
Praktikumsanleitung zum Versuch „Energieumsatz und Atmungsregulation“

UNIVERSITÄT LEIPZIG
MEDIZINISCHE FAKULTÄT
CARL-LUDWIG-INSTITUT FÜR PHYSIOLOGIE

VERSION 2024

Stichwörter für Energieumsatz: *Sauerstoffaufnahme, Sauerstoffverbrauch, Energieformen, Metabolismus, Grundumsatz (Bedingungen), Leistungsumsatz, Wirkungsgrad, indirekte Kalorimetrie (O₂-Messung, respiratorischer Quotient, kalorisches Äquivalent, physikalischer und physiologischer Brennwert)*

Stichwörter für Atmungsregulation: *Partialdruck: pO₂, pCO₂; Sauerstoffsättigung, Sauerstoffbindungskurve des Hämoglobins, alveoläre Ventilation, Totraumventilation, Ventilationskoeffizient, Atemäquivalent, Zusammensetzung von atmosphärischer Luft und Alveolarluft; Atemzentrum, Chemorezeptoren, CO₂- und O₂-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 Einfluss der Arbeitsform auf den Wirkungsgrad zu interpretieren,
- den Zusammenhang zwischen Sauerstoffsättigung und Sauerstoffpartialdruck im Blut zu erklären,
- die chemische Atmungsregulation zu beschreiben und die unterschiedlich starken Einflüsse von pO₂ und pCO₂ zu interpretieren.

1 Messung des Energieumsatzes mittels indirekter Kalorimetrie

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

Es erfolgt die spiographische Messung des Sauerstoffverbrauchs pro Zeit (Sauerstoffaufnahme). Der Energieumsatz ergibt sich als Produkt aus Sauerstoffaufnahme (O₂-Verbrauch/min) und dem kalorischen Äquivalent $K\ddot{A} = 20,2 \text{ kJ/l}$ ¹ (s. auch Formelsammlung, Abschn. 1.5.1). Die Sauerstoffaufnahme muss hierzu auf Standardbedingungen (STPD) mit dem wetterabhängigen Faktor k_{STPD} (s. **Formelsammlung, Abschn. 1.3.1**) normiert werden.

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

$$E = \dot{V}_{O_2}^{STPD} \cdot K\ddot{A} = \dot{V}_{O_2} \cdot k_{STPD} \cdot K\ddot{A}$$

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

¹ Bei gemischter Ernährung (Kohlenhydrate, Proteine, Fette) mit mitteleuropäischer Kost beträgt das kalorische Äquivalent $K\ddot{A} = 20,2 \text{ kJ/l}$.

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

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 (CO₂-Überschuss, O₂-Mangel). Bei O₂-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 O₂ spülen und füllen:
O₂-gefüllte Spirometerglocke durch Herabdrücken bei gleichzeitiger Öffnung des Ventils am Inspirationsschlauch/Spirometergehäuse (Herabdrücken des Metallhebels) entleeren; anschließend erneute ausreichende O₂-Füllung der Spirometerglocke.
3. Anschluss der Vp: Nasenklammer aufsetzen; Mundstück wie bei einem Schnorchel in den Mund nehmen; bis zur Gewöhnung Atmung bei geöffnetem Bypass (oben am Metallmundstück).
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⁻¹] wird über die gesamte Versuchsdauer gezählt und zeitgerecht in das Spirogramm eingetragen.

1.1.3. Ergebnisse:

1. mittlerer O₂-Verbrauch pro Minute (O₂-Aufnahme); Korrektur auf STPD (s. ausgelegte Folien oder Formelsammlung, Abschn. 1.3.1, Tab. 1.4)
2. Ruhe-Energieumsatz und Abweichung vom Soll-Grundumsatz (s. Tafel oder Formelsammlung, Abschn. 1.5.1, Tab. 1.13; Angabe erfolgt in %, wobei Soll-Grundumsatz = 100 %).

Probandendaten	
Geschlecht	
Alter [Jahr]	
Größe [cm]	
Gewicht [kg]	
Soll-Grundumsatz [kJ/Tag]	
Wetterabhängige Daten	
Luftdruck [mmHg = Torr]	
Raumtemperatur [°C]	
k_{STPD}	
Energieumsatz	
Messdauer t_{Ruhe} [min]	
O ₂ -Verbrauch [l] (V_{O_2} , unkor.)	
O ₂ -Aufnahme [l/min] (\dot{V}_{O_2} , unkor.)	
O ₂ -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

1.1.4. Diskussion:

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

1.2. Umsatzsteigerung durch Arbeit, Wirkungsgrad

1.2.1 Überblick

Als Arbeit führt die Versuchsperson Kniebeugen aus. Sie muss dabei permanent, d.h. vor, während und nach der Arbeit, über das Mundstück mit dem Spirographen verbunden bleiben.

Um den Einfluss der Arbeitsform auf den Energieverbrauch und damit auf den Wirkungsgrad zu untersuchen, wird die Messung zweimal am gleichen Probanden durchgeführt:

Schnelle Kniebeugen: 15 „normale“ Kniebeugen

Langsame Kniebeugen: 15 Kniebeugen, bei Auf- und Abbewegung kurzes Verweilen in halb hockender Position

Der Wirkungsgrad ist das Verhältnis von mechanisch geleisteter Hubarbeit W_{Hub} zu der von den Muskeln benötigten Energie E_{Muskel}

$$\eta = \frac{W_{Hub}}{E_{Muskel}}$$

1.2.2 Berechnung des Sauerstoffverbrauchs für Muskelarbeit

Nach Arbeitsbeginn erhöht sich am Spirometer der Sauerstoffverbrauch (steilerer Anstieg) und pegelt sich einige Zeit nach Arbeitsende wieder auf den Ruhewert ein. Es wird der in Abb. 1 stark schematisierte Verlauf des Sauerstoffverbrauchs angenommen. Vom Beginn der Arbeit wird die Zeit Δt bis zum wieder eingestellten Ruheanstieg gemessen.

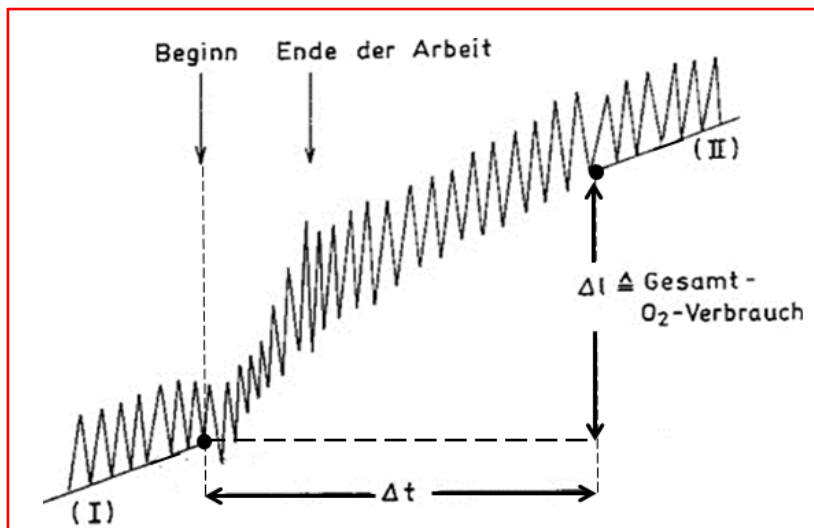


Abbildung 1: Spirogramm bei kurzzeitiger körperlicher Belastung. Die Phase erhöhten Sauerstoffverbrauchs wird durch die Ruhephasen (I) und (II) begrenzt. Nach Ende der Arbeit erfolgt nicht ein sofortiger Übergang zur Ruheatmung!

Der in dieser Zeit am Spirometer gemessene Gesamtverbrauch an Sauerstoff V_{Gesamt} setzt sich aus dem Sauerstoffverbrauch des Ruheumsatzes V_{RU} und der Muskeln V_{Muskel} zusammen:

$$V_{Gesamt} = V_{RU} + V_{Muskel}$$

Aus der Ruheumsatzmessung ist der unkorrigierte Sauerstoffverbrauch pro Minute bekannt (siehe Tab. 1); V_{RU} kann dann errechnet werden:

$$V_{RU} = \Delta t \cdot \dot{V}_{O_2}$$

Der Sauerstoffverbrauch für die Muskeln ist dann

$$V_{Muskel} = V_{Gesamt} - V_{RU} = V_{Gesamt} - \Delta t \cdot \dot{V}_{O_2}$$

Normierung nach STPD:

$$V_{Muskel}^{STPD} = V_{Muskel} \cdot k_{STPD}$$

Bei Muskelarbeit kann vom ausschließlichen Umsatz von Kohlenhydraten (Respiratorischer Quotient $RQ = 1$) ausgegangen werden. Unter dieser Bedingung beträgt das kalorische Äquivalent $K\ddot{A}_{Muskel} = 21,2 \text{ kJ/l}$ (Formelsammlung, Abschn. 1.5.1):

$$E_{Muskel} = V_{Muskel}^{STPD} \cdot K\ddot{A}_{Muskel}$$

1.2.3 Berechnung der mechanischen Arbeit

Als gehobene Masse werden $3/4$ der Körpermasse (m) angesetzt, da die Beine auf dem Boden bleiben. Die Hubhöhe (h) wird mit der Messlatte bestimmt (Differenz zwischen stehender und hockender Position). Die Arbeit ergibt sich als Produkt aus Kraft und Weg. Die Kraft ist Masse mal Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$. Der Weg ist die Hubhöhe h mal die Anzahl der Kniebeugen.

$$W_{Hub} = 15 \cdot \frac{3}{4} \cdot m \cdot g \cdot h \quad [J]$$

1.2.4 Versuchsdurchführung

1. Glocke mit Sauerstoff füllen.
2. Schreibgeschwindigkeit ist 60 mm/min.
3. Registrieren Sie ca. **1 Minute** den Sauerstoffverbrauch bei sitzender Versuchsperson.
4. Bei laufender Aufzeichnung führt die Vp 15 schnelle Kniebeugen aus. Das Mundstück bleibt im Mund!
5. Die Vp setzt sich wieder. Beobachten sie die weiterhin laufende Aufzeichnung. Wenn die Steilheit der Atemkurve und der Puls etwa wieder den Ruhewerten entsprechen (in der Regel nach **einigen Minuten**), beenden Sie den Versuch.
6. Glocke wieder mit Sauerstoff auffüllen. Danach wird wiederum die Ruhe-Sauerstoffaufnahme für ca. **1 Minute** aufgezeichnet.
7. Bei laufender Aufzeichnung führt die Vp jetzt 15 langsame Kniebeugen aus. Dabei sollte der Versuchsleiter den Takt vorgeben. Das Mundstück bleibt im Mund!
8. Anschließend setzt sich die Vp wieder. Beobachten sie die weiterhin laufende Aufzeichnung. Wenn die Steilheit der Atemkurve und der Puls etwa wieder den Ruhewerten entsprechen (in der Regel nach **einigen Minuten**), beenden Sie den Versuch.

1.2.5 Ergebnisse

	schnelle Kniebeugen	langsame Kniebeugen
Δt		
Gesamt-O ₂ -Verbrauch V_{Gesamt} [l], wie in Abb. 1		
O ₂ -Aufnahme in Ruhe (unkorr.) \dot{V}_{O_2} [l/min], aus Tab. 1		
Ruhe-O ₂ -Verbrauch während Δt [l] (unkorr.) $V_{RU} = \Delta t \cdot \dot{V}_{O_2}$		
O ₂ -Verbrauch der Muskeln [l] (unkorr.) $V_{Muskel} = V_{Gesamt} - V_{RU}$		
O ₂ -Verbrauch der Muskeln [l] (STPD) V_{Muskel}^{STPD}		
benötigte Energie E_{Muskel} [kJ]		
geleistete Hubarbeit W_{Hub} [kJ]		
Wirkungsgrad η in %		

Tabelle 2: Energieumsatzmessung bei körperlicher Belastung

1.2.6 Diskussion

- Welche Unterschiede hinsichtlich des Wirkungsgrades würden Sie zwischen schnellen und langsamen Kniebeugen erwarten, und sind diese eingetreten?
- Wie ist diese Erwartung (Beobachtung) zu begründen?

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 (O₂-Verbrauch, CO₂-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 O₂ und CO₂. 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 O₂-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. 14).

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:

- Atemzugvolumen V_{Insp} [l]: Mittelung aus einigen Atemzügen bzw. bei gleichmäßiger Atmung Ablesen aus einem Atemzug
- Atemperiodendauer (Dauer eines Atemzugs) T [s]: aus Zeit T_{10} für 10 aufeinanderfolgende Atemzüge
- Atemfrequenz f_R [min^{-1}]: Berechnen aus Periodendauer T bzw. Auszählen der Atemzüge in einer Minute
- Atemminutenvolumen AMV [l/min]
- O₂-Aufnahme (\dot{V}_{O_2} , unkor.) [ml/min]: aus Tabelle 1 übernehmen
- Atemäquivalent für Sauerstoff EQ_{O_2} (unkorrigierte Werte = ATPS verwenden) nach der Formel:

$$EQ_{O_2} = \frac{AMV}{\dot{V}_{O_2}}$$

- Pulsfrequenz bei Ruhe [min^{-1}]

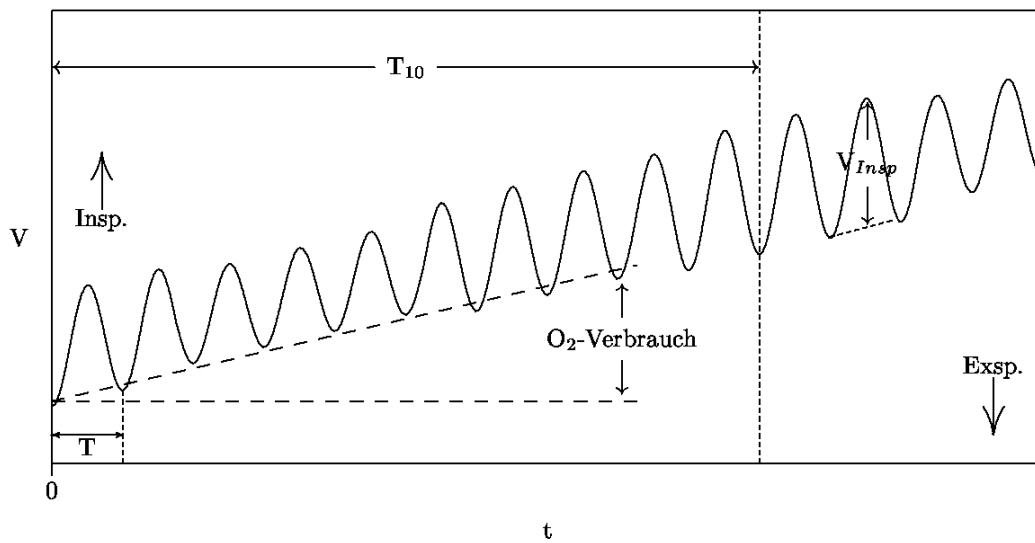


Abbildung 2: Parameter der Ruheatmung

- V** Volumen
- T** Atempriodendauer
- V_{Insp}** Inspirationsvolumen (Atemzugvolumen)
- t** Zeit
- T₁₀** Dauer von 10 Atemzügen

2.1.2 Ergebnisse:

k_{BTPS}:

Volumen	unkorr. (ATPS)	korrigiert	typischer Wert
Atemzugvolumen [ml]		BTPS:	
Atemminutenvolumen AMV [l/min]		BTPS:	
O_2 -Aufnahme \dot{V}_{O_2} [ml/min], aus Tab. 1		STPD:	

Atempriodendauer [s]	
Atmungsfrequenz [min^{-1}]	
Atemäquivalent EQ_{O_2}	
Ruhe-Pulsfrequenz [min^{-1}]	

Tabelle 3: 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:

Entleerung der Glocke und Füllung des Spirographen **mit Sauerstoff**, nachdem der CO₂-Absorber (vom Assistenten!) aus dem System entfernt wurde. Anschluss der Vp und nach Gewöhnung Verschluss des Bypasses. Danach Beginn der Registrierung (Registriereschwindigkeit 60 mm/min). Puls 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 (Atemzugvolumen, Atmungsfrequenz) sichtbar sein.

Der Partialdruck des CO₂ (pCO₂) wird durch Verbindung des Inspirationsstutzens mittels dünnen Schlauchs über den **Kapnographen/Pulsoximeter (CAPNOX)** abgeschätzt. Die Anzeige erfolgt grafisch als ansteigende pCO₂-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 pCO₂ 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 pCO₂ beim Versuchsabbruch ist ebenfalls zu registrieren.

2.2.2 Ergebnisse:

	am Ende jeder Minute	Atemzüge pro Minute		minütlich ablesen	minütlich ablesen
Min	Atemzugvolumen (unkorr.) [l]	Atmungsfrequenz [min ⁻¹]	AMV (unkorr.) [l/min]	Pulsfrequenz [min ⁻¹]	pCO ₂ [mm Hg]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Tabelle 4: Messwerte für CO₂-Überschuss

2.2.3 Auswertung:

- während des Versuches gibt die Vp ein Zeichen, ab wann Atemantrieb empfunden wird! Zugehörige CO₂-Konzentration protokollieren!
- das **Atemzugvolumen jeder Registrierminute** wird durch Mittelung aus mehreren Atemzügen (bei sehr unregelmäßiger Atmung) oder durch Ablesung aus einem Atemzug erfasst und auf BTPS-Bedingungen umgerechnet.
- die **Atmungsfrequenz** wird für jede Minute durch Auszählen der Atemzüge ermittelt
- das **Atemminutenvolumen** jeder Registrierminute wird als **Produkt aus Atemzugvolumen und Frequenz** berechnet.

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

- Ab welchem pCO₂ wird Atemantrieb 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 (Pausendauer mind. 15 min) wird der Spirograph, in den der CO₂-Absorber (vom Assistenten!) wieder eingesetzt wurde, **mit atmosphärischer Luft** gefüllt. Je nach Größe des O₂-Verbrauchs der Vp empfiehlt sich eine Füllung zur Hälfte bis zu zwei Dritteln (großer Verbrauch) oder knapp zur Hälfte (kleiner Verbrauch). Die Spirometerglocke wird vorher mehrfach über die Atemschläuche gefüllt und entleert (Spülung). Anschluss der Vp und nach Verschluss des Bypasses Beginn der Registrierung wie im Aufgabenteil 2.2. Zur Kontrolle soll die Vp während des Versuches eine absteigende Zahlenreihe in 3er Schritten, beginnend bei 1000, aufschreiben (1000, 997, 994...). **Treten als Anzeichen einer zerebralen Hypoxie Schriftunsicherheit, Rechen- und Schreibfehler auf, wird der Versuch abgebrochen. Weitere Hypoxiezeichen sind verzögerte Reaktionen auf das Ansprechen sowie Blässe und Zyanose. Der Abbruch des Versuchs wird von außen durch Abnehmen der Nasenklammer herbeigeführt.** Subjektive Atemnot wird bei O₂-Mangel **nicht empfunden**, die Atmungsvergrößerung ist gering.

Über den **Kapnographen/Pulsoximeter (CAPNOX)** wird die **O₂-Sättigung** messen. Die O₂-Sättigung wird einmal pro Minute protokolliert. Nach Abbruch des Versuchs wird die O₂-Sättigung weiterhin kontrolliert bis eine normale Sättigung (97-99 %) wiederhergestellt ist.

2.3.2 Ergebnisse:

	am Ende jeder Minute	Atemzüge pro Minute		minütlich ablesen	minütlich ablesen
Min	Atemzugvolumen (unkorr.)[l]	Atmungsfrequenz [min ⁻¹]	AMV (unkorr.) [l/min]	Pulsfrequenz [min ⁻¹]	O ₂ -Sättigung [%]
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Tabelle 5: Messwerte für O₂-Mangel

2.3.3 Auswertung:

<ul style="list-style-type: none">• Welche Veränderungen im Schriftbild sowie bei den Rechenaufgaben waren zu beobachten? • Symptome bei Abbruch:<ul style="list-style-type: none">- Gesichtsfarbe:- Zyanose? (Ohrläppchen, Fingerkuppen, Lippen): - subjektive Empfindungen (Schwindel, motorische oder sensorische Störungen, Bewusstseinstörungen, ...): • Etwa welchem pO₂ entspricht die gemessene O₂-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 CO₂-Überschussatmung folgende Datenpunkte:
 - erstmalig pCO₂ ≥ 40 mmHg
 - Einsetzen des Atemantriebs
 - Angabe des pCO₂ bei Abbruch
- Vergleichen Sie die in den Aufgabenteilen 2.2 und 2.3 erhaltenen Atmungssteigerungen!

- Als Maximalwerte der Ventilation (AMV) wurden ermittelt:
 - a) unter CO₂-Überschuss

 - b) unter O₂-Mangel

- Was sagen diese Werte über den jeweiligen Atmungsantrieb aus?

Anhang I: Durchführung aller Versuche

1. Ruheatmung (Energieumsatz + Atmungsregulation)
 - Glocke mit **Sauerstoff** füllen (vorher einmal spülen)
 - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in Stabhalterung
 - Vp atmet 5-10 min in sitzender Position
 - Ruhepuls gelegentlich mittels Pulsoximeter (CAPNOX) überprüfen
2. Schnelle Kniebeugen (Energieumsatz)
 - Glocke mit **Sauerstoff** füllen (vorher einmal spülen)
 - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in der Hand halten
 - Vp atmet bis Ruheatmung erkennbar ist (gleichmäßiger Anstieg der Atmungskurve)
 - Ruhepuls (CAPNOX) kontrollieren
 - 15 schnelle (normale) Kniebeugen
 - Vp setzt sich und atmet weiter bis sich Ruheanstieg der Atmung sowie Ruhepuls einstellen
3. Langsame Kniebeugen (Energieumsatz)
 - Glocke mit **Sauerstoff** füllen (vorher einmal spülen)
 - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in der Hand halten
 - weiter wie (2.) nur **definiertere** Ausführung der 15 Beugen
4. Kohlendioxid-Überschuss (Atmungsregulation)
 - **CO₂-Absorber ausbauen** lassen!
 - Glocke mit **Sauerstoff** füllen (vorher einmal spülen)
 - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in Stabhalterung
 - Vp atmet bis **Atemnot** eintritt
 - **pCO₂** in der Atemluft jede Minute **notieren** (CAPNOX)
 - 20-30 min **Pause**
5. Sauerstoffmangel (Atmungsregulation)
 - **CO₂-Absorber einbauen** lassen!
 - Glocke zu 1/2 mit **Raumluft** füllen (vorher mehrfach mit Raumluft spülen)
 - Papiergeschwindigkeit: 60 mm/min; Mundstück in Stabhalterung
 - Vp beginnt Rechentest (1000, 997, 994...)
 - **O₂-Sättigung** der Vp jede Minute **notieren** (CAPNOX)
 - Vp atmet bis Anzeichen von **zerebraler Hypoxie** auftreten; **Kontrolle und Aufforderung durch externe Person** notwendig!

Anhang II: Messprinzip für die Sauerstoffsättigung

Desoxygeniertes oder reduziertes Hämoglobin rHb bindet Sauerstoff und wird zu Oxyhämoglobin O₂Hb. Die **funktionelle Sättigung** ist das Verhältnis von der Oxyhämoglobin-Konzentration c_{O₂Hb} zu der Summe der Konzentrationen von desoxygeniertem Hämoglobin c_{rHb} und Oxyhämoglobin c_{O₂Hb}:

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

Werden dysfunktionelle Konzentrationsanteile, wie Carboxyhämoglobin c_{COHb} (das Hämoglobin transportiert Kohlenmonoxid, statt Sauerstoff, z.B. bei Rauchern), Methämoglobin c_{MetHb} 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 I₀ 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_{O₂Hb} und c_{rHb} 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 unbekanntem Konzentrationen. Um diese eindeutig zu lösen, muss man zwei Extinktionen mit verschiedenen Wellenlängen λ₁ und λ₂ 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_{O₂Hb} und c_{rHb}.

Fingerpulsoximeter messen die funktionelle Sättigung bei den beiden Wellenlängen λ₁ = 660 nm und λ₂ = 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_{rHb}, c_{O₂Hb}, c_{COHb}, c_{SHb} (Sulfhämoglobin), c_{MetHb} und die Trübung liefert.