

**Charité
Universitätsmedizin Berlin
Campus Benjamin Franklin**

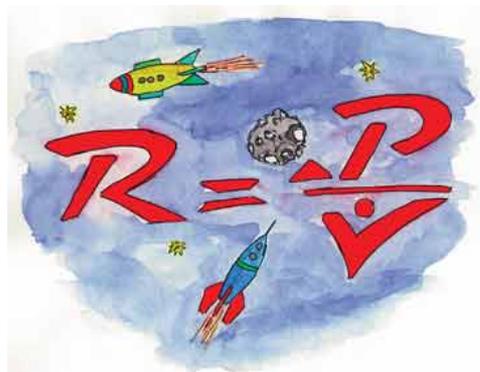


**Institut für Physiologie
Praktikum "Integrative Physiologie"
Studiengang Bioinformatik**

**Vegetative Regulation I: Atmung
Cluster B3: Spirometrie/Atemantriebe
Hinz, Pries, Kübler, Frischmuth**

Sommersemester 2005

Bitte Taschenrechner zum Praktikum mitbringen!



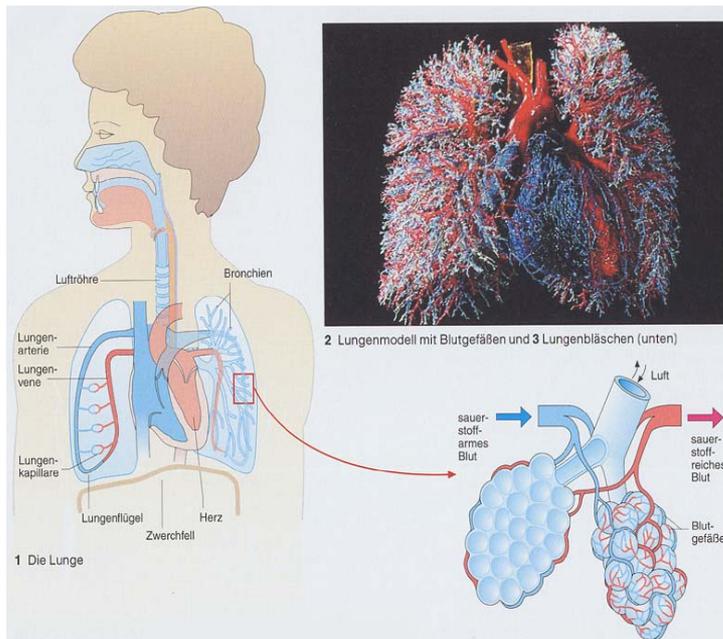
**'Integrative Physiologie'
Vegetative Regulation I: Atmung**

INHALT

Einleitung	3
(A) Spirometrie	4
1. Theoretische Grundlagen	4
2. Untersuchungsmethoden im Praktikum	9
3. Versuchsbeschreibung	9
4. Auswertung	18
5. Lungenmodell-Transmurale Drucke im Lungensystem	19
6. Fragen zur Auswertung	23
(B) Atemantriebe	20
1. Theoretische Grundlagen	20
2. Versuchsbeschreibung	22
3. Bedienung der Software	24
4. Auswertung	26
5. Fragen zur Auswertung	27
6. Tabellen zur Auswertung	28
(C) ANHANG	
 Interpretation ventilatorischer Verteilungsstörungen: Fluss- Volumenkurven	
 Überprüfung restriktiver und obstruktiver Lungenfunktionsstörungen	

Einleitung

Wozu Atmung?



Zur Bereitstellung von Energie benötigt jede Körperzelle Sauerstoff (O_2) und bildet Kohlendioxid (CO_2). Der Einzeller steht dabei in direktem Kontakt mit seiner Umwelt; die Körperzellen der höherentwickelten Organismen brauchen Transport-systeme, die unter den unterschiedlichsten Bedingungen für jede Zelle die O_2 -Versorgung und CO_2 -Ent-sorgung sicherstellen (Lunge und Kreislauf). Die Verbindung zwischen dem Gasaustausch in den Lungenalveolen ("äußere Atmung") und dem Gasaustausch in den Körpergeweben ("innere Atmung") wird durch den Kreislauf hergestellt.

Die äußere Atmung umfasst zwei Vorgänge: die Ventilation, d.h. die Belüftung der Alveolen (Lungenbläschen), und die Diffusion der Atemgase zwischen Alveolen und Lungenkapillaren (kleinste Blutgefäße in der Alveolarwand). Entscheidend für den Gasaustausch durch Diffusion ist die Differenz der Gaspartialdrücke über der alveolokapillären Barriere (Kapillarendothel, Basallamina und Alveolarepithel). Die atmosphärische Luft enthält 20,93% Sauerstoff (O_2 -Partialdruck= $0,2093 \cdot \text{Barometerdruck}$) und in sehr geringen Mengen Kohlendioxid so daß für die Humanphysiologie ein Partialdruck von Null angenommen werden kann („Pflanzenphysiologen und Klimaforscher sehen das etwas anders“). Das im Körper gebildete Kohlendioxid diffundiert dem Partialdruck-Gefälle vom Blut in die Alveole folgend in den Alveolarraum. Umgekehrt nimmt das Blut ständig Sauerstoff aus den Alveolen auf. Bei der Passage des Blutes durch die Alveolarkapillaren gleichen sich die Partialdrücke im Blut denen in der Gasphase (Alveolen) an (Äquilibrierung).

Die Zusammensetzung des in den Alveolen befindlichen Gases weicht erheblich von der der Atemluft ab und ist von grösster Bedeutung, da sie – wie erwähnt – den Partialdruck von Sauerstoff und Kohlendioxid des **oxygenierten** (in der Lunge frisch mit Sauerstoff angereicherten) Blutes bestimmt, das von der linken Herzkammer den Körpergeweben

zugeführt wird. Die Körperzellen sind auf einen ausreichend hohen Sauerstoffgehalt des oxygenierten Blutes aber auch auf einen sorgfältig **einregulierten Kohlendioxydgehalt** angewiesen. Das physikalisch gelöste Kohlendioxyd steht mit Kohlensäure im chemischen Gleichgewicht, welche wiederum durch Abspalten von H^+ -Ionen den pH-Wert des Blutes beeinflusst. Störungen des pH-Wertes beeinträchtigen die Funktion der Proteine (Eiweiße) und müssen daher von verschiedenen Organsystemen, so auch der Atmung, rasch ausgeglichen werden.

Die Zusammensetzung des Alveolargases hängt einerseits von der aktuell pro Zeiteinheit vom Körper aufgenommenen Sauerstoffmenge und der erzeugten Kohlendioxidmenge als auch von der Größe der Ventilation ab. Durch vertieftes und beschleunigtes Atmen können die intrapulmonalen (in den Alveolen) Gas-Partialdrücke denjenigen der Außenluft angenähert werden. Durch **Apnoe** (Atemanhalten) wird umgekehrt das Alveolargas an Sauerstoff verarmen (da dieses ständig verbraucht wird) sowie der Kohlendioxydgehalt zunehmen.

Die im Praktikum durchgeführten Lungenfunktionsuntersuchungen sollen wichtige Aspekte der Ventilation und Atmungsregulation verdeutlichen.

(A) Spirometrie

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Atemmechanik

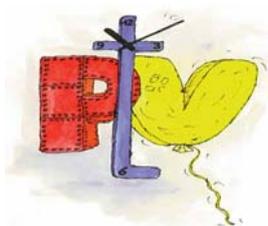
Die beiden Lungen (umgangssprachlich: Lungenflügel) sind elastische, in erster Näherung schwammartig untergliederte Hohlorgane. In Abwesenheit äußerer Kräfte ziehen sie sich unter ihrer eigenen Elastizität auf kleinsten Raum zusammen. Ihre Blut- und Luftgefäße (Hauptbronchien) treten an einer gemeinsamen Stelle, der Lungenwurzel, in das Organ ein; mit dieser Wurzel ist die Lunge an dem in der Mitte des **Thorax** (Brustkorbes) verlaufenden Organ- und Gewebeblock, dem Mediastinum (das unter anderem das Herz enthält), befestigt. Die übrige Lungenoberfläche ist von einer, dünnen, glatten, doppelblättrigen Haut umschlossen, der **Pleura** (Brust-Lungenfell). Die Lunge steckt nicht im Pleurasack. Vielmehr ist dieser um die freie Oberfläche des Organs gelegt; in der Umgebung der Lungenwurzel gehen die beiden Blätter ineinander über. Das **viszerale** (viszera: Eingeweide, hier also „zum Organ gehörig“) Pleurablatt (Lungenfell) ist an der Lungenoberfläche festgewachsen, das parietale (paries: Wand) Blatt (Brustfell) an der Innenseite des Thorax und des Zwerchfells. Der dadurch gebildete Zwischenraum heißt **Intrapleuralspalt**, er ist mit einer geringen Menge Gleitflüssigkeit gefüllt.

Der Thorax ist erheblich voluminöser als es dem Eigenvolumen der kräftefrei zusammengefallenen (kollabierten) Lunge entspräche. Da in den Pleuraspalt physiologischerweise keine Luft oder zusätzliche Flüssigkeit eindringen kann, drückt der Luftdruck die Lunge ständig an die Thoraxwand. Ihre Elastizität verursacht im Pleuraraum einen Unterdruck (gegenüber dem Luftdruck) und bewirkt so eine den Thorax zusammenziehende Kraft, deren Größe, dem Hookeschen Gesetz entsprechend, von der Dehnung der Lunge, also ihrem aktuellen Volumen, abhängt.

Durch rhythmische Volumenänderung des Thoraxinnenraumes können die Lungen be- und entlüftet werden. Die damit zusammenhängenden Sachverhalte fasst man unter dem Begriff Atemmechanik zusammen.

Die **Inspiration** (Einatmung) ist ein aktiver, d.h. Stoffwechselenergie verbrauchender Vorgang. Der Thoraxraum erweitert sich hauptsächlich dadurch, dass sich das Zwerchfell aktiv nach unten bewegt. Ein Unterdruck entsteht in den Alveolen, und Luft strömt durch die zuleitenden Atemwege in die Lungenalveolen. Die **Expiration** (Ausatmung) ist bei Ruheatmung zum größten Teil passiv; sie wird durch die elastischen Rückstellkräfte der Lunge bewirkt. Eine **aktive Expiration** wird mit Hilfe der inneren Zwischenrippenmuskeln und dem Bauchmuskeln möglich, die dem Thorax absenken und den Druck im Bauchraum erheben können (so dass das Zwerchfell nach oben gedrückt wird). Bei der Atemarbeit müssen zwei verschiedene Arten von Widerständen überwunden werden: der Dehnungswiderstand **Compliance** und der Strömungswiderstand **Resistance**.

Die Compliance bezeichnet die Volumendehnbarkeit ($C = \Delta V / \Delta P$), wobei ΔV die Änderung des intrapulmonalen Volumens und ΔP die Druckänderung des Systems Lunge und Thorax bezeichnet. Ein Teil der Inspiration geleisteten Arbeit der Atemmuskulatur wird als elastische Dehnung des Lungengewebes gespeichert. Diese Energie wird für die Ausatmung genutzt (s.o.). Bei jeder Luftbewegung (d.h. bei Ein- und Ausatmung) muß der visköse Reibungswiderstand der Luft in den Atemwegen überwunden werden: Atemwegswiderstand oder Resistance ($R = \Delta P / (V/t)$), wobei ΔP hier die Druckdifferenz zwischen Atemluft und Alveole bezeichnet; (V/t) ist das Volumen strömender Luft pro Zeiteinheit). Die Resistance kann also nur während einer Luftströmung gemessen werden.



1.2 Atem- und Lungenvolumina im Spirogramm

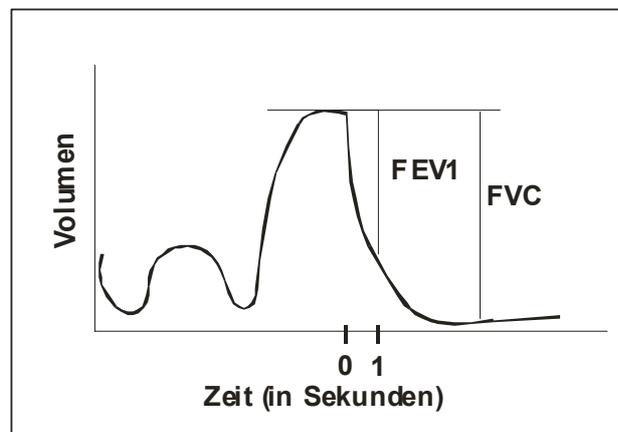
Als Lungenvolumen bezeichnet man das Gasvolumen, welches sich in der Lunge befindet, als Atemvolumen das ein- oder ausgeatmete Gasvolumen. Das in der Lunge vorhandene Gesamtvolumen (**Totalkapazität**) kann nur zu einem Teil ausgeatmet werden. Ein Teil dieses Volumens kann nicht ausgeatmet werden und verbleibt auch nach maximaler Expiration in der Lunge (**Residualvolumen**). Bei Ruheatmung verbleibt ein erheblich größeres Gasvolumen in der Lunge, die **funktionelle Residualkapazität (FRC)**. Das in der Lunge verbleibende Restvolumen vermischt sich bei jedem Atemzug mit der eingeatmeten Frischluft. Dadurch ist der O₂-Partialdruck in den Alveolen niedriger und der CO₂-Partialdruck höher als in der Umgebungsluft. Schwankungen des O₂-Partialdruckes zwischen Inspiration und Expiration werden durch die funktionelle Residualkapazität gedämpft. Ausserdem stellt dieser Gaspuffer eine Sauerstoffreserve dar, die zum Beispiel beim Sprechen, Singen und Atemanhalten genutzt wird.

Aufzeichnungen von Änderungen des Lungenvolumens als Funktion der Zeit heißen Spirogramm, die dazu benutzten Geräte Spirometer.

Spirogramm

Das maximal ventilierbare Lungenvolumen (**Vitalkapazität**) wird je nach Leistungsanforderungen genutzt. In Ruhe wird von der **Atemruhelage** (vollständige Erschlaffung der Atemmuskulatur) ausgehend ein **Atemzugvolumen** von etwa 300-500 ml ein- und ausgeatmet. Nach einem solchen Atemzug kann ein weiteres Volumen eingeatmet werden, das **inspiratorische Reservevolumen**. Dieses Volumen stellt eine Reserve für eine variable Leistungsanpassung dar. Zusätzlich kann vom Ende der Expiration ausgehend (Atemruhelage) durch forcierte Ausatmung (Zwischenrippenmuskeln und Bauchpresse) ein weiterer Teil der Vitalkapazität ausgeatmet werden. Dieses **expiratorische Reservevolumen** steht ebenfalls für eine weitere Leistungsanpassung zur Verfügung. Das expiratorische Reservevolumen wird mit dem Residualvolumen als **funktionelle Residualkapazität** zusammengefaßt. Bei jungen gesunden Menschen entspricht die **funktionelle Residualkapazität (FRC)** dem **thorakalen Gasvolumen (TGV)**. Das TGV ist dasjenige Volumen, welches sich nach normaler Ausatmung (Atemruhelage) im Thorax befindet und umfasst zusätzlich zur FRC andere Gasvolumina die keinen Anschluß an die Atemwege besitzen. Die funktionelle Residualkapazität ist von klinischer Bedeutung beim Emphysem, aber auch im Alter kommt es zur Verminderung der Elastizität der Lunge, mit der Folge einer Vergrößerung des Residualvolumens (Verdoppelung vom 20. bis 60. Lebensjahr). Die **Vitalkapazität (VC)** oder auch **forcierte Vitalkapazität (FVC)** ist das Volumen, das nach maximaler Einatmung maximal ausgeatmet werden kann.

Ein Atemzugvolumen multipliziert mit der Anzahl der Atemzüge pro Minute ergibt das **Atemminutenvolumen (AMV)** (ca. $0,5 \text{ l} \cdot 14/\text{min} = 7 \text{ l/min}$). Am Spirometer ermittelt man über die angegebene vier Volumina und Kapazitäten hinaus auch einige dynamische Lungenfunktionsparameter, speziell den Atemgrenzwert und die Sekundenkapazität. Der **Atemgrenzwert (AGW)** ist die maximal mögliche Ventilation (Angabe in l/min), die kurzfristig durch willkürliche maximal beschleunigte und vertiefte Ventilation erreicht wird (ca. 160 l/min). Das in einer Sekunde nach maximaler Inspiration maximal expirierbare Volumen wird als forcierte **Einsekundenkapazität (FEV1)** bezeichnet. Das Verhältnis **FEV1 / FVC** wird als **relative Einsekundenkapazität** bezeichnet und beträgt normalerweise $>75\%$. Dieser Wert ist ein guter Indikator für obstruktiven Atemwegserkrankungen. Für die Bestimmung im Spirogramm atmet der Proband aus maximaler Inspirationslage so schnell wie möglich aus (Tiffeneau-Test; Atemstoßtest).



1.3 Ventilationsstörungen

Restriktive Ventilationsstörungen liegen vor, wenn die Dehnbarkeit (Compliance) soweit eingeschränkt ist, daß das Fassungsvermögen der Lunge (Vitalkapazität) abfällt. Sie entstehen z.B. bei Lungenfibrose, bei Ausfall eines Lungenanteils z.B. durch Pneumonie oder Raumforderung oder beim Atemnotsyndrom bei Frühgeborenen durch Surfactantmangel (siehe Tabelle). Die Vitalkapazität lässt sich gut im Spirometer messen. Die Resistance, der Atemwegswiderstand, ist bei einer rein restriktiven Ventilationsstörung normal.

Bei **obstruktiven Ventilationsstörungen** ist der Atemwegswiderstand erhöht. Die Erhöhung des Strömungswiderstandes entsteht durch Verengung (Obstruktion) der zuführenden Atemwege, beispielsweise durch Krämpfe der Bronchialmuskulatur (Spasmen) und Schleimansammlungen in den Atemwegen (bei Asthma bronchiale). Bei obstruktiven Ventilationsstörungen zum Beispiel chronischer Bronchitis können die Atemwege bei forcierter Expiration kollabieren. Da ständig gegen einen erhöhten Widerstand ausgeatmet werden muss, kann es langfristig zur Überblähung der Lunge (Lungenemphysem, Erweiterung der Lufträume durch Destruktion und Rarefizierung der Alveolarsepten) kommen. Das

Residualvolumen und die funktionelle Residualkapazität sind vergrößert. Diagnostizieren lässt sich eine obstruktive Ventilationsstörung direkt durch Resistancebestimmung im Bodyplethysmographen oder auf indirekten Wege. Dazu eignet sich der **Atemstosstest** (Bestimmung der Einsekunden-Kapazität FEV1) oder die **Peak-Flow-Messung** (expiratorische Ausatemspitzenstromstärke).

Über 90% aller Lungenerkrankungen sind obstruktiv; häufigste Ursache ist das Rauchen!

	Restriktive VS	Obstruktive VS
Vitalkapazität	↓	normal
Compliance (Dehnungswiderstand)	↓	normal
Sekundenkapazität	normal	↓
Resistance (Strömungswiderstand)	normal	↑
Residualvolumen	↓	↑
Klinische Beispiele	Lungenfibrose Pneumonie	Asthma bronchiale, chronische Bronchitis chronisch obstruktive pulmonary disease (COPD z.B. durch Rauchen)

Neben den Ventilationsstörungen (Siehe Anhang) ist eine weitere Ursache von Störungen der Atemfunktion eine verminderte **Diffusionskapazität** der Lunge, der Gasaustausch zwischen Alveolen und Lungenkapillaren ist gestört. Häufigste Ursache von Diffusionsstörungen ist eine Vergrößerung der Diffusionsstrecke durch Bindegewebs- (Fibrose) oder Flüssigkeits-einlagerungen (Ödem) in die alveolokapilläre Membran.

Die Diffusionskapazität der Lunge (D) für ein bestimmtes Gas lässt sich berechnen als Quotient aus Diffusionsstrom (j) über der Membran und dem Partialdruckgefälle (ΔP):

$$D = j / \Delta P \quad (\text{abgeleitet vom 1. Fickschen Diffusionsgesetz})$$

Eine Diffusionsstörung wirkt sich klinisch primär auf die Diffusion für O₂ im Blut aus, da die CO₂-Diffusionskapazität (wegen der hohen Löslichkeit von CO₂ in Wasser) sehr viel grösser ist als diejenige für O₂.

1.4 Totraum und alveoläre Ventilation

Nur in einem Teil der Lunge kann der Gasaustausch mit dem Blut im notwendigen Umfang stattfinden. Den Raum, in dem kein Gasaustausch stattfindet, bezeichnet man als Totraum. Dazu rechnet man das Volumen der Atemwege, in denen auf Grund der Gewebsstruktur kein Gasaustausch stattfinden kann (**anatomischer Totraum**). Der funktionelle oder

physiologische Totraum schließt zusätzlich die Teile ein, in denen z.B. auf Grund von Veränderungen in der Durchblutung das Blut nicht arterialisiert werden kann. Beim Gesunden stimmen die Volumina des anatomischen und des physiologischen Totraumes annähernd überein.

2 Untersuchungsmethoden im Praktikum

Das **Spirometer** und das **Peak-Flow-Meter** sind Geräte, die eine einfache erste Diagnose von Ventilationsstörungen erlauben. Die Untersuchung ist in Praxen und kleineren Kliniken möglich. Allerdings sind die Meßwerte in hohem Maße abhängig von der Mitarbeit des Patienten. Die Geräte und Untersuchungstechniken sollten also jedem „Nicht-Facharzt“ bekannt sein und einer ausführlichen Lungenuntersuchung vorausgehen. Die **Bodyplethysmographie** ermöglicht eine umfassende Untersuchung der Lungenfunktionen und stellt eine Erweiterung der Spirometrie dar: Neben der üblichen Spirometrie lassen sich zusätzlich Aussagen über **Resistance (Atemwegswiderstand)**, **thorakales Gasvolumen** (bzw. Residualvolumen) und **Diffusionskapazität** treffen. Diese Messwerte sind entscheidend für die Differenzierung und Klassifizierung von Störungen der (äußeren) Atemfunktion (also von obstruktiven und restriktiven Ventilationsstörungen sowie Diffusionsstörungen).

3 Versuchsbeschreibung

3.1 Spirometrie

Die Spirometrie ist ein Verfahren zur Untersuchung der Ventilation. Dabei werden mobilisierbare Lungenvolumina und dynamische Lungenfunktionsparameter gemessen und graphisch im Spirogramm dargestellt. Die Totalkapazität ist mit einfachen Spirometern nicht messbar, da das Residualvolumen nicht ausgeatmet werden kann.

Folgende Werte können mit Hilfe der Spirometrie gemessen werden:

- **Atemzugvolumen (AZV):** Es entspricht dem ein- bzw. ausgeatmeten Volumen bei normalem Atemzug.
- **Inspiratorisches Reservevolumen (IRV):** Dies ist das Volumen, das nach normaler Einatmung noch zusätzlich eingeatmet werden kann.
- **Expiratorisches Reservevolumen (ERV):** Es ist das Volumen, das nach normaler Ausatmung noch zusätzlich ausgeatmet werden kann.
- **Inspiratorische Kapazität (IC):** Sie ist definiert als das Volumen, das nach normalem Ausatmen maximal eingeatmet werden kann.

- **Vitalkapazität (VC)** ist das Volumen, das nach maximaler Einatmung maximal ausgeatmet werden kann.
- **Einsekundenkapazität (FEV1, Tiffeneau-Test)** ist das Volumen, das bei maximaler Einatmung in einer Sekunde maximal ausgeatmet werden kann.

Funktionsprinzip des Glockenspirometers

Zur Erfassung der Lungenvolumina wird ein Spirometer benötigt. Im Praktikum wird das **Glockenspirometer** verwendet.

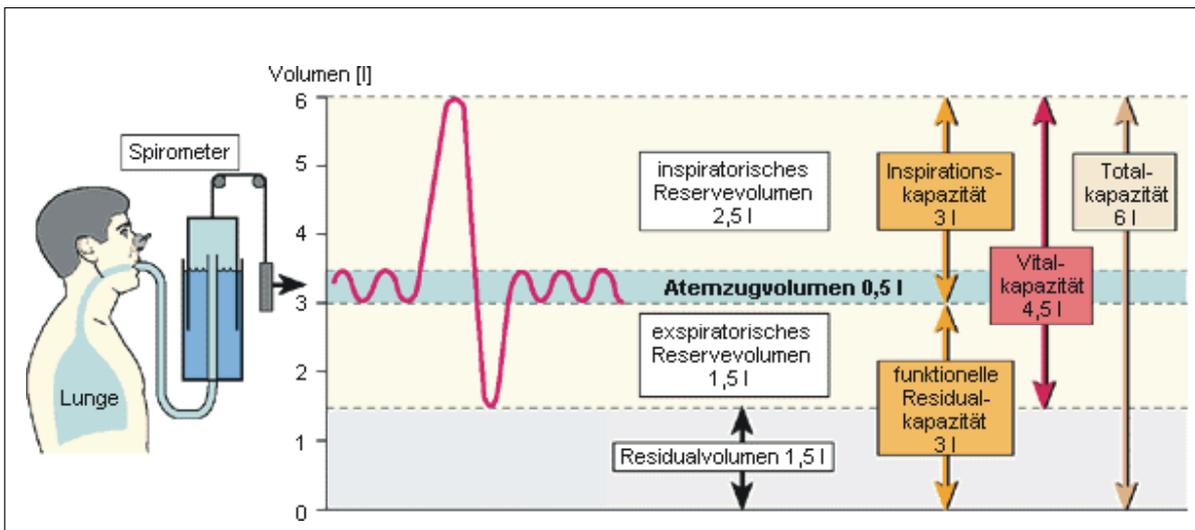


Abb.: Funktionsprinzip eines Spirometers.

Basis des Glockenspirometers ist ein Behälter mit Wasser. Eine zylindrische Glocke taucht in den Wasserbehälter ein. Das Gewicht der Glocke wird durch ein Gegengewicht ausgeglichen. Ein Schlauch verbindet das Mundstück des Patienten mit dem Spirometer. Atmet der Patient ein bzw. aus kommt es zu Volumenänderungen, die wiederum zu entsprechenden Glockenbewegungen führen. Diese können an einer Skala abgelesen oder aufgezeichnet werden (Spirogramm). Spirometrien können auch mit technisch anders aufgebauten Geräten z.B. Bodyplethysmographen durchgeführt werden.

Ablauf der Spirometrie

1. Mundstück auf den Schlauch stecken, dieses soll die Versuchsperson (VP) anschließend zwischen Lippen und Zähne nehmen. Der VP muß die Nasenklemme aufsetzen.
2. Sauerstoffzufuhr anstellen (Knopf „O₂“ drücken), Schreiber auf eine mittlere Position bringen, Papiervorlaufgeschwindigkeit auf 60 mm/sec stellen (Die Versuchsperson hat keinen Einblick in die Registrierung).

Folgende Anweisungen vorlesen:

1. Die **Ruheatmung** sollte mindestens 2-3 Minuten lang durchgeführt werden. Es muß so lange gewartet werden, bis die Atemexkursionen regelmäßig und gleich groß sind.
2. Die VP soll langsam *maximal ein-* und anschließend *maximal ausatmen* (insgesamt dreimal wiederholen; zwischen den einzelnen Atemzügen einige Ruheatemzüge). Das bei diesem *maximalen Atemzug* ventilierte Volumen entspricht der **Vitalkapazität**. Man ermittelt so auch das inspiratorische und expiratorische **Reservevolumen**.
3. Bestimmung der **Funktionellen Residualkapazität (FRC)**. Es wird nun im geschlossenen System geatmet. Der Spirometerglocke wird ein Volumen Helium (He) zugegeben, und die so entstandene He-Konzentration in der Glocke gemessen. Nun atmet die VP von der Atemruhelage ausgehend dieses He-Gemisch ein und aus. Das im Praktikum verwendete Spirometer erkennt die vollständige Durchmischung des He in der Lunge daran, dass sich die gemessene Konzentration nicht mehr ändert. Es wird dann der Messwert für die funktionelle Residualkapazität (FRC) angezeigt.
4. Kurze Ruheatmung, VP auffordern maximal einzuatmen und die Luft kurz anzuhalten. Während der kurzen Apnoe umschalten auf schnelle Registrierung. Die VP soll anschließend bei maximaler Expirationsanstrengung so schnell wie möglich ausatmen. Aus der Registrierung wird das in der ersten Sekunde expirierte Volumen ermittelt (**1-Sekunden-Ausatmungskapazität**).
5. Erneut kurze Ruheatmung, dann wird die VP aufgefordert, so schnell und tief wie möglich ein- und auszuatmen (AF 30/min). Nach ca. 25 Sekunden wieder Ruheatmung. (Auf langsame Registrierung zurückschalten.) Aus dieser Registrierung wird die *maximale willkürliche Ventilation* (**Atemgrenzwert = AGW**) errechnet.

Auswertung der Spirometrie

1. **Ruheatmung:** Auszählen der Atemexkursionen über eine Minute = Atemfrequenz (AF). Ausmessen des Volumens von 5 Atemzügen, Bildung des Mittelwertes = mittleres Atemzugvolumen (V_E).
2. **Vitalkapazität:** Ausmessen des Volumens des größten der drei maximalen Atemzüge = VK
3. Als **expiratorisches Reservevolumen (ERV)** mißt man das Volumen, das von der *Atemruhelage* (= *Minimum nach einer normalen Expiration bzw. Niveau in den Atempausen zwischen den Atemzügen*) aus maximal ausgeatmet worden ist. Entsprechend wird das inspiratorische Reservevolumen (IRV) bestimmt: Volumen der maximalen Inspiration von Atemruhelage aus messen und das Zugvolumen V_E davon abziehen. $ERV + V_E + IRV = VK$; IK (Inspirationskapazität) = $IRV + V_E$
4. **Atemstoßtest (Tiffeneautest):** Es werden ausgewertet: das maximal ausgeatmete

Volumen (forcierte Vitalkapazität) und das in der ersten Sekunde ausgeatmete Volumen (1s –Kapazität). Zur Auswertung des Atemstoßtestes wird dann die relative Sekundenkapazität in % der forcierten Vitalkapazität angegeben.

5. **Atemgrenzwert (AGW):** 10 Sekunden das ventilierte Volumen messen, umrechnen auf 1 Minute. Die ermittelten Werte werden in die Tabelle eingetragen. Zum Vergleich sind in der Tabelle die für einen 25-jährigen Mann (ca. 75 kg) geltenden Normalwerte angegeben. Ferner: Vergleich der individuellen Werte mit den Sollwerten aus den Nomogrammen.

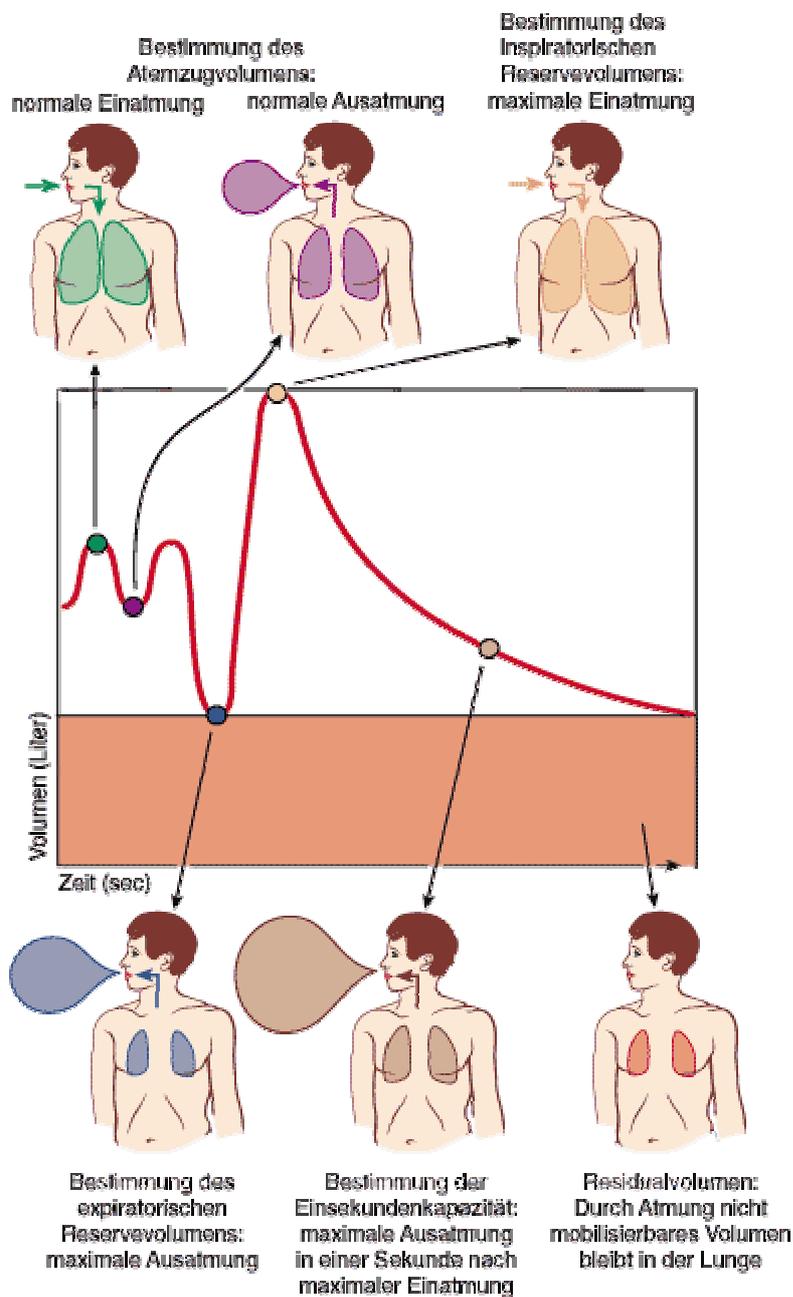


Abb.: Messung am Spirometer.

Atemstoßtest-meßgerät:

Das *Prinzip* dieses Gerätes besteht darin, dass ein Schreiber das Ausatemvolumen mechanisch erfasst, was dann auf dem vorgedruckten Volumen/Zeit – Diagramm abgelesen werden kann.

Zur *Bedienung* des Gerätes:

Schwarzer Hebel links an der Seite runterdrücken, Blatt einschieben, Pappröhrchen auf den Schlauch stecken, maximal Luft holen und unter maximaler Expirationsanstrengung in das Pappröhrchen pusten. (Wenn die Walzen anschließend nicht aufhören, sich zu drehen, den Knopf auf der linken Seite so lange leicht ziehen und schieben, bis die Walzen stillstehen und ein neues Blatt eingelegt werden kann).

Die Vitalkapazität wie auch der nach einer Sekunde ausgeatmete Anteil lässt sich nun ablesen.

Funktionsprinzip und Ablauf der Peak Flow Messung



Abb: Dieses kleine Gerät ist eine Minimalvariante der Spirometrie, eine „bedside“-Untersuchung im Krankenhaus oder zu Hause, wo es den Patienten (z.B. Asthmatikern) ermöglicht wird, Tagesschwankungen der Atemflussbehinderung selbständig zu erkennen.

Zur *Bedienung* des Gerätes:

Pappröhrchen aufstecken, tief Luft holen, schnell ausatmen, Ergebnis ablesen.

3.2 Ganzkörperplethysmographie

Die Ganzkörperplethysmographie oder auch Bodyplethysmographie stellt ein Verfahren zur Lungenfunktionsprüfung in Erweiterung der Spirometrie dar. Die Wortteile "plethys" und "graphie" leiten sich beide aus dem Griechischen ab. Dabei kann "plethys" mit Fülle oder Menge übersetzt werden und "graphie" bedeutet Aufzeichnungs-Verfahren.

Neben der mobilisierbaren Lungenvolumina und Lungenfunktionsparameter (entsprechend der Standardspirometrie) können folgende Messgrößen bestimmt werden:

- Resistance** (Atemwegswiderstand): Strömungs-Widerstand in den Atemwegen.
- Thorakales Gasvolumen** (TGV): Komprimierbares Volumen, welches nach normaler Expiration im Thorax enthalten ist.
- Residualvolumen** (RV): Luftvolumen, das nach maximaler Ausatmung in der Lunge verbleibt.
- Diffusionskapazität**

Funktionsprinzip des Ganzkörperplethysmographie

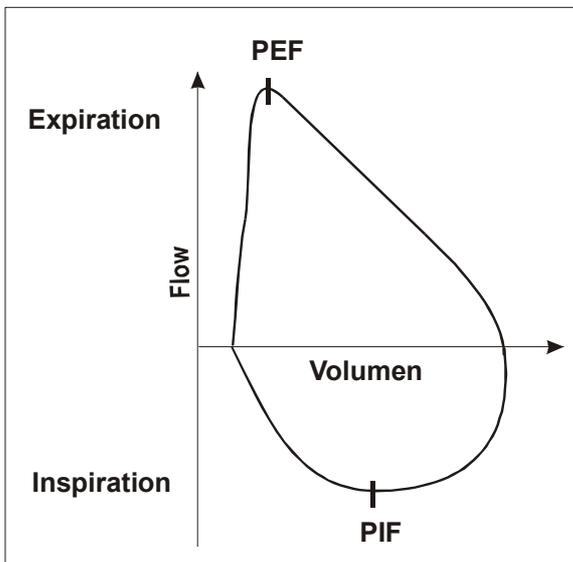


Zu dieser Untersuchung sitzt der Proband in einer etwa 1m³ großen Kammer und atmet durch ein Mundstück, welches die einzige Verbindung zur Aussenwelt darstellt

Spirometrie im Bodyplethysmograph

Im Bodyplethysmographen wird die Volumenverschiebung während der Atmung indirekt über die Messung der Luftströmung durch ein spezielles Atemrohr bestimmt. Zur Messung von Resistance und thorakalen Gasvolumen (TGV) werden zusätzlich Druckänderungen in der luftdicht abgeschlossenen Kammer des Gerätes bestimmt.

Maximale expiratorische Atemstromstärke (Peak expiratory flow = PEF)



Für die Messung wird der Proband zunächst zu maximaler Inspiration, dann zu maximaler Expiration aufgefordert. Während der Expiration wird der Atemgasflow gemessen. In der Anfangsphase der Expiration steigt die Stromstärke schnell auf ein Maximum an, das als Atemstoß oder PEF (Peak expiratory flow) bezeichnet wird und einen Wert von etwa 10 l/s erreicht.

Resistancebestimmung

Der Atemwegswiderstand R lässt sich analog dem Ohmschen Gesetz berechnen als

$$R = U / I = P_{pul} / (V/t)$$

Die **Resistance (R)** (*visköser Atemwegswiderstand*) ist gleich dem pulmonalen Druck (P_{pul}) pro Atemstromstärke (V/t) (zeitlicher Differentialquotient des Lungenvolumens).

P_{pul} : strömungswirksame Druckdifferenz; der äußere Atmosphärendruck wird auf Null gesetzt, damit ist P_{pul} der intrapulmonale Druck (Druck oder Unterdruck in den Lungenalveolen).

Die Resistance kann also nur während einer Luftströmung gemessen werden. Für die Bestimmung sind Atemstromstärke und die treibende Druckdifferenz zwischen Lungeninnerem und Aussendruck zu bestimmen. Die *Atemstromstärke* (V/T) kann direkt am Atemmundstück bestimmt werden. Schwieriger ist es, den Druck in der Lunge bzw. die treibende Druckdifferenz zwischen Lungeninnerem und Aussendruck bei ungestörter Spontanatmung fortlaufend zu messen. Da die direkte Messung in der Lunge selbst nur beim intubierten Patienten unter Narkose möglich wäre, muss der pulmonale Druck auf indirektem Weg bestimmt werden: Dafür sitzt die Versuchsperson in einer luftdicht abgeschlossenen Kammer (Tür des Body-Plethysmographen wird verschlossen). Dadurch sind die Volumina von Lunge und Kammer durch die Atemwege aber auch über die Thoraxwand aneinander gekoppelt. Die Zunahme des Lungenvolumens und Dehnung des Thorax bei der Einatmung hat eine Abnahme des Kammervolumens zur Folge, da durch die Erweiterung des Thorax

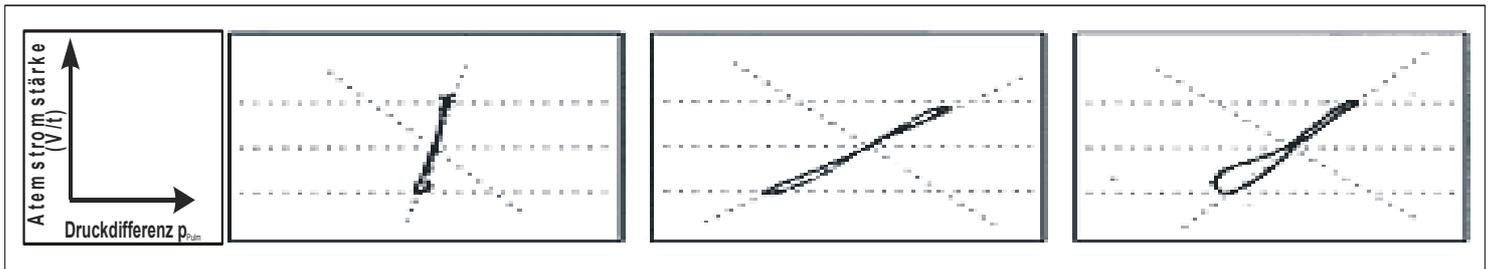
die Luft in der Kammer komprimiert wird. Zur Einatmung wird ein „Unterdruck“ in den Alveolen erzeugt, der zu einer Ausdehnung des intrapulmonalen Gasvolumens führt. Dabei steigt der Druck in der Kammer an. Die Druckzunahme in der Kammer ist messbar und spiegelt die Druckabnahme in der Lunge wieder (indirekte Proportionalität).

Die indirekt bestimmte Druckdifferenz zwischen Lunge und Aussenwelt und die am Mundstück bestimmte Volumenstromstärke werden in einem Diagramm gegeneinander aufgetragen. Der Anstieg der entstehenden Kurve (sogenannte Resistance-Kurve) entspricht der Resistance:

a

b

c



Nach pneumologische Akzente 10/1987

Die drei Abbildungen a, b und c zeigen Originalkurven Ganzkörperplethysmographischer Untersuchungen. Auf der vertikalen Achse ist jeweils die Atemstromstärke, auf der horizontalen die Kammerdruckänderung aufgetragen. Abbildung a (links) zeigt eine Kurve bei einem Probanden ohne Funktionsstörung b (mitte) eine Kurve bei schwerer Obstruktion (rechts) eine Kurve bei Obstruktion mit Lungenüberblähung (Emphysem). Zur Bestimmung der Resistance (R) lässt man die Versuchsperson ruhig atmen. Währenddessen werden die Volumenstromstärke an der Mundöffnung sowie die errechneten Druckschwankungen in der Lunge aufgezeichnet. Damit ist R prinzipiell aus jedem einzelnen Datenpaar von Stromstärke und Druckdifferenz (Kammerdruck - P_{pul.}) bestimmt. Man verwendet diverse Methoden, um aus den Messwerten für einen Atemzug ein mittleres R zu bestimmen.

Thorakales Gasvolumen

Die Resistance kann nur während einer Luftströmung gemessen werden. Bei der Bestimmung des **Thorakalen Gasvolumens** hingegen muss der Luftweg verschlossen werden, da sonst der bei jeder Thoraxerweiterung der entstehende Unterdruck einen Luftstrom bewirkt und die Luftmenge in der Lunge verändert.

Wird der Luftweg bei der Inspiration plötzlich verschlossen, während die Versuchsperson weiter „einzuatmen“ versucht, dehnt sich die eingeschlossene Luftmenge unter Druckabfall

aus, ohne daß die Luftmenge sich ändert. Die dabei entstehende Volumenausdehnung von Thorax und Abdomen komprimiert das Kammervolumen. Während diesem Manöver werden der Druck in der Kammer (p_K) (genauer die Abweichung des Kammerdruckes vom atmosphärischen Druck) und der Druck in der Lunge (p_L), am Sensor des Mundstückes gemessen (siehe Zeichnung 2).

Das Verhältnis der Druckänderungen ist nach dem Boyle-Mariott'schen Gesetz umgekehrt proportional zum Verhältnis der Volumina:

$$p_K / p_L = V_L / V_K$$

Auf dem Bildschirm des Bodyplethysmographen wird p_L gegen p_K aufgetragen und die Steigung der Kurve entspricht dem Verhältnis p_L gegen p_K . Bei bekannten Kammervolumen (V_K) kann das TGV folgendermaßen berechnet werden:

$$TGV = V_L = p_K / p_L * V_K$$

Ablauf der Bodyplethysmographie

1. Programm starten
2. *Persönliche Daten* der Versuchsperson eingeben
3. Programm „*Bodyplethysmograph*“ starten, Versuchsperson setzt sich in die Kabine, für den automatischen Druckabgleich: Mundstück beiseite drehen (am besten in Richtung Tür), Tür schliessen: auf „Tür“ klicken; beide Verschlüsse oben und unten fest andrücken.
4. Versuchsperson nimmt das Mundstück zwischen Lippen und Zähne (Mund um Mundstück dicht schließen!) und setzt die Nasenklemme auf, „Enter“ drücken für Programmstart.
5. *Spirogramm* anfertigen
6. *Resistancebestimmung*: „BTPS“ drücken, die Versuchsperson sollte tief und gleichmässig ein- und ausatmen, bei zufriedenstellender Resistanceschleife: nächstes Feld (s.o.) anklicken bis alle drei Felder gefüllt sind.
7. *TGV (Thorakales Gasvolumen)*: am Ende der Ausatemphase auf das TGV-Diagramm klicken, dann wird bei der folgenden Inspiration der Luftweg verschlossen (und öffnet sich wieder mit der Expiration), vorher die Versuchsperson anweisen, auch gegen den Widerstand möglichst normal weiterzuatmen.
8. *1-Sekunden-Kapazität (FEV1)*: maximal einatmen, kurz Luft anhalten, dann auf Kommando so tief wie möglich ausatmen, „Enter“ drücken für Programmende. Während dieser Messung wird der Peak-flow automatisch mitgemessen.
9. Programm „*Fluss/Volumen*“ starten, Luftballons anklicken, einige normale Atemzüge, dann maximal einatmen und so tief wie möglich schnell ausatmen.

10. Tür öffnen, Mundstück aus dem Mund nehmen und zur Seite drehen, Programm „CO₂-Diffusion“ anwählen, nach erneutem Druckabgleich Mundstück wieder in den Mund nehmen, Nasenklemme aufsetzen, „Enter“ drücken, während die Versuchsperson gleichmässig und tief ausatmet, Leertaste drücken, gemäss den Programmanweisungen anschliessend tief einatmen, die Luft anhalten und gleichmässig wieder tief ausatmen.
11. Programm *beenden*, alle Daten ausdrucken.

4 Auswertung

Die ermittelten Werte werden in die Tabelle eingetragen. Zum Vergleich sind in der Tabelle die für einen 25-jährigen Mann geltenden Normalwerte angegeben. Ferner: Vergleich der individuellen Werte mit den Referenzwerte aus den Nomogrammen.

			Einheit	Messwert	Referenz- werte
VOLUMINA	Atemzugvolumen	TK	ml		500
	Insp. Reservevolumen	IRV	ml		3,000
	Exsp. Reservevolumen	ERV	ml		1,200
	Residualvolumen	RV	ml		1300
KAPAZITÄTEN	Vitalkapazität	IVC	ml		4,700
	Forcierte Vitalkapazität	FVCex	ml		4,700
	Inspirationskapazität	IC	ml		3500
	Funkt. Residualkapazität (Thorakales Gasvolumen)	FRC (TGV)	ml		2,500
VENTILATIONS- GRÖSSEN	Atemstoßtest 1Sekunden Kapazität (Tiffeneau- Test)	FEV1 FEVex	%		75% der FVC
	Forciertes exsp. Volumen / sec	FEV1	l/min		4

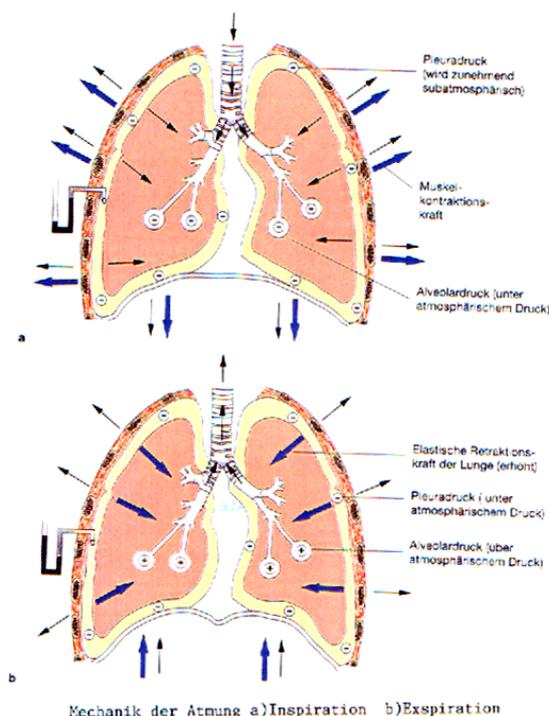
Tab. A-1

5. Lungenmodell-Transmurale Drucke im Lungensystem

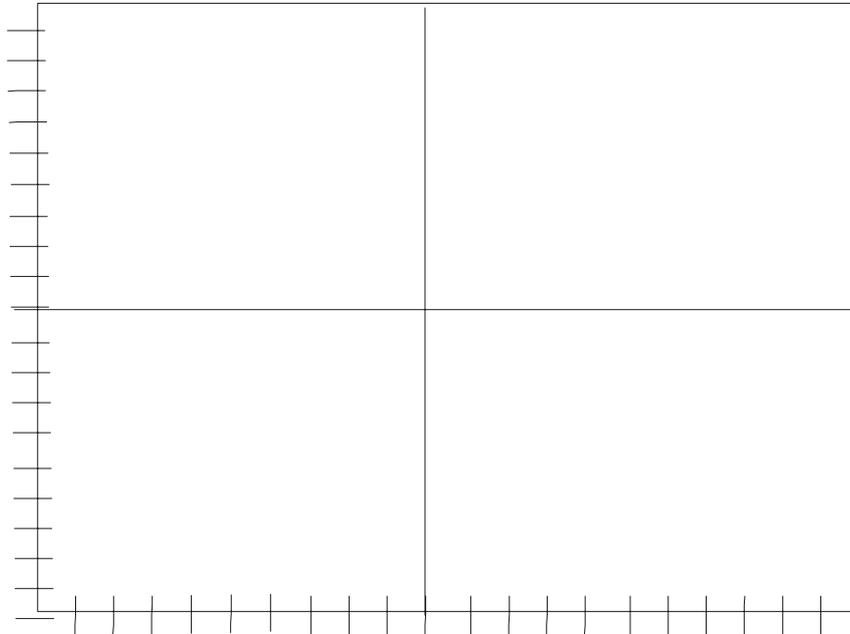
Mit dem mechanischen Lungenmodell lassen sich vereinfacht der pleurale und pulmonale Druck während der spontanen Inspiration/ Expiration und künstlichen Beatmung simulieren und messen. Ihre Aufgabe ist es die spontane Inspiration/ Expiration (2 Messungen) sowie die forcierte Inspiration/ Expiration (1 Messung) und die Beatmung an diesem Modell durchzuführen und die pulmonalen und pleuralen Drücke während dessen zu beobachten. Bitte führen Sie den Versuch nicht alleine durch, da das Modell etwas empfindlich ist!!! Der Tutor wird den Versuch mit Ihnen gemeinsam durchführen. Lesen Sie nach jeder einzelnen Messung das Volumen (ml), den pulmonalen und pleuralen Druck (in mmHg) am Modell ab.

Aufgaben:

1. Tragen Sie die von Ihnen ermittelten pulmonalen und pleuralen Druckwerte in die Tabelle Seite 20 ein.
2. Beschriften Sie das Diagramm und zeichnen Sie ihre ermittelten Werte in das Diagramm ein (Seite 20).
3. Erklären Sie die Begriffe: spontane Atmung, forcierte Inspiration/ Expiration und künstliche Beatmung?
4. Wie sieht die Ruhedehnungskurve des Atemapparates aus? Tragen Sie die Kurve in das Diagramm ein.
4. Was ist ein Pneumothorax ? Erklären Sie.



Spontane Atmung/ Beatmung



P_{pul} in mmH ₂ O	P_{pleu} in mmH ₂ O	V in ml

Spontane Atmung

Spontane Atmung

Forcierte Expiration

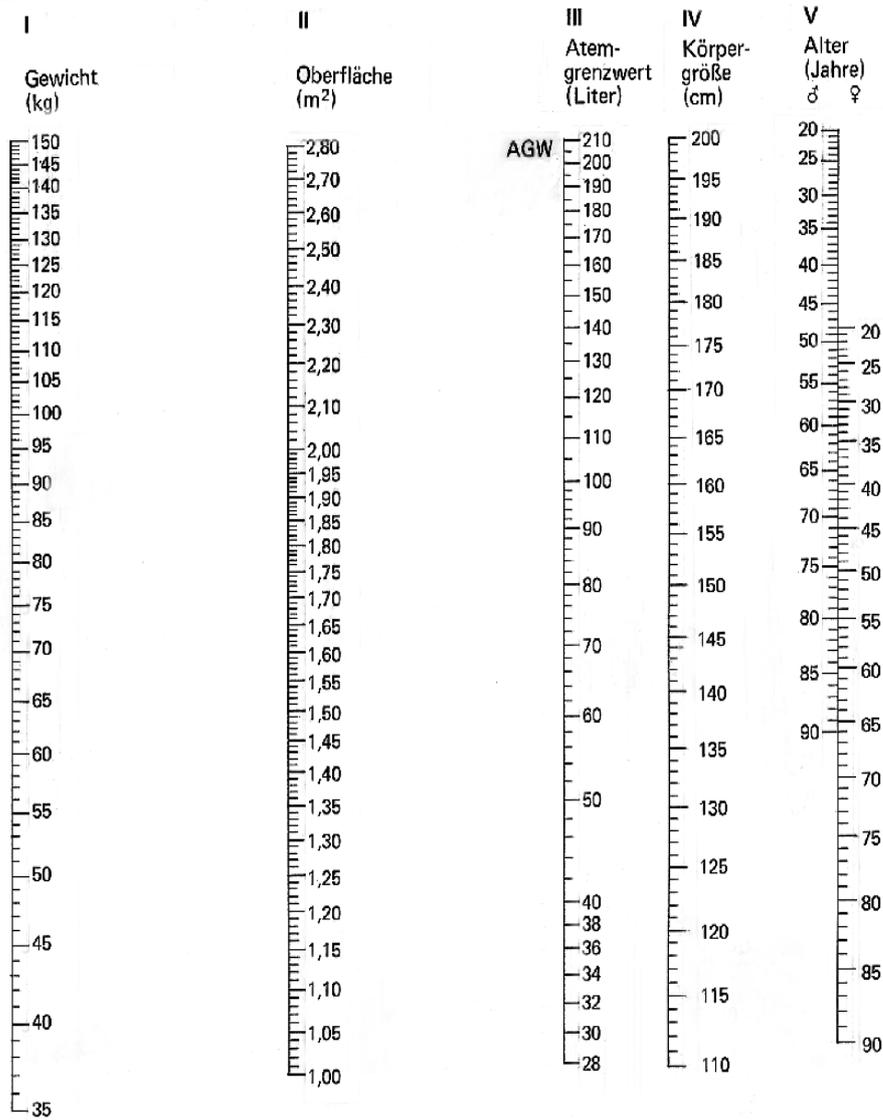
1. Messung künstliche Beatmung

2. Messung künstliche Beatmung

3. Messung künstliche Beatmung

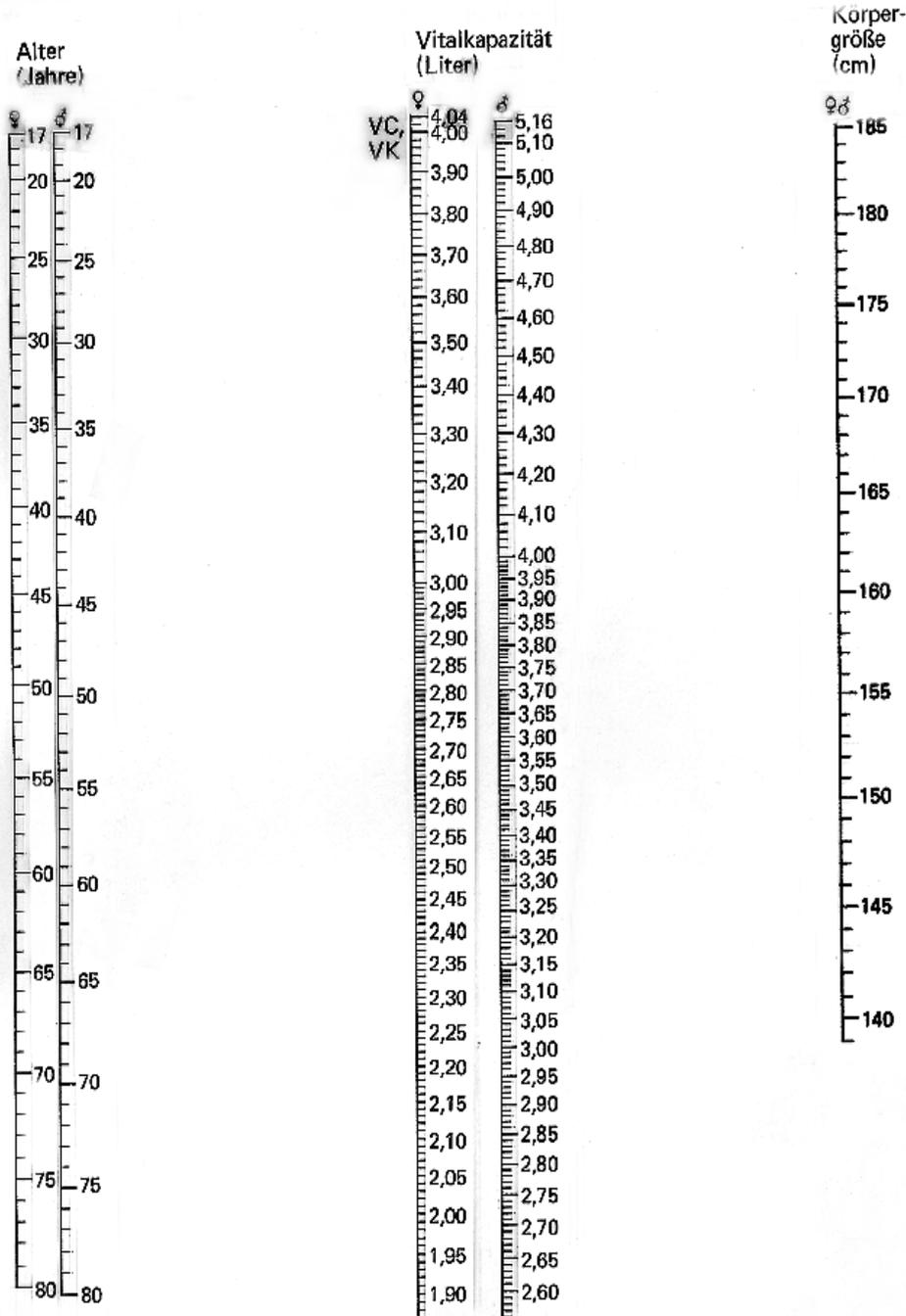
4. Messung künstliche Beatmung

Nomogramm zur Ermittlung des Sollatemgrenzwertes (AGW)



Man verbindet das Körpergewicht (Skala I) mit der Körpergröße (Skala IV) durch eine Gerade. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der Skala II ergibt die Oberfläche in m². Nun verbindet man die ermittelte Oberfläche mit dem Alter (Skala V) und liest auf Skala III den Sollatemgrenzwert ab.

Nomogramm zur Ermittlung der Sollvitalkapazität (VC)



Man verbindet Alter und Körpergröße mit einer Geraden. Der Schnittpunkt dieser Geraden mit der mittleren Skala ergibt die Vitalkapazität in Liter.

6 Fragen zur Auswertung

- Wofür ist die Vitalkapazität ein indirektes Maß und wann ist sie verändert?
- Wofür sind 1-Sekunden-Kapazität/ Peak-Flow-Messung ein indirektes Maß und wann sind sie verändert?
- Warum sind Lungenfunktionstests sinnvoll?
- Bei welchen Ventilationsstörungen sind Compliance/ Funktionelle Residualkapazität/ Resistance/ Diffusionskapazität pathologisch verändert?
- Sind solche Erkrankungen häufig, was sind langfristige klinische Folgen (Fragen in der Gruppe z.B. nach Asthma)?
- Welche langfristigen klinischen Gefahren bestehen (z.B. bei chronischer Hyperkapnie Ausfall des Atemantriebes „Hyperkapnie“, deshalb Hypoxie alleiniger Atemantrieb)?
- Welche Lungenerkrankungen lassen sich mit Lungenfunktionstests nicht diagnostizieren?

(B) Atemantriebe

1 Theoretische Grundlagen

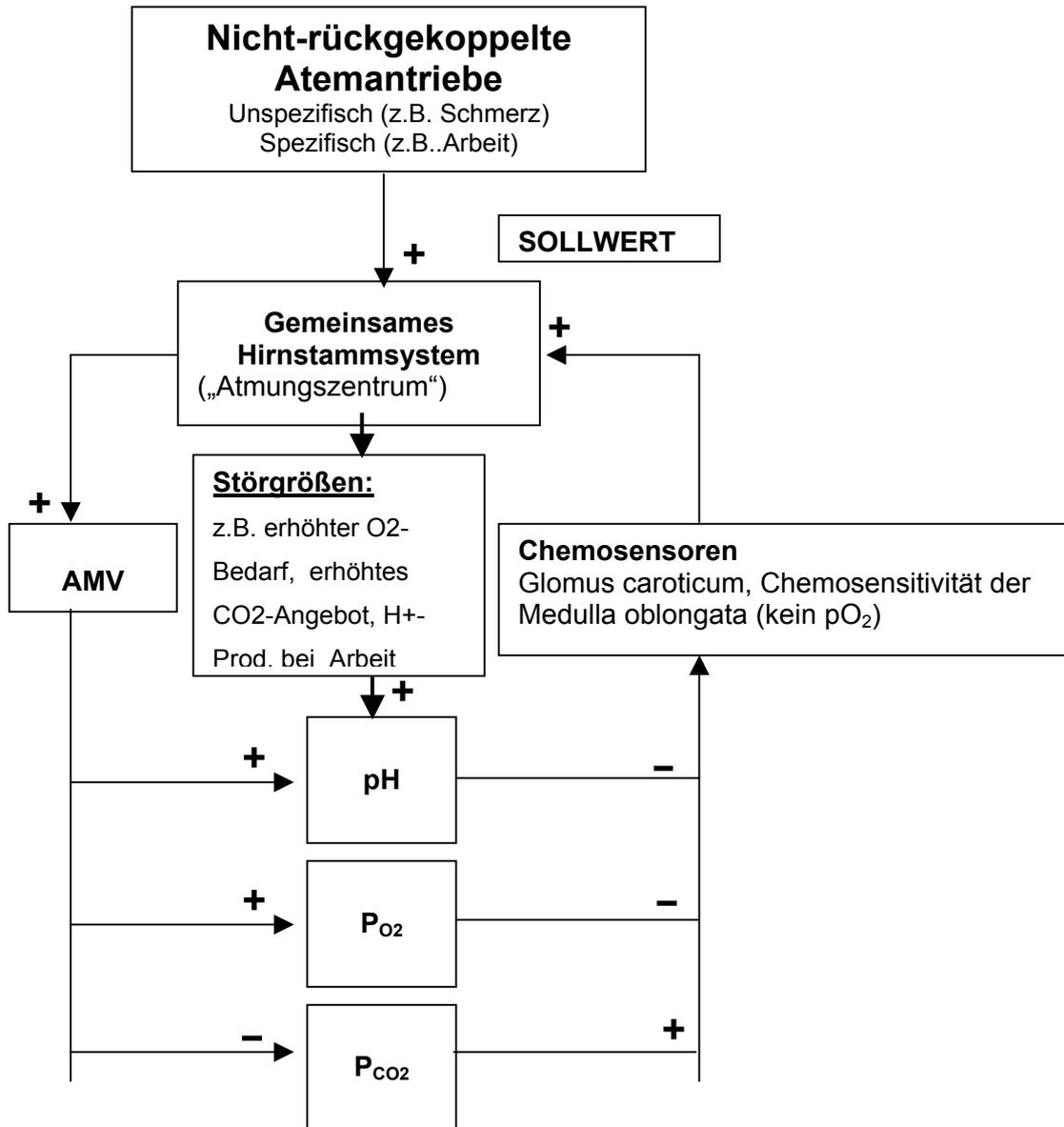
1.1 Atemantriebe und Atemregulation

Atemantriebe sollten unter dem Überbegriff der Atemregulation betrachtet werden. Darunter versteht man die Anpassung der Lungenbelüftung an die Bedürfnisse des Organismus. Respiratorische Neurone in der Medulla oblongata (Hirnstamm) bilden zwar einen autonomen rhythmischen Antrieb, werden aber durch eine Reihe von Afferenzen reguliert.

Diese Regulation basiert auf kontinuierliche Messung der arteriellen Partialdrücke für O_2 und CO_2 und der Wasserstoffionenkonzentration (bzw. der pH-Wert) in den **Chemosensoren**. Die peripheren Chemosensoren liegen am Aortenbogen (glomus aorticum [glomus=Knäul]) und an der Aufzweigung der linken und rechten A. carotis communis (glomus caroticum). Die zentrale Chemosensibilität ist in der Medulla oblongata (zentrale Chemosensoren) lokalisiert. Nur die peripheren Chemosensoren messen Änderungen des P_{O_2} . Über die Chemosensoren werden auf nervalem Wege Informationen an **respiratorische, rhythmisch tätige Neurone** in der medulla oblongata vermittelt und in adäquate Änderungen der Atemmechanik umgesetzt (Variation der Atemtiefe und Frequenz). Die Kontrolle der Regelgrößen P_{CO_2} , P_{O_2} und $[H^+]$ im Rahmen der Atemregulation ist in der Abbildung dargestellt. Da diese Größen über die Anpassung der Ventilation auf sich selber zurückwirken, werden sie als „rückgekoppelte“ **Atemantriebe** bezeichnet. Die Werte der Blutgase (P_{CO_2} oder P_{O_2} sowie pH-Wert) werden von den Chemosensoren ständig gemessen (Istwerte). Diese werden in

den atemungsregulatorischen Regionen des Hirnstammes mit den Sollwerten verglichen. Abweichungen von Ist- und Sollwerten werden über die Aktivität der Atemmuskeln und damit der Ventilation korrigiert („plus“ an den Pfeilen bedeutet gleichsinnige Änderung, das „minus“ bedeutet gegensinnige Änderung).

Beispiel: steigt P_{CO_2} , so steigt das Atemminutenvolumen (plus) und P_{CO_2} fällt wieder ab.



Rückgekoppelte, regulierte Atemantriebe

Bei „**nicht-rückgekoppelten**“ **Atemantrieben** wird zwar durch den entsprechenden Reiz die Atmung angetrieben, der Reiz dadurch aber nicht beseitigt. Beispiel: Schmerz als nicht-rückgekoppelter Atemantrieb: er steigert die Ventilation, der Schmerz wird dadurch aber nicht geringer! Andere nicht-rückgekoppelte Atemantriebe sind: allgemeine Aktivität, Temperatur, verschiedene Hormone, z.B. Progesteron.

Von größter Bedeutung ist der nicht rückgekoppelte Atemantrieb durch körperliche Aktivität. Bei Arbeit ändern sich P_{O_2} und P_{CO_2} nicht erheblich und der pH-Abfall kann den beobachteten Anstieg der Ventilation nicht erklären (bis zum 20-fachen der Ruheventilation). Es wird angenommen, daß bei efferenter Aktivierung der Skelettmuskulatur eine parallele Aktivierung des Atemzentrums (Mitinnervation) erfolgt. Diese Mitinnervation erzeugt eine an den erhöhten O_2/CO_2 gut angepasste **Mehrventilation** ohne Rückkopplung („feed-back“), d.h. als Steuerung („feed-forward“).

2 Versuchsbeschreibung

Wozu dienen diese Versuche?

In diesem Versuch soll der Einfluß der „**rückgekoppelten**“ **Atemantriebe** P_{CO_2} und P_{O_2} auf das Atemminutenvolumen untersucht werden. Dabei steht der Vergleich der beiden Atemantriebe in Bezug auf Stärke und subjektives Empfinden im Vordergrund.

Welche Größen werden in diesem Versuch bestimmt?

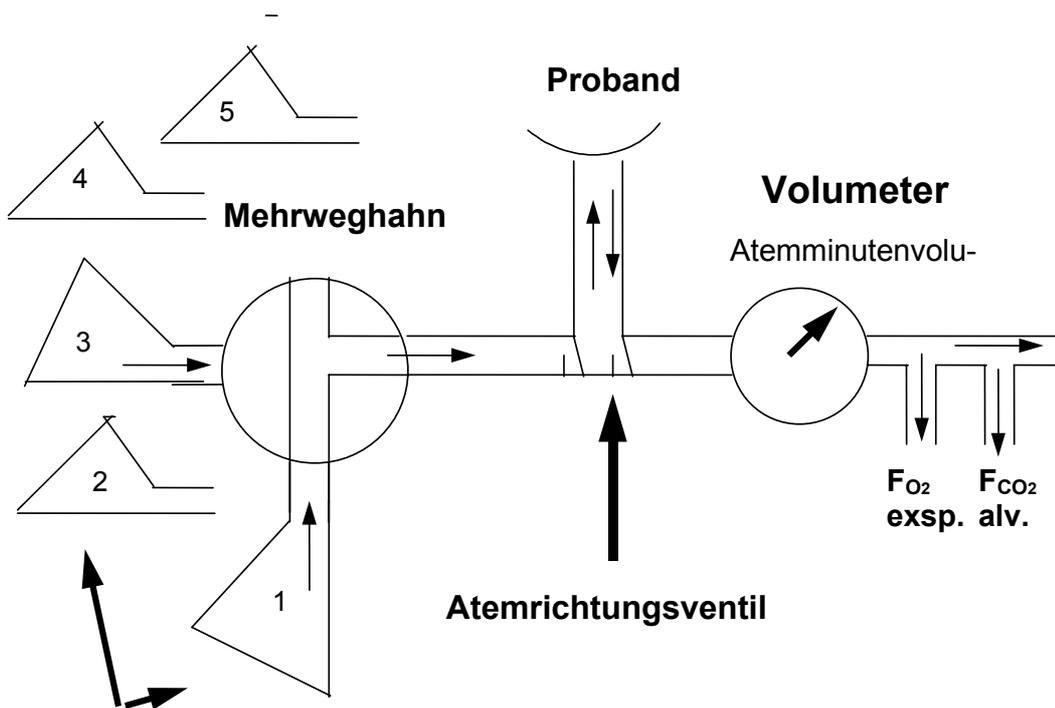
- Ventilation (AMV)
- FI_{O_2} und FI_{CO_2}
- FIO_2 (Vol%), $FICO_2$ (Vol%)
- AMV (l/min) (BTPS)
- FE et O_2 (Vol%), FE et CO_2 (Vol%)
- FEO_2 (Vol%), $FECO_2$ (Vol%)].
- Herzfrequenz
- Blutdruck

Prüfung des Einflusses von P_{CO_2} auf das Atemminutenvolumen

Versuchsaufbau und Prinzip



Die Versuchsperson atmet über eine Maske aus einem sog. Douglassack verschiedene Gasgemische aus CO_2 und Sauerstoff ein und über das Atemrichtungsventil aus. In der Expiration werden die Messgrößen bestimmt.



Douglassäcke 1- 5

Um den Einfluß eines steigenden P_{CO_2} auf das AMV zu bestimmen, werden in 5 Stufen steigende CO_2 -Fraktionen zur Inspiration angeboten. Dies geschieht durch Wechsel der Douglassäcke, die vor der Untersuchung mit verschiedenen CO_2 -Fraktionen gefüllt wurden. Die **Gasgemische für den CO_2 -Versuch** enthalten **0% (Raumluft), 2,8%, 4,5%, 5% und 8% CO_2** der Rest ist Sauerstoff **das Gasgemisch für den O_2 -Versuch** hat **21%, 11%, 9% O_2** .

3 Bedienung der Software

Um den Test ordnungsgemäß durchführen zu können, muß die Versuchsperson zuerst in die Datenbank eingetragen werden.

Hierzu öffnen sie bitte im Menü **Messung** den Button **Probanden auswählen** und drücken. Anschließend drücken Sie dann bitte die Taste **neu** zur Erstellung eines neuen Probanden Datenblatts. Bitte tragen Sie in alle * markierten Felder ihre Daten ein. Beenden Sie die Eintragungen mit **Schließen!**



Um eine Ergospirometrie-Messung durchführen zu können klicken Sie bitte im **Menü Messung** auf den Button **Ergospirometrie**. Es erscheint eine Bildschirmanzeige mit folgenden Report-einstellungen: **Atemvolumen/ Zeit; Ventilation (AMV); Einkanalinfo für FI O₂ und FI CO₂; Meßdaten [AMV (BTPS) (l/min), FE et O₂ (Vol%), FE et CO₂ (Vol%), FIO₂ (Vol%), FICO₂ (Vol%), FEO₂ (Vol%), FECO₂ (Vol%)].**

Um zur eigentlichen Messung zu gelangen, muß vorerst eine **Umgebungsluftmessung** durchgeführt werden. Dazu klicken Sie bitte auf den **grünen Pfeil** („Messung starten“) in der oberen Bedienungsleiste! Es erscheint ein neues Fenster: **Umgebungsluftmessung**. Um eine korrekte Umgebungsluftmessung durchzuführen, entfernen Sie bitte den Sensor aus der Atemmaske und legen ihn möglichst ruhig und „unbeatmet“ auf den Tisch (Dauer der Messung ca. 1-2 min). Sofort nach schließen des Fensters (Umgebungsluftmessung) beginnt die eigentliche Messung. Es wäre gut wenn der Proband die Maske mit dem Rudolf-Ventil (ohne Sensor!!!) während der Umgebungsluftmessung bereits aufsetzt (Bitte lassen Sie sich von den Tutoren helfen!). Nach Abschluß der **Umgebungsluftmessung** wird der **Sensor** in das **Rudolfventil** gesteckt. Nach schließen des **Fensters „Umgebungsluftmessung“** beginnt die eigentliche Ergospirometriemessung.

Die obere Bedienleiste enthält folgende Bedienelemente (von links nach rechts):

- Umgebungsluftmessung** (Ventilatorzeichen)
- Testmessung durchführen
- Messung starten** (grüner Pfeil: Messung wird durchgeführt)
- Messung stoppen** (rote Taste: Messung wird beendet)
- Messung unterbrechen** (Messung geht weiter beim zweiten Mal drücken)
- Marker** (Marker setzen)

- Marker mit Kommentar** (Kommentar zur markierten Messung hinzufüßbar)
- Messung mit akustischer Botschaft
- Drucken eines Reports
- zur Auswertung umschalten** (erstellt die Auswertung in einem neuem Datenblatt)
- Darstellungstyp (Autoskalierung)
- Fenster schließen** (löschen von überflüssigen Datenblättern)

Nach Abschluß der Messung können Sie entweder auf die Taste „**zur Auswertung umschalten**“ oder direkt im Hauptmenü „**Auswertung**“ auswählen und den „**Test hineinladen**“ (siehe obere Bedienleiste). Persönliche Auswertungsdatenblätter lassen sich aufrufen, indem Sie im Programm auf **Reports** gehen und dort unter **Nutzerdefiniert: CO₂-Response** aufrufen. Allgemein lassen sich die Daten wie folgt zusammenfassen. Klicken Sie auf das Programm **Reports** und wählen Sie dort bitte **Zusammenfassung**. Der Report läßt sich auch ausdrucken!

Prüfung des Einflusses von P_{O₂} und P_{CO₂} auf das Atemminutenvolumen

Versuchsaufbau und Prinzip

Die Versuchsperson atmet über eine Maske aus einem sog. Douglassack verschiedene Gasmische aus Sauerstoff und Stickstoff ein und über das Atemrichtungsventil aus.

Versuchsdurchführung

Eine Versuchsperson atmet das Gasmisch aus den Beuteln. Dabei schreibt der Proband Zahlen von 1000 an rückwärts zählend auf. Dabei dient das Aufschreiben der Zahlen als Maß für die Konzentrationsfähigkeit und die motorische Kontrollfähigkeit.

Folgende Aufgaben werden unter dem Rest der Gruppe aufgeteilt:

- Puls messen
- Blutdruck messen
- Zeit ansagen/Messungen koordinieren („Koordinator“)
- Säcke mit Gasmisch füllen und bei Kommando durch den Koordinator umstecken
- Ergebnisse in einer Tabelle auf der Tafel für alle sichtbar notieren
- Beobachtung der Versuchsperson (Änderung des Hautkolorits? / Schwächezeichen?)

Die wichtigste Person ist der Koordinator: Er achtet auf die Zeit und gibt das Kommando zum austauschen der Säcke. Die freiwillige Versuchsperson:

- setzt sich auf den für sie bestimmten Stuhl,
- legt Papier und Stift griffbereit,
- lässt sich die Maske vom Tutor aufsetzen,
- nach drei Minuten Raumlufte wird das erste Gasgemisch eingestellt, Beginn des Zahlenschreibens
- nach jeweils weiteren 3 Minuten wird auf das nächste Gasgemisch umgestellt.

Die anderen Versuchsteilnehmer beobachten die Versuchsperson. Für ein zufriedenstellendes Ergebnis ist es von Bedeutung, daß während dem Versuch Ruhe im Raum ist. Nach dem letzten Gasgemisch oder falls der Versuch vorzeitig beendet werden muß, erfolgt die Auswertung.

Beobachtung:

Bei fallendem P_{O_2} im arterialisierten Blut liegt das Hämoglobin zunehmend im desoxygenierten Zustand vor. Es verschiebt dann seine spektrale Reflektanz vom Rot- in den Blau-Bereich. Übersteigt die Konzentration an desoxygeniertes Hämoglobin von 50 g/Liter Blut, erscheinen die Schleimhäute und die Haut bläulich (= Zyanose). Zyanosen werden bei Patienten mit Herz- und Lungenerkrankungen beobachtet. Die Zyanose ist im Praktikum besonders eindrucksvoll, da sie nach Versuchsende, bei Raumluftezufuhr, durch 1-2 Atemzüge wieder verschwindet. Man hat also die Möglichkeit, dieselbe VP innerhalb weniger Augenblicke mit und ohne Zyanose zu sehen.

4 Auswertung

Bericht der Versuchsperson zu Empfinden und Konzentrationsfähigkeit während des Versuchsverlaufs. Unterscheidet sich die subjektiv empfundene von der objektiv feststellbaren Leistungsfähigkeit des ZNS (Schrift, Korrektur der Zahlen)?

	Subjektives Empfinden	Objektive Reaktion
P_{O_2}		
P_{CO_2}		

Anschließend werden die Meßergebnisse vom Bildschirm in die Skripte eingetragen und eine „Atemantwortkurve“ erstellt: Die Korrelation zwischen P_{O_2} und AMV sowie zwischen P_{CO_2} und AMV wird in das Diagramm eingetragen. Die Skaleneinteilung soll selbständig gewählt werden. Ausserdem sind die gemessenen O_2 (CO_2) -Fraktionen in O_2 (CO_2) Partialdrucke umzurechnen. ($P_{O_2} = F_{O_2} \cdot \text{Barometerdruck}$).

Beispiel: F_{O_2} gemessen = 0,21 ; also $P_{O_2} = 0,21 \cdot 760 \text{ mm Hg} = 160 \text{ mmHg}$.

Achtung! Messung wird unter BTPS Bedingungen durchgeführt: Der Wasserdampfdruck in den Alveolen bei 37°C (P_{CO_2} 47 mmHg) ist bei der Rechnung noch zu berücksichtigen.

Praktisches Beispiel für den Einfluss von P_{O_2} auf das Atemminutenvolumen

Der P_{O_2} -Versuch simuliert einen akuten Höhenanstieg. Mit zunehmender Höhe nimmt der Luftdruck exponentiell ab:

$$P_{\text{Barometer (in der Höhe)}} = P_{\text{Barometer (Meereshöhe)}} \cdot e^{(-0.127 \cdot \text{Höhe [km]})}$$

Beispiel: Der Barometerdruck in 3000 m Höhe beträgt 519 mmHg. Da sich die Sauerstoff-Fraktion bis in große Höhen nicht ändert, beträgt der P_{O_2} in 3000 m Höhe in der Inspirationsluft 110 mm Hg, dies entspricht einem alveolären P_{O_2} von ca. 72 mm Hg.

Beispiel für den Einfluss von P_{CO_2} auf das Atemminutenvolumen

Unter physiologischen Bedingungen ergibt sich ein Anstieg von P_{aCO_2} beim sog. Apnoetauchen: Die CO_2 -Produktion geht weiter, ein Abatmung von CO_2 kann nicht erfolgen, P_{aCO_2} steigt und wird letztlich zum entscheidenden Reiz, der zum Auftauchen zwingt.

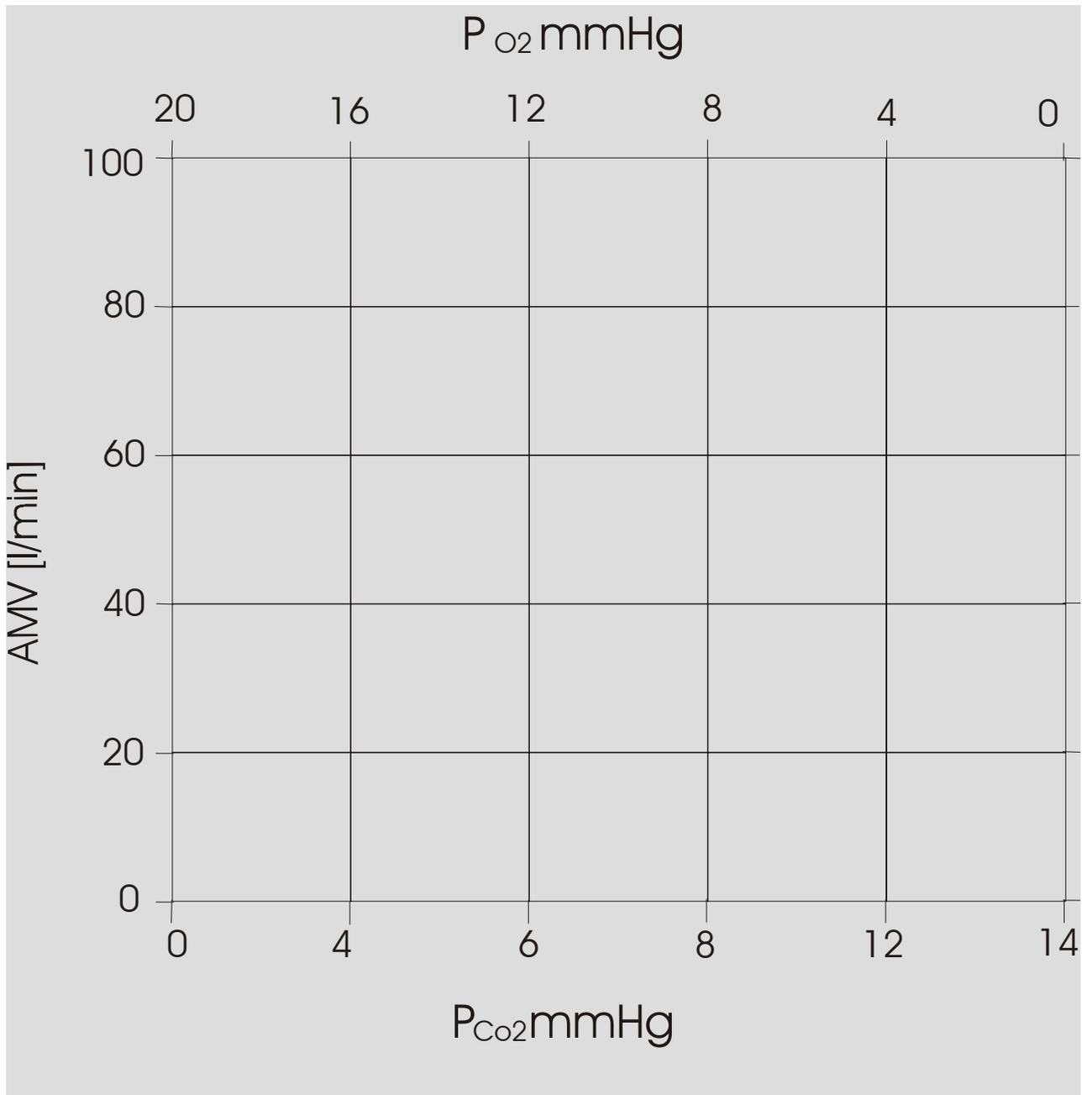
5 Fragen zur Auswertung

- Beschreibe die Aussagen der erstellten Kurven in eigenen Worten!
- Entsprechen die Kurven euren Erwartungen?
- Entsprechen die Kurven denen der gängigen Lehrbücher?
- Was ist der stärkere Atemantrieb?
- Was ist gefährlicher?
- Was ist unangenehmer (für die Versuchsperson)?

FI_{O2}	Fe_{O2}	P_{O2}	AMV	HF	BD
Vol%	Vol%	mmHg	l/min	min-1	mmHg
<p>Tab. 1: O₂-Versuch: FI_{O2} und Fe_{O2}: inspiratorische bzw. expiratorische O₂-Fraktion; P_{O2} Partialdruck ausrechnen, O₂-Fraktion abzulesen; AMV: Atemminutenvolumen abzulesen; : Herzfrequenz m Puls messen; BD: Blutdruck mit der Blutdruckmanschette messen</p>					

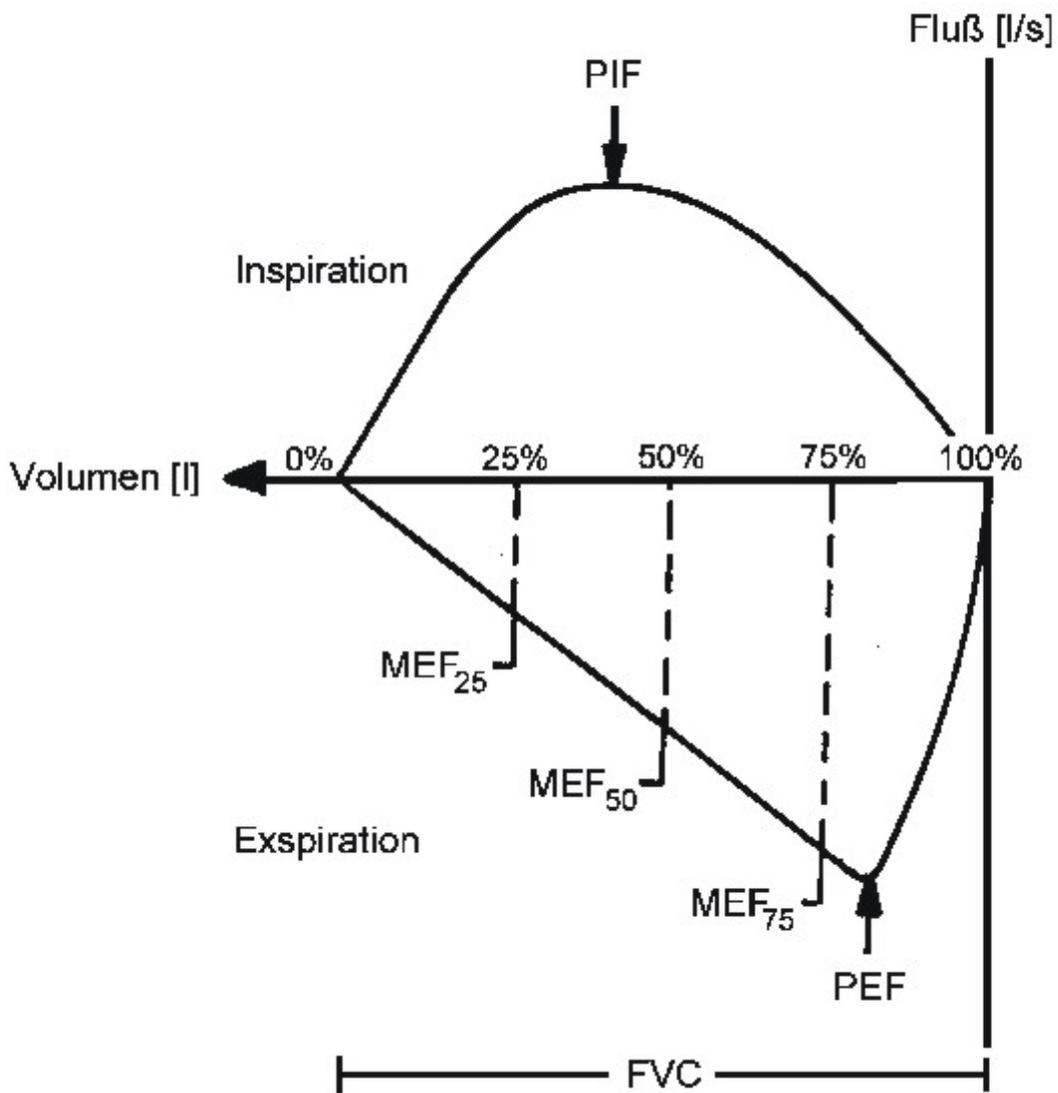
FI_{CO_2}	FE_{CO_2}	P_{CO_2}	AMV	HF	BD
Vol%	Vol%	mmHg	l/min	min ⁻¹	mmHg

Tab. 2: CO₂-Versuch: FI_{O_2} und FE_{CO_2} : inspiratorische bzw. expiratorische O₂-Fraktion, P_{CO_2} Partialdruck, **AMV**: Atemminutenvolumen abzulesen; : Herzfrequenz am Puls messen; **BD**: Blutdruck mit der Blutdruckmanschette messen

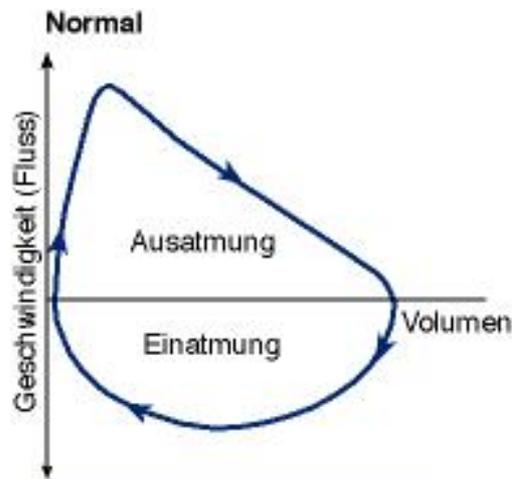


ANHANG

Interpretation ventilatorischer Verteilungsstörungen: Fluss-Volumenkurven

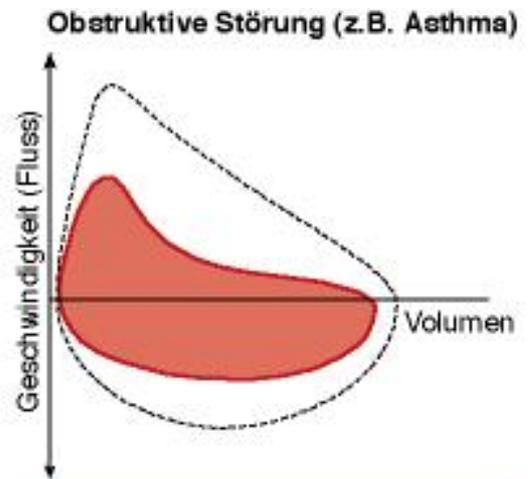


Überprüfung restriktiver und obstruktiver Lungenfunktionsstörungen



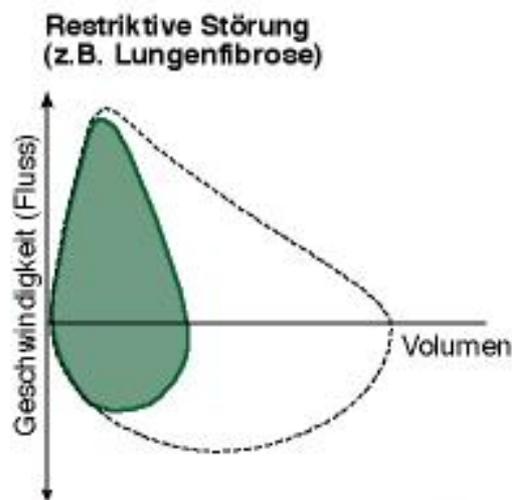
Kurve geht hoch nach oben:
Die Luft geht schnell raus.

Kurve geht weit nach rechts:
Es geht viel Luft raus.



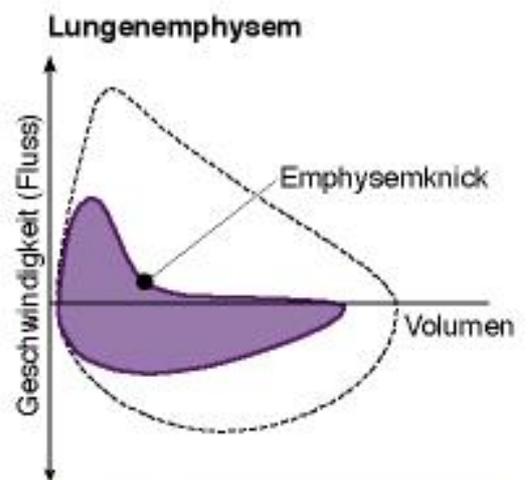
Kurve geht nicht so hoch:
Die Luft geht nicht so schnell raus.

Kurve geht weit nach rechts:
Es geht viel Luft raus, aber es dauert länger.



Kurve geht hoch nach oben:
Die Luft geht schnell raus.

Kurve geht wenig nach rechts:
Es geht wenig Luft raus, weil auch nur wenig rein geht.



Kurve geht erst nach oben:
Die Luft geht anfangs ziemlich schnell raus.

Dann geht die Kurve nach unten:
Die Luft geht langsamer raus, weil die Atemwege zusammenklappen (Emphysemknick).