Minute **notieren** (CAPNOX)
  - 20-30 min **Pause**
3. Sauerstoffmangel (Atmungsregulation)
  - **CO<sub>2</sub>-Absorber einbauen** lassen!
  - Glocke zu 1/2 mit **Raumluft** füllen (einmal spülen)
  - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in Stabhalterung
  - Vp beginnt Rechentest (1000, 997, 994...)
  - **O<sub>2</sub>-Sättigung** der Vp jede Minute **notieren** (CAPNOX)
  - Vp atmet bis Anzeichen von **Rechenunsicherheit, Schreibunsicherheit** und/oder zu geringe O<sub>2</sub>-Sättigung (<80 %) auftreten; **Kontrolle und Aufforderung durch externe Person** notwendig!

## Anhang II: Normierung von Gasvolumina

Das Gasvolumen im Glockenspirometer hängt von der Raumtemperatur  $T_{\text{Raum}}$  [K] und dem wetterabhängigen Luftdruck  $p_{\text{Raum}}$  ab. Für die Normierung auf Standardbedingungen STPD (Standard Temperature  $T_{\text{STPD}} = 273,15 \text{ K} = 0^\circ\text{C}$ , Pressure  $p_{\text{STPD}} = 760 \text{ Torr} = 101325 \text{ Pa}$ , Dry = trockene Luft) nutzt man die ideale Gasgleichung

$$\frac{(p_{\text{Raum}} - p_{\text{WD}}) \cdot V_{\text{Raum}}}{T_{\text{Raum}}} = \frac{p_{\text{STPD}} \cdot V_{\text{STPD}}}{T_{\text{STPD}}}$$

Da auf trockene Luft normiert wird, muss man gedanklich alle Wassermoleküle aus dem Volumen  $V_{\text{Raum}}$  entfernen, also den Luftdruck  $p_{\text{Raum}}$  um den Partialdruck des Wasserdampfes  $p_{\text{WD}}$  reduzieren. Für  $V_{\text{STPD}} = k_{\text{STPD}} \cdot V_{\text{Raum}}$  ergibt sich dann

$$k_{\text{STPD}} = \frac{T_{\text{STPD}}}{T_{\text{Raum}}} \cdot \frac{p_{\text{Raum}} - p_{\text{WD}}}{p_{\text{STPD}}}$$

Der Wasserdampfpartialdruck (Sättigungsdampfdruck)  $p_{\text{WD}}$  ist von der Raumtemperatur abhängig:

$$p_{\text{WD}} = 610,78 \text{ Pa} \cdot e^{\frac{17,08085 \cdot (T_{\text{Raum}} - 273,15 \text{ K})}{T_{\text{Raum}} - 38,975 \text{ K}}}$$

Für die Normierung auf Körpertemperatur BTSPS (**B**ody **T**emperature **P**ressure **S**aturated) gilt:

$$k_{\text{BTSPS}} = \frac{310,15 \text{ K}}{T_{\text{Raum}}} \cdot \frac{p_{\text{Raum}} - p_{\text{WD}}}{p_{\text{Raum}} - 6,281 \text{ kPa}}$$

## Anhang III: Messprinzip für die Sauerstoffsättigung

Desoxygeniertes oder reduziertes Hämoglobin rHb bindet Sauerstoff und wird zu Oxyhämoglobin O<sub>2</sub>Hb. Die **funktionelle Sättigung** ist das Verhältnis von der Oxyhämoglobin-Konzentration c<sub>O<sub>2</sub>Hb</sub> zu der Summe der Konzentrationen von desoxygeniertem Hämoglobin c<sub>rHb</sub> und Oxyhämoglobin c<sub>O<sub>2</sub>Hb</sub>:

$$S_{O_2, \text{funkt}} = \frac{c_{O_2Hb}}{c_{O_2Hb} + c_{rHb}}$$

Werden dysfunktionelle Konzentrationsanteile, wie Carboxyhämoglobin c<sub>COHb</sub> (das Hämoglobin transportiert Kohlenmonoxid, statt Sauerstoff, z.B. bei Rauchern), Methämoglobin c<sub>MetHb</sub> und weitere Derivate berücksichtigt, ergibt sich die **fraktionelle Sättigung**:

$$S_{O_2, \text{frak}} = \frac{c_{O_2Hb}}{c_{O_2Hb} + c_{rHb} + c_{COHb} + c_{MetHb} + \dots}$$

Die einzelnen Konzentrationen können über die Farbe des Blutes, genauer durch Absorption bestimmter Lichtanteile, bestimmt werden.

Falls nur eine Substanz mit der Konzentration c in der Flüssigkeit ist, wird monochromatisches Licht der Intensität I<sub>0</sub> mit der Wellenlänge λ nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz gedämpft

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot d}$$

Dabei ist ε(λ) der molare Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ der Substanz und d die Länge des Weges, die das Licht in der Flüssigkeit zurücklegt. Die Extinktion ist

$$E = -\ln \frac{I}{I_0} = \varepsilon(\lambda) \cdot c \cdot d$$

Für die funktionelle Sättigung müssen die Konzentrationen c<sub>O<sub>2</sub>Hb</sub> und c<sub>rHb</sub> bestimmt werden.

$$I = I_0 \cdot e^{-\varepsilon_{O_2Hb}(\lambda) \cdot c_{O_2Hb} \cdot d} \cdot e^{-\varepsilon_{rHb}(\lambda) \cdot c_{rHb} \cdot d}$$

Das ist eine Gleichung mit 2 unbekannt Konzentrationen. Um diese eindeutig zu lösen, muss man zwei Extinktionen mit verschiedenen Wellenlängen λ<sub>1</sub> und λ<sub>2</sub> messen.

$$E(\lambda_1) = \varepsilon_{O_2Hb}(\lambda_1) \cdot c_{O_2Hb} \cdot d + \varepsilon_{rHb}(\lambda_1) \cdot c_{rHb} \cdot d$$

$$E(\lambda_2) = \varepsilon_{O_2Hb}(\lambda_2) \cdot c_{O_2Hb} \cdot d + \varepsilon_{rHb}(\lambda_2) \cdot c_{rHb} \cdot d$$

Dieses Gleichungssystem liefert als Lösung die gesuchten Konzentrationen c<sub>O<sub>2</sub>Hb</sub> und c<sub>rHb</sub>.

Fingerpulsoximeter messen die funktionelle Sättigung bei den beiden Wellenlängen λ<sub>1</sub> = 660 nm und λ<sub>2</sub> = 940 nm. Da der Finger als Küvette dient und eine erhebliche Streuung auftritt, lassen sich andere Anteile nur schwierig bestimmen.

Will man die fraktionelle Sättigung bestimmen, wird ein Hämoximeter benötigt, welches 6 Extinktionen mit den Wellenlängen 535, 560, 577, 622, 636 und 670 nm (OSM3 von Radiometer) an einer Blutprobe bestimmt. Es ergibt sich dann ein Gleichungssystem mit 6 Gleichungen, welches dann die Konzentrationen c<sub>rHb</sub>, c<sub>O<sub>2</sub>Hb</sub>, c<sub>COHb</sub>, c<sub>SHb</sub> (Sulfhämoglobin), c<sub>MetHb</sub> und die Trübung liefert.