



Skript zum eLearning-Praktikum „Atemvolumina und -kapazitäten“

UNIVERSITÄT LEIPZIG
MEDIZINISCHE FAKULTÄT
CARL-LUDWIG-INSTITUT FÜR PHYSIOLOGIE

VERSION 2020

Stichwörter: *Gasgesetze für ideales Gas, Definition Partialdruck, Lungenvolumina und -kapazitäten, Alveolardruck (intrapulmonaler Druck), Pleuradruck (intrathorakaler Druck), statisches und dynamisches Druck-Volumen-Diagramm der Lunge und des Thorax-Lungen-Systems, Compliance, Resistance, Diffusionskapazität der Lunge*

Lernziele:

Nach der Vorbereitung und Durchführung des Praktikumsversuchs sind Sie in der Lage:

- die physiologisch relevanten Lungenvolumina und -kapazitäten zu nennen und ihre Messung sowie ihre Aussagekraft für die Diagnostik von Ventilationsstörungen zu erläutern,
- die Fluss-Volumen-Kurve und ihre diagnostische Bedeutung zu erklären,
- den Atemwegswiderstand (Resistance) und seine diagnostische Bedeutung zu erklären,
- die Diffusionskapazität zu definieren und ihre diagnostische Bedeutung zu erklären.

Unter folgendem Link finden Sie Videos und Materialien zu den Versuchen. Als Login/Passwort nutzen Sie die ebenfalls für das KIS (klinikintegrierendes Seminar) gültigen Angaben. Diese erhalten Sie im Seminar bzw. in der Vorlesung.

http://physiologie.medizin.uni-leipzig.de/e_learning/Atemvolumina/index.php

Allgemeine Hinweise zum eLearning-Skript

Liebe Studierende,

aufgrund der nach wie vor bestehenden Einschränkungen findet das Physiologie-Praktikum nicht als Präsenzveranstaltung sondern in elektronischer Form statt. Die elektronischen Praktika sind Pflichttermine, deren regelmäßige Teilnahme anhand der abzugebenden Protokolle überprüft wird.

Dokumentieren Sie die Ergebnisse Ihrer Auswertungen im Teil „Protokoll“ des eLearning-Skripts, drucken diesen Teil aus und geben ihn im Briefkasten „Protokolle Physiologie“ ab.

Ab dem Montag der Woche, in der Sie für das Praktikum eingeteilt sind, arbeiten Sie das Skript, das u.a. auf Lehrfilmen basiert, durch. Bis Freitag der jeweiligen Woche geben Sie das Protokoll mit Ihren Auswertungen im Briefkasten „Protokolle Physiologie“ ab. Alternativ können Sie das Protokoll als PDF-Datei per Email an den betreffenden Praktikumsleiter (*eingeteilte Praktika bis 8.12. / **eingeteilte Praktika ab 9.12.) bis Freitag der jeweiligen Woche senden.

Alle auftretenden Fragen senden Sie per Email an uns. Wir werden die Fragen zeitnah beantworten und ausführliche Antworten zusammen mit den Musterergebnissen in einem „Lösungsskript“ ab 18. Dezember 2020 auf der Praktikums-Webseite veröffentlichen.

Leipzig, den 26.11.2020

PD Dr. Robert Kraft*
robert.kraft@medizin.uni-leipzig.de

Dr. Ulrike Winkler**
ulrike.winkler@medizin.uni-leipzig.de

Einführung

Das Gesamtfassungsvermögen beider Lungen (Totalkapazität, TLC) beträgt in Abhängigkeit von Körpermaßen, Alter, Geschlecht und Trainingszustand zwischen 4 und 7 l (ca. 6 l für einen 22-jährigen Mann von 1,70 m Körpergröße und 70 kg Körpermasse). Bei ruhiger Atmung wird nur ein kleiner Teil dieser Luft (Atemhub- bzw. Atemzugvolumen, engl. tidal volume, $V_T = \sim 0,5$ l) ventilert. Für eine Vertiefung der Atmung stehen sowohl ein inspiratorisches ($IRV = \sim 3$ l) als auch ein expiratorisches Reservevolumen ($ERV = \sim 1,2$ l) zur Verfügung. Das durch Atembewegungen maximal ventilierbare Volumen heißt Vitalkapazität ($VC = IRV + V_T + ERV$) und beträgt im Mittel 4,5 bis 5 l. Ein kleiner Teil der in den Alveolen befindlichen Luft lässt sich nicht ventilieren (Residualvolumen, RV) (vgl. Abb.1). Funktionsstörungen des Atemapparats (Atemwege, Lunge, Thorax) führen zu charakteristischen Veränderungen der spirometrisch erfassbaren Parameter. Somit ist die Spirometrie ein Basisverfahren zur Diagnostik obstruktiver (Verengung der Atemwege) und restriktiver (Einschränkung der Lungendehnung (Compliance)) Ventilationsstörungen.

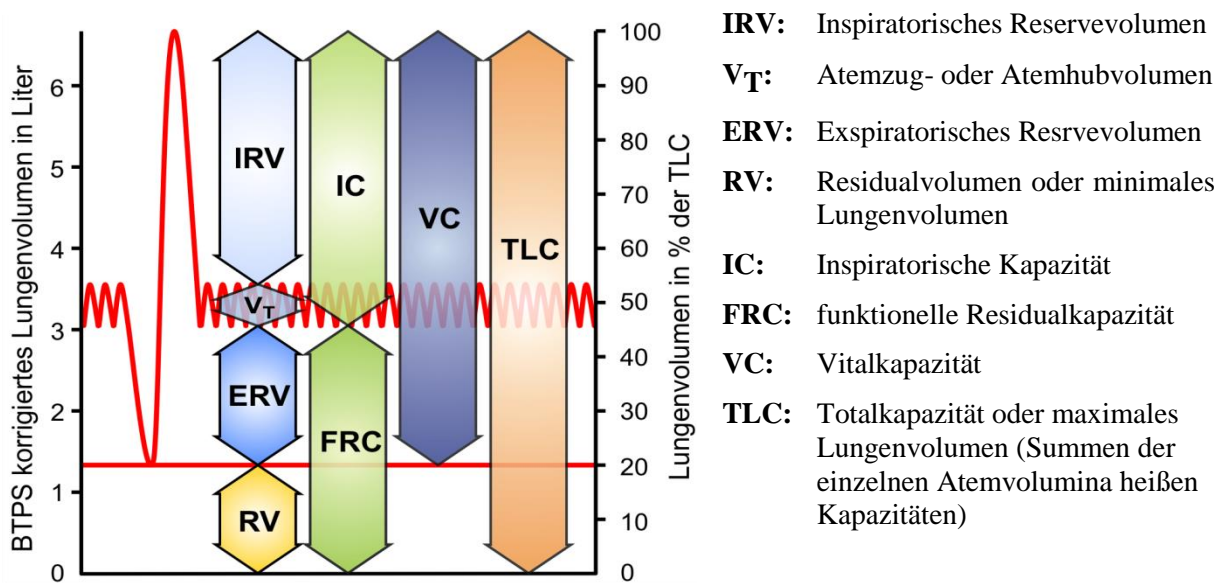


Abbildung 1: Wichtige Lungenfunktionsparameter

1 Messung von Atemvolumina und –kapazitäten am Glockenspirometer

Das verwendete Spirometer besteht aus einem äquilibrierten Zylinder (Spirometerglocke), dessen offener Boden in ein Wasserbad eintaucht (Abb. 2). Ein in die Glocke geblasenes Gasvolumen hebt diese, Gasentnahme lässt sie absinken (geschlossenes System). Eine seitliche Führung verhindert ihr Kippen. Die Strecken vertikaler Glockenbewegungen sind somit Volumenänderungen ihres Gasinhaltes proportional. Im Video „*Funktionsweise*“ wird Ihnen das im Praktikum verwendete Gerät vorgestellt.

In den nachfolgenden Untersuchungen werden folgende Parameter bei der sitzenden Versuchsperson (V_p) gemessen:

- Expiratorisches Reservevolumen (**ERV**)
- Inspiratorisches Reservevolumen (**IRV**)
- Maximales Atemzugvolumen = Vitalkapazität (**VC**)
- Ein-Sekundenkapazität (**FEV1**)

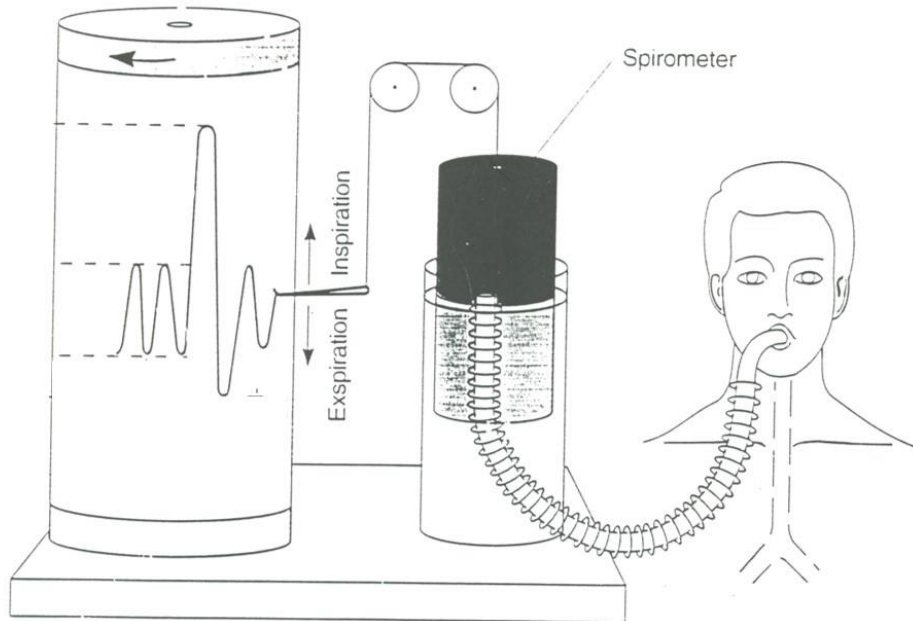


Abbildung 2: Prinzip der Spirometrie am geschlossenen System mittels Glockenspirometer. In der vereinfachten Abbildung fehlt die Nasenklammer.

1.1 Messung unter Normalbedingungen

1.1.1 Expiratorisches Reservevolumen (Video: „Glockenspirometer / ERV“)

Die Spirometerglocke ist zu etwa 1/3 mit Luft gefüllt. Nach Anschluss der Vp an die Spirometerglocke erfolgt die Aufforderung zu normaler (nicht vertiefter) Ruheatmung.

Nach einigen Ruheatemzügen wird das Kommando zu einmaliger maximaler Expiration (zusätzlich zur spontanen Ruheexpiration) gegeben. Der Versuch wird 3-mal durchgeführt. Die Aufzeichnung der Atembewegungen sind im PDF-Dokument „**Kurven Glockenspirometer**“ auf Seite 1 abgelegt. Atemvolumina entsprechen Auslenkungen in vertikale Richtung, wobei gilt:

$$1 \text{ cm (vertikal)} = 0,3 \text{ l}$$

1.1.2 Inspiratorisches Reservevolumen (Video: „Glockenspirometer / IRV“)

Die Spirometerglocke ist zu etwa 2/3 mit Luft gefüllt. Analoger Verlauf wie bei Bestimmung des expiratorischen Reservevolumens. Der auf Kommando zu vollziehende Testatemzug besteht aus einer maximalen Inspiration (zusätzlich zur spontanen Ruheinspiration). Der Versuch wird 3-mal durchgeführt und ist auf Seite 2 des PDF-Dokuments „**Kurven Glockenspirometer**“ abgelegt.

1.1.3 Maximales Atemzugvolumen, Vitalkapazität (Video: „Glockenspirometer / VC“)

- a) **Expiratorische Messung (VC_E):** Spirometerglocke völlig entleeren. Die Vp atmet nach einer maximalen Inspiration von Raumluft maximal in das Spirometer aus.
- b) **Inspiratorische Messung (VC_I):** Spirometerglocke vollständig mit Luft füllen. Die Vp atmet nach einer maximalen Expiration in den Raum maximal aus dem Spirometer ein.

Die Versuche werden jeweils 3-mal durchgeführt und sind auf den Seiten 3-5 des PDF-Dokuments „**Kurven Glockenspirometer**“ abgelegt. Es werden getrennte Mittelwerte für VC_E und VC_I gebildet. Der **höhere** Wert von beiden wird als Vitalkapazität (VC) angegeben.

Eine Angabe eines „Normalwertes“ für die Vitalkapazität ist kaum möglich; dieser ist abhängig von Geschlecht, Alter, Körpergröße, Körperposition und Trainingszustand. Eine Annäherung stellt folgende Sollwertformel dar:

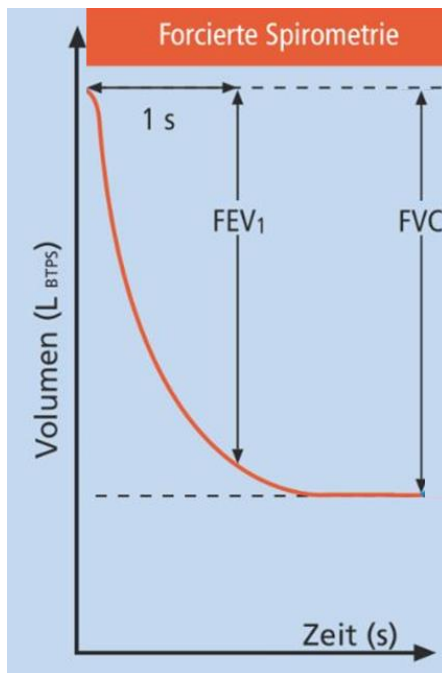
Sollwertformel für Männer $6,103 \times \text{Körpergröße (in m)} - 0,028 \times \text{Alter (in Jahren)} - 4,654$

Sollwertformel für Frauen $4,664 \times \text{Körpergröße (in m)} - 0,024 \times \text{Alter (in Jahren)} - 3,284$

(Literatur: Schmidt, RF, Lang F, Heckmann, M: Physiologie des Menschen: Mit Pathophysiologie. Springer-Verlag, 2011. Tab. 32.1)

1.1.4 Messung der 1-s-Kapazität (Video: „Glockenspirometer / FEV1“)

Bei diesem Versuch, auch als Tiffeneau- oder Atemstoßtest bezeichnet, wird der Anteil der Vitalkapazität bestimmt, der bei maximaler Anstrengung ("forcierte Expiration") während der 1. expiratorischen Sekunde ausgeatmet werden kann. Das Messergebnis wird als Volumenbetrag (absolute Sekundenkapazität $FEV1_{abs}$) und als prozentualer Anteil der Vitalkapazität (= relative Sekundenkapazität $FEV1_{rel}$) angegeben. Der Test dient zur Feststellung von erhöhten Atmungswiderständen (obstruktive Ventilationsstörungen).



Zunächst wird maximal Raumluft eingeatmet, der Atem angehalten und das Mundstück in den Mund genommen. Auf ein Kommando hin, z.B. „Kräftig ausatmen!“, wird so schnell und so tief wie möglich in die Glocke ausgeatmet. Zur besseren Darstellung erfolgt die Registrierung bei einer höheren Geschwindigkeit von **600 mm/min**. Hier gilt daher:

1 cm (horizontal) = 1 s

Der Versuch wird wiederum 3-mal durchgeführt und ist auf den Seiten 6-7 des PDF-Dokuments „**Kurven Glockenspirometer**“ abgelegt.

Abbildung 3: Dynamische Lungenparameter

FEV1: forciertes expiratorisches Volumen nach der 1. Sekunde

FVC: forcierte expiratorische Vitalkapazität

(Quelle: abgewandelt nach https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/020-0171_S2k_Spirometrie-2015-05.pdf)

1.2 Messung unter simulierter Obstruktion (Videos: „~ mit Obstruktion“)

Durch Einsetzen eines durchbohrten Stopfens in den Luftstrom zum Spirometer wird der Strömungswiderstand erhöht. Das unter diesen Bedingungen gewonnene Spirogramm spiegelt näherungsweise den Befund bei obstruktiven Ventilationsstörungen (z. B. Asthma bronchiale) wider. Die V_p (die gleiche V_p wie bei der Normalbedingung) absolviert eine vollständige spirometrische Untersuchung bestehend aus der Messung von ERV, IRV, VC_E , VC_I und FEV1.

Die Versuche werden analog zu 1.1 durchgeführt und sind in den entsprechend bezeichneten Videos („**ERV mit Obstruktion**“ usw.) dargestellt. Alle Untersuchungen werden wiederum jeweils 3-mal durchgeführt und sind auf den Seiten 8-13 des PDF-Dokuments „**Kurven Glockenspirometer**“ abgelegt.

1.3 Konstruktion der Fluss-Volumen-Kurve

Um den Fluss zu berechnen, muss man die Volumen-Zeit-Kurve differenzieren. Dazu wird ein neues Koordinatensystem mit dem Stoßbeginn als Ursprung eingezeichnet. Hierfür verwenden Sie die im PDF-Dokument „**Kurven Glockenspirometer**“ abgelegten Aufzeichnungen für normales sowie obstruktives FEV1. Wir empfehlen die Verwendung der jeweils 1. Messung für die gesamten Kurven bei normalem und obstruktivem FEV1 (Seite 6, links sowie Seite 12).

1. Suchen Sie die Stelle, wo der Atemstoß beginnt, dort ist der neue Koordinatenursprung (zur Veranschaulichung siehe Abb. 4).
2. Zeichnen Sie eine Volumenachse (siehe Abb. 4) von oben nach unten ein (1 cm = 0,3 l; siehe auch jeweils rechte Seite der Kurven in Abb. 4).
3. Markieren Sie die Stellen, wo das Volumen 1; 2; 3; 4; 5 und 5,5 Liter ist (z.T. abweichend von Abb. 4) und tragen Sie jeweils von diesen Werten ein $\Delta V = 0,3 \text{ l}$ nach **oben** ab.

Beim ersten Wert (1 Liter) tragen Sie zur besseren Ablesung $\Delta V = 0,6 \text{ l}$ nach oben ab (also von 1 Liter auf 0,4 Liter). Dieses Vorgehen weicht ebenfalls von den Angaben in Abb.4 etwas ab.

4. Bestimmen Sie die zugehörigen Δt -Werte.
5. Berechnen Sie für jedes Volumen (1; 2; 3 Liter usw.) den Fluss $\dot{V} \approx \frac{\Delta V}{\Delta t}$
6. Bestimmen Sie auch das Volumen, bei dem $\dot{V} = 0$ ist.
7. Zeichnen Sie das Fluss-Volumen-Diagramm analog zu den Beispielkurven in Abb. 5.

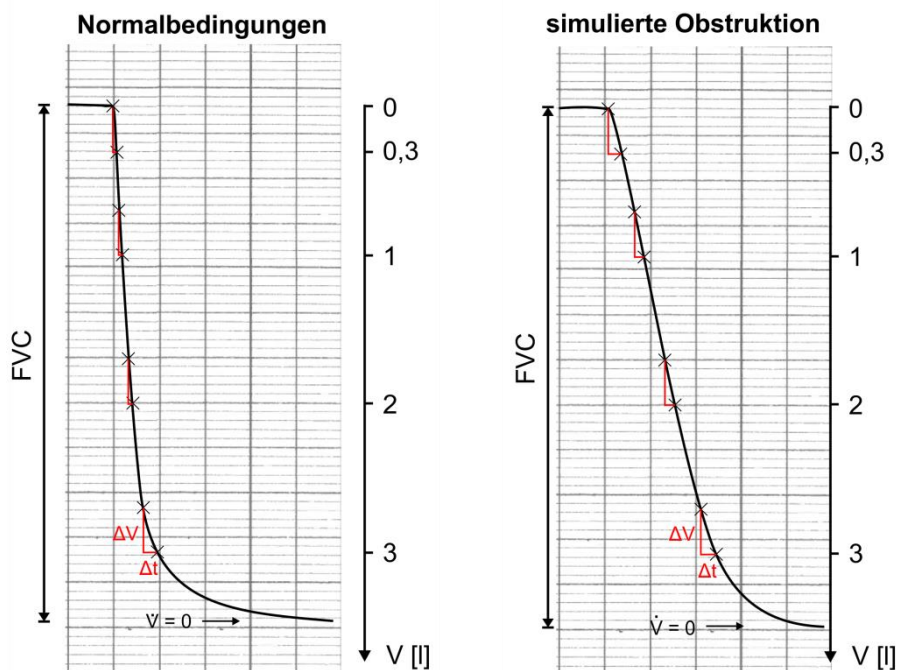


Abbildung 4: Ein Beispiel für die Volumen-Zeit-Kurven mit neuem Koordinatensystem.

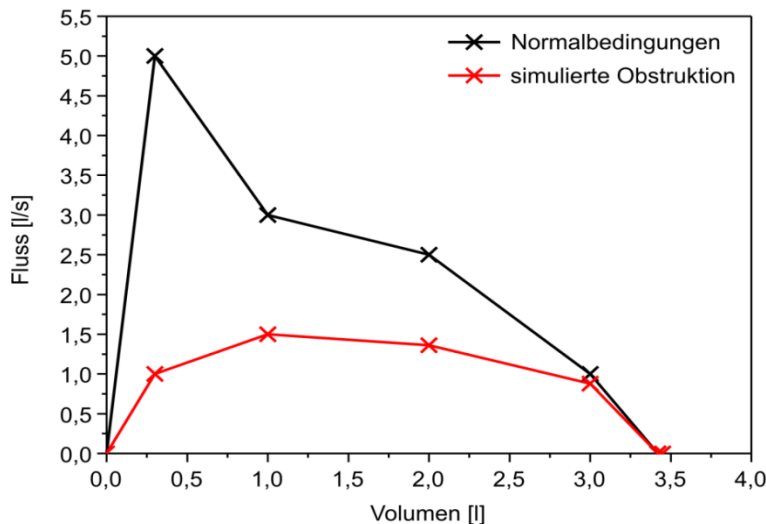
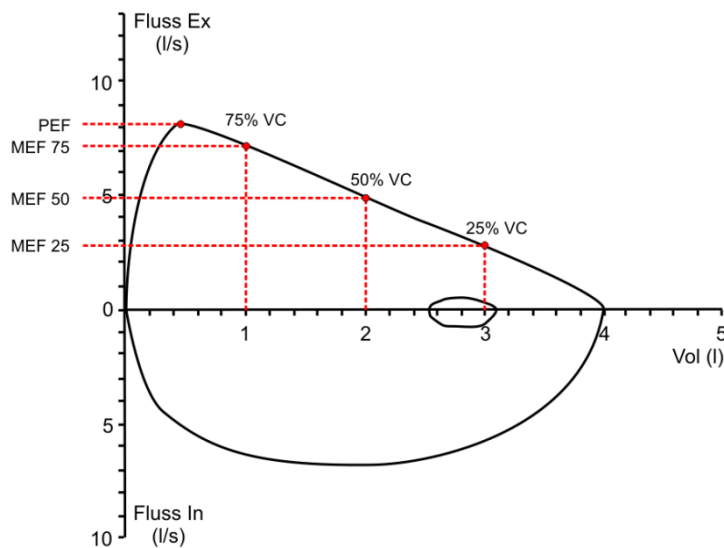


Abbildung 5: Beispiel für die Fluss-Volumen-Kurven der forcierten Expiration

2 Aufnahme der Fluss-Volumen-Kurve (Pneumotachograph)

Pneumotachographen sind dynamische Spirometer, die standardmäßig zur Lungenfunktionsprüfung eingesetzt werden. Prinzipiell lassen sich die gleichen Untersuchungen durchführen, die mit einem geschlossenen Spirometersystem möglich sind. Derartige offene Systeme eignen sich besonders zur Messung der dynamischen Eigenschaften des Atmungssystems. Es werden primär keine Volumina sondern Flusswerte (Stromstärken, dV/dt) über den Druckabfall an einem geringfügigen Strömungswiderstand (Sieb) im Atemstrom gemessen (siehe Video: „**Pneumotachographie / Einführung**“). Durch automatische Integration von einem Atemumkehrpunkt (Stromstärke Null) zum anderen erhält man die zugehörigen Volumina. Die Fluss-Volumen-Kurve ist die graphische Darstellung der Abhängigkeit der Atemstromstärke vom Lungenvolumen. Die Ordinate enthält vereinbarungsgemäß die Expirationsstromstärken in [l/s] nach oben. Der Atemumkehrpunkt nach Inspiration wird automatisch in den Ursprung des Koordinatensystems gelegt und die Volumenabnahme nach rechts auf der Abszisse aufgetragen. Bei maximaler Atemexkursion entspricht dies der Volumenabnahme von der Vitalkapazität bis zum Residualvolumen.

Zunächst werden mittels Pneumotachographie die Parameter ERV und IRV (und zusammen mit V_T : VC) bestimmt. Diese Messung sehen Sie im Video „**Pneumotachographie / Ruheatmung**“. Im Anschluss erfolgt die Untersuchung der dynamischen Parameter bei forcierter Atmung. Das Atemmanöver, analog zur Bestimmung des FEV1 am Glockenspirometer, ist im Video „**Pneumotachographie / FEV1**“ dargestellt. Die Ergebnisse der beiden Versuche sind jeweils unter den Videos abgelegt (PDF-Dokumente „**Spirometrie**“ sowie „**Fluss_Volumen**“). Mit dem Fluss-Volumen-Diagramm werden die maximalen Atemstromstärken (PEF und MEF) in unterschiedlichen Phasen der Expiration ermittelt (siehe Abb. 6).



PEF: Peak expiratory flow
(maximale Atemstromstärke)

MEF 75: Maximaler
expiratorischer Fluss bei noch
verbleibenden 75%¹ der
Vitalkapazität

MEF 50: Maximaler
expiratorischer Fluss bei noch
verbleibenden 50%¹ der
Vitalkapazität

MEF 25: Maximaler
expiratorischer Fluss bei noch
verbleibenden 25%¹ der
Vitalkapazität

Abbildung 6: Beispielhafte Fluss-Volumen-Kurve

3 Informationen zum Ganzkörperplethysmographen und zur Bestimmung der Diffusionskapazität

Plethysmographie ist ein Verfahren, bei dem Volumenänderungen eines Organs, Körperteils oder des gesamten Körpers gemessen werden. Für die Lungenfunktionsdiagnostik stellt der Ganzkörperplethysmograph (engl. bodyplethysmograph, BP) das diagnostische Messmittel der ersten Wahl dar. Er besteht aus einer geschlossenen, druckdichten Kammer von ca. 800 l Rauminhalt, in der ein Proband sitzen kann. Zusätzlich zur Erfassung spirometrischer Daten ermöglicht der BP u.a. die Messung des Atemwegwiderstandes R sowie des intrathorakalen Gasvolumens ITGV (und somit der funktionellen Residualkapazität). Atembewegungen des Probanden führen zu Druck- und Volumenänderungen der Lunge, die zu indirekt proportionalen Änderungen in der Kammer des volumenkonstanten BP führen. Der Proband atmet innerhalb der Kammer über einen Pneumotachographen (Messung der Atemstromstärke), während gleichzeitig Veränderungen des Kammerdruckes registriert werden. Bei hindernisfreiem Austausch der Luft zwischen den Kompartimenten Lunge und Kammer ergäbe sich keine Veränderung des Kammerdruckes. Liegt ein Hindernis vor (z.B. normaler Atemwegwiderstand), entstehen bei Inspiration bzw. Expiration durch Thoraxerweiterung bzw. -verengung Änderungen des Kammerdruckes.

Atemwegwiderstand R (Resistance) und intrathorakales Gasvolumen ITGV

Der Widerstand, den die Atemwege der Gasströmung beim Atmen entgegensetzen, wird als Atemwegwiderstand (Resistance) bezeichnet und stellt eine wichtige Größe bei der Beurteilung der Lungenfunktion dar. Die treibende Kraft für die Gasströmung ist die Druckdifferenz zwischen dem alveolären Druck (intrapulmonaler Druck) und dem Umgebungsdruck. Der Alveolardruck ist nicht direkt messbar, jedoch indirekt bodyplethysmographisch über die Druck- oder Volumenänderungen in der Kammer bestimmbar. Die Resistance R gibt an, welche Druckdifferenz entlang der Atemwege notwendig ist, um eine Luftströmung \dot{V} von 1 l/s zu erzeugen.

$$R = \frac{\text{treibende Kraft}}{\text{Stromstärke}} = \frac{\Delta P}{\dot{V}}$$

¹ Die prozentualen Angaben beziehen sich auf den Anteil der VC, der sich bei diesem Messpunkt noch in der Lunge des Probanden befindet.

Der Atemwegswiderstand (als normal gilt $R < 0,3 \text{ kPa}\cdot\text{s/l}$) wird hauptsächlich von den Strömungsverhältnissen in den **großen** Atemwegen (bis zur 7. Generation, Bronchien) bestimmt, da der Beitrag der kleinen Atemwege (Bronchiolen) durch den großen Gesamtquerschnitt gering ist.

Die bodyplethysmographisch bestimmte Resistance und die spirometrisch erfasste Einsekundenkapazität FEV1 verhalten sich in ihrer Aussage komplementär. Die Resistance wird bei ruhiger Spontanatmung bestimmt (und ist dadurch weitgehend mitarbeitersunabhängig und objektiver), während die FEV1 unter extrem dynamischen Bedingungen erfasst wird. Im Unterschied zur Resistance wird die FEV1 hauptsächlich vom Widerstand in den kleinen Atemwegen (knorpelfreie Röhren / Bronchioli) bestimmt. Bei Erkrankungen der kleinen Atemwege ist FEV1 der empfindlichere Parameter, weil die hohe Strömungsgeschwindigkeit den Widerstand der kleinen Atemwege erfassbar macht. Frühe Stadien von Atemwegserkrankungen beginnen meist in den kleinen Atemwegen. Da diese aber wenig zum Atemwegswiderstand beitragen, können mit der Resistance Frühformen der obstruktiven Atemwegserkrankungen nicht erkannt werden. Die Messung der Resistance wird v.a. zur Verlaufskontrolle und detaillierten Diagnose bestehender obstruktiver Erkrankungen (Asthma bronchiale, COPD) eingesetzt.

Mit dem BP lässt sich unter Anwendung des Boyle-Mariotte'schen Gesetzes (für eine gegebene Gasmenge ist $P\cdot V = \text{const.}$) das in der Lunge befindliche Gasvolumen unkompliziert messen. Vereinbarungsgemäß versteht man unter ITGV das in der Atemruhelage noch im Thorax befindliche Volumen, das unter normalen Bedingungen der funktionellen Residualkapazität ($\text{FRC} = \text{ERV} + \text{RV}$; siehe Abb. 1) entspricht. Eine Erhöhung des Residualvolumens (RV), und damit der FRC, tritt u.a. beim Lungenemphysem auf. Das Lungenemphysem ist das gemeinsame Endstadium verschiedener chronischer Lungenerkrankungen und gekennzeichnet durch eine irreversible Überblähung von Alveolen sowie die Verminderung des Gasaustauschs in der Lunge. Die Diagnose des Emphysems bei Patienten, die keine offensichtliche obstruktive Einschränkung (Verringerung des Verhältnis FEV1/VC; siehe Tab. P1 im Protokoll) aufweisen, ist anhand erhöhter FRC-Werte bzw. der Erniedrigung der CO-Diffusionskapazität (D_{LCO} ; siehe folgenden Abschnitt) zu stellen.

Bestimmung der funktionellen Residualkapazität FRC und der Diffusionskapazität der Lunge D_{LCO}

Die mittels der Fremdgasmethode ermittelte Größe der funktionellen Residualkapazität (FRC) hängt von der Belüftung aller Teile der Lunge ab. Die bodyplethysmographische Methode (siehe oben) dagegen gibt das Volumen der Lungenareale an, die komprimierbar sind. Der Vergleich beider lässt weitere pathophysiologische Rückschlüsse zu (z. B. auf unbelüftete Atelektasen, geschlossenen Pneumothorax). Das Residualvolumen (RV) kann, zusammen mit der Bestimmung der Diffusionskapazität, bei der Einatemzug-Methode (siehe weiter unten) aus der Heliumverdünnung bestimmt werden.

Der Austausch der Atemgase zwischen Alveolarraum und Erythrozyten geschieht durch Diffusion. Die Gasmoleküle müssen dabei mehrere anatomische Barrieren überwinden, die man als alveolo-kapilläre Membran zusammenfasst. Weitere Schritte des Gesamtprozesses sind die Lösung im Plasmawasser, die Diffusion durch die Erythrozytenmembran und die Bindung an das Hämoglobin. Sind die der Diffusion über die Membran folgenden Schritte schnell und die Aufnahmefähigkeit des Blutes für das Gas nicht begrenzt, ist die treibende Kraft das Partialdruckgefälle über die Austauschfläche.

Mittels des Fickschen Diffusionsgesetzes lässt sich eine Gasmenge, die pro Zeiteinheit über eine Diffusionstrecke bei gegebener Membranfläche entlang eines zeitlich konstanten Partialdruckgefälles transportiert wird, berechnen. Die hierbei ermittelte **Diffusionskapazität** gibt an, wie viel ml Gas in einer Minute bei einem Druckgefälle von 1 mmHg in der Lunge ausgetauscht wird. Von besonderem klinischen Interesse zur Erkennung von Diffusionsstörungen ist die Diffusionskapazität für O_2 (D_{LO_2}). Als Testgase zur Bestimmung der D_{LO_2} eignen sich Gase, die schnell und ohne Sättigung im Blut gebunden werden können. Kohlenmonoxid CO ist das ideale Gas zur Messung der D_{LO_2} , denn seine Diffusionskapazität D_{LCO} entspricht etwa der D_{LO_2} (genauer: $D_{\text{LCO}} : D_{\text{LO}_2} = 0,83 : 1$). Infolge der hohen

Affinität (> 200 fach gegenüber Sauerstoff) und der schnellen Reaktion mit Hämoglobin hängt die Bindung nicht von der Durchblutungsrate der Lunge ab.

Die Bestimmung der D_{LCO} erfolgt nach der Einatemzug-Methode. Der Proband atmet ruhig an einem offenen Spirometer (Pneumotachograph). Danach wird maximal ausgeatmet, so dass sich nur noch das RV in der Lunge befindet. In diesem Moment schaltet ein Ventil auf einen Inspirations-Atembeutel, der mit einer bekannten He/CO-Luft-Mischung aus einer Vorratsflasche gefüllt ist (CO = 0,28 %, He = 9,5 %, Rest Luft). Das Testgasgemisch wird maximal inspiriert und die Atmung für 10 Sekunden gestoppt. In dieser Zeit verteilt sich das Testgas über die Totalkapazität (genauer: Alveolarvolumen = TLC - Totraumvolumen). Der Proband atmet langsam und gleichmäßig aus. Der erste Teil der Ausatemluft (0,8 l Verwerfvolumen) wird in die Umgebung ausgeatmet. Dieses Volumen dient der Spülung des Totraums der Atemwege (ca. 150 ml anatomischer Totraum). Die folgenden 0,8 Liter der Expiration (Sammelvolumen) werden in einem Expirations-Atembeutel aufgefangen und der Gasanalyse hinsichtlich der He- und CO-Konzentration unterzogen. Die Verdünnung des inerten Indikatororgases Helium während der gleichmäßigen Verteilung in der Lunge ist ein Maß für die TLC. (Je geringer die He-Konzentration im Expirations-Atembeutel ist, umso größer ist die TLC.) Die CO-Konzentration wird ebenfalls durch Verteilung in der Lunge, zusätzlich aber durch Diffusion in die Blutbahn (sowie Bindung an Hämoglobin) verringert. Die Diffusionskapazität D_{LCO} wird, gemäß dem Ersten Fickschen Gesetz, durch die Aufnahme (Volumenstrom) des Testgases CO (\dot{V}_{CO} ; in ml/min) sowie den Diffusionsgradienten, d.h. die CO-Partialdruckdifferenz entlang der Diffusionsbarriere ($\Delta P_{CO} = P_{CO,Alveole} - P_{CO,Kapillare}$; in mmHg) bestimmt:

$$D_{LCO} = \frac{\dot{V}_{CO}}{\Delta P_{CO}}$$

Klinisch kann die Diffusionsmessung zur Differentialdiagnose verschiedener Lungenerkrankungen und dabei vor allem der Differenzierung von Ventilations- und Diffusionsstörungen herangezogen werden. Der unbestrittene Wert der Diffusionsmessungen liegt, ähnlich der plethysmographischen Bestimmung der Resistance, in der Verlaufskontrolle verschiedener Lungenerkrankungen.

Protokoll Atemvolumina

Bitte ausdrucken, ausfüllen und zusammenheften!

Datum:

Name:

Vorname:

KGr:

Email-Adresse:

Zu 1.1 und 1.2:

- Messen Sie aus den Spirogrammen folgende Parameter: ERV, IRV, VC_E, VC_I, FEV1 und tragen Sie alle Werte in die Tabelle P2 ein.
- Jede Größe ist als arithmetisches Mittel aus 3 nacheinander durchgeführten Messungen zu bestimmen und auf Körperbedingungen (BTPS)² umzurechnen, d.h. die gemessenen Werte werden auf BTPS-Bedingungen korrigiert:

$$V_{\text{BTPS}} = k_{\text{BTPS}} \cdot V_{\text{Glocke}}$$

k_{BTPS} : Normierungsfaktor

V_{Glocke} : bei Raumtemperatur gemessenes Volumen in der Spirometerglocke

- Ermitteln Sie den Sollwert für VC anhand der unter 1.1.3 angegebenen Sollwertformel und vermerken diesen in Tabelle P2.
- Vergleichen Sie die bei simulierter Obstruktion ermittelten Werte für ERV, IRV, VC_E, VC_I, FEV1 mit den unter Normalbedingungen ermittelten Werten (in % dieser Werte angeben). Schätzen Sie den simulierten Schweregrad anhand Tabelle P1 ein und vermerken diesen in Tabelle P2.

Diagnostische Grenze	FEV1 _{rel} (in % von VC)
Normal	≥ 80 %
Verdacht	75 – 80 %
Leichte Obstr.	65 – 75 %
Mittelgradige Obstr.	50 – 65 %
Schwere Obstr.	< 50 %

Tabelle P1: Schweregrad der Obstruktion

- Welcher Unterschied besteht zwischen der simulierten Obstruktion gegenüber realen obstruktiven Atemwegserkrankungen (im Anfangsstadium)? Welche Parameter (PEF, MEF 75/50/25) sind jeweils verändert?

.....

² BTPS: Body Temperature, Pressure, Saturated = Körpertemperatur, Luftdruck, Wasserdampfsättigung bei 37°C.

Datum:	12.08.2020	Vp-Geschlecht:	männlich		
Raumtemp:	24°C	Vp-Alter:	24 Jahre		
Luftdruck:	754 mmHg	Vp-Größe:	175 cm		
BTPS-Faktor (k_{BTPS}):	1,0802	Vp-Gewicht:	62 kg		
Spirometrie-Ergebnisse unter Normalbedingungen					
	ERV	IRV	VC _E	VC _I	FEV1
Wert 1 [cm]					
Wert 2 [cm]					
Wert 3 [cm]					
Mittelwert [Liter]					
Mittelwert (BTPS korrigiert)					
in % der Vitalkapazität (VC)			-----		
Sollwert VC [Liter]	-----	-----			-----
Spirometrie-Ergebnisse unter simulierter Obstruktion					
Schweregrad (normal ... schwere Obstr.):					
	ERV	IRV	VC _E	VC _I	FEV1
Wert 1 [cm]					
Wert 2 [cm]					
Wert 3 [cm]					
Mittelwert [Liter]					
Mittelwert (BTPS korrigiert)					
in % der VC (simul. Obstruktion)			-----		
in % vom jeweiligen Mittelwert unter Normalbedingung					

Tabelle P2: Ergebnisse der Glockenspirometrie

Zu 1.3:

- Füllen Sie die Tabelle P3 aus.

normal				mit Stopfen			
V [l]	ΔV [l]	Δt [s]	\dot{V} [l/s]	V [l]	ΔV [l]	Δt [s]	\dot{V} [l/s]
1	0,6			1	0,6		
2	0,3			2	0,3		
3	0,3			3	0,3		
4	0,3			4	0,3		
5	0,3			5	0,3		
5,5	0,3			5,5	0,3		
	–	–	0		–	–	0

Tabelle P3: Werte für das Fluss-Volumen Diagramm

- Konstruieren Sie ein Fluß-Volumen-Diagramm der forcierten Expiration aus Ihrem Spirogramm unter Normalbedingungen und bei simulierter Obstruktion. Nutzen Sie hierfür die Werte aus Tabelle P3 und die Anleitung unter 1.3!

Zu 2:

- Übertragen und vergleichen Sie die Ergebnisse aus Glockenspirometer-Messungen (**Normal**-Werte aus Tabelle P2) und Pneumotachograph („**Best**“-Werte aus den PDFs „**Spirometrie**“ und „**Fluss_Volumen**“) in Tabelle P4. Abweichungen von etwa 10% zwischen den Methoden sind als normal anzusehen.

	Glockenspirometer	Pneumotachograph
ERV		
IRV		
VC _E		
VC _I		
FEV1		

Tabelle P4: Vergleich der Ergebnisse aus Glockenspirometer-Messungen und Pneumotachographie

- Skizzieren Sie grob den typischen Verlauf der Fluss-Volumen-Kurve bei einer obstruktiven sowie bei einer restriktiven Ventilationsstörungen! Zeichnen Sie zur Verdeutlichung jeweils den Normalverlauf mit ein.

Obstruktive Ventilationsstörung

Restriktive Ventilationsstörung

- Nennen Sie Beispiele obstruktiver und restriktiver Atemwegserkrankungen / -einschränkungen!

Obstruktion:

.....

Restriktion:

.....

Zu 3:

Lesen Sie den Abschnitt „Informationen zum Ganzkörperpletysmographen und zur Bestimmung der Diffusionskapazität“ und beantworten Sie folgende Fragen:

- Die Strömungsverhältnisse in welchen Atemwegen werden durch die Messung der Resistance (R; Atemwegswiderstand) bzw. des FEV1 vorrangig erfasst?

.....

- Warum tragen die kleinen Atemwege (Bronchioli) bei Ruheatmung wenig zum Atemwegswiderstand bei?

.....

- Warum eignet sich Kohlenmonoxid (CO) zur Bestimmung der Diffusionskapazität der Lunge, und warum nimmt man nicht direkt Sauerstoff?

.....

- Nennen Sie Beispiele für Erkrankungen bzw. pathologische Zustände, bei denen D_{LCO} verringert ist!

.....