

Lungenfunktionsprüfungen

Ein kleiner Leitfaden

Angela Vogel

Welche Bedeutung haben Lungenfunktionsuntersuchungen?

"In der Erkennung von Krankheiten ist die Lungenfunktionsdiagnostik eine Hilfsuntersuchung, die sich in das Mosaik der Gesamtdiagnostik (Erhebung der Vorgeschichte, klinische, klinisch-chemische und Röntgenuntersuchung*) einordnet. Es ist deshalb auch für die Lungenfunktionsdiagnostik wichtig, klinische und anamnestische Daten zu kennen, um einen Funktionsbefund richtig interpretieren zu können. Krankheiten, die sich weit gehend anderen diagnostischen Maßnahmen entziehen, wie die chronische Bronchitis, können in ihrer Auswirkung auf die Bronchien frühzeitig erkannt werden"

***ACHTUNG:** Hier muss immer geprüft werden, ob eine Computertomografie (CT oder hoch auflösendes CT (HCT) oder aber, noch schonender, eine Kernspintomografie (MRT)) nicht aufschlussreicher sein kann. Lungenfachärzte haben oft eigene Röntgengeräte oder Verträge mit einer Röntgenpraxis. Das führt nicht eben selten dazu, dass sie eine Röntgenaufnahme statt eines CT, HCT oder MRT anordnen. Um das zu rechtfertigen, unterstellen sie dem Patienten dann gerne mal eine Radioaktivitätsphobie und behaupten beruhigend, die radioaktive Belastung durch ein CT sei nicht geringer als durch die Röntgenaufnahme. Dabei unterschlagen sie aber, dass das HCT z.B. bei Verdacht auf ein Lungenkarzinom oder Asbesterkrankungen/Silikose die diagnostisch besseren Aufnahmen bringt und dass das in der Bildqualität mindestens gleichwertige MRT die PatientInnen nicht auch noch radioaktiv belastet. Allerdings bezahlen die Krankenkassen der GKV ein MRT nur dann, wenn es nach dem Indikatonskatalog für MRT ausgewiesen und die Anordnung vom anordnenden Arzt genau begründet wird. Weil das Mehrarbeit macht, verweigern die FachärztInnen inzwischen regelhaft, ein MRT anzuordnen. Hier ist es dann sinnvoll, selbst den I-Katalog zu Rate zu ziehen – siehe Homepage des Gemeinsamen Bundesausschusses – g-bä – die zutreffende Indikation auszuwählen und dem Arzt, der Ärztin, vorzuschlagen. Wenn alles nichts hilft, müssen Sie selbst zahlen (wenn Sie es können). Der (gerechtfertigte) Normalpreis für ein MRT liegt heute bei ca. 150 Euro. Alles, was darüber ist, gerät in die Zone der Beutelschneiderei. Meist werden tatsächlich höhere Preise angesetzt, was heißt: Sie sollten feilschen und

sich nicht ins Bockshorn jagen lassen. Fragen Sie vor dem Arztbesuch bei Ihrer Krankenkasse schriftlich an, ob sie ein MRT finanzieren würde und was ein MRT aktuell im Durchschnitt kostet, wenn Sie selbst zahlen wollen/müssen.

Einige Angaben zur Atmung

Werden die Lungen gedehnt, strömt Luft hinein und der Bronchialbaum dehnt sich in der Länge und der Breite mit. Dabei entsteht in den Alveolen ein negativer Druck gegenüber dem Atmosphärendruck und bis zum Druckausgleich strömt Luft in die Alveolen. Dieser Vorgang kehrt sich bei der Ausatmung um.

Wichtig ist der Kraftaufwand, den eine Person zur Atemarbeit braucht. Er hängt ab von

- ❖ "der Elastizität des Thorax und des Lungengewebes,
- ❖ dem Reibungswiderstand des Luftstroms in den Atemwegen,
- ❖ dem Reibungswiderstand der Gewebe untereinander".

Atmen Sie normal aus, kommt es am Ende des Ausatmers zum Gleichgewicht zwischen der nach aussen ziehenden Kraft des Brustkorbs und der nach innen ziehenden der Lungen. Das Luftvolumen, welches sich in diesem kurzen Zustand des Atemstillstands noch in den Lungen befindet, bezeichnet man als das **thorakale Gasvolumen** oder als **funktionelle Residualkapazität** (FRC oder TGV). Strengen Sie sich dann an und pressen bewusst noch weiter Luft aus, dann ist das, was Sie raus pressen, Ihr **expiratorisches Reservevolumen** (ERV). Atmen Sie dann - in diesem Zustand der maximalen Ausatmung so viel Sie können wieder ein, so ist diese Luftmenge Ihre Vitalkapazität (VC). Da grosse Menschen in der Regel einen grösseren Thorax haben als kleine, ist die Vitalkapazität in erster Linie grössenabhängig. Sie hängt aber auch von der Elastizität der Lungen und des Thorax ab. Bei Starrheit passt weniger Luft in die Lungen und der Mengenwert ist reduziert.

Atmen Sie normal ein und aus - ohne bewusst darauf zu achten - so bewegen Sie Ihr Atemvolumen (auch Atemzugvolumen) hin und her. Es bleiben jedoch Reste sowohl bei Aus- als auch beim Einatmen. Misst man nun die Differenz zwischen normaler und maximaler, also bewusst und mit Kraftanstrengung, so erhält man das **inspiratorische Reservevolumen** (IRV). Ebenso bei der Ausatmung. Da erhält man auf diese Weise den Wert für das **expiratorische Reservevolumen** (ERV). Daraus ergibt sich: Die Vitalkapazität setzt sich zusammen aus dem Atemvolumen, dem ex- und dem inspiratorischen Reservevolumen.

Aber auch wenn Sie ganz bewusst und mit Kraft maximal ausgeatmet haben, verbleibt noch Luft im Thorax. Diese Restluft bezeichnet man als das **Residualvolumen** (RV)

Das alles sind Parameter, die sich auf die individuell quantitativen Luftmengen als solche beziehen. Daneben spielt aber auch der Zeitfaktor eine wichtige diagnostische Rolle, d.h. die Zeit, in der diese Luftmengen geatmet werden können. Misst man sie, dann erhält man

die so genannten dynamischen Atemvolumina. Multipliziert man das Atemvolumen (AV) mit der Atemfrequenz (f) in einer Minute, so erhält man das **Atemminutenvolumen** (AMV = MV = minute volume).

"Misst man das Volumen, welches man nach maximaler Inspiration in einer Sekunde bei maximaler und forcierter Expiration ausatmen kann, so erhält man den Atemstosstest (AST), auch als Tiffeneau-Wert, besonders aber als forciertes expiratorisches Volumen in einer Sekunde (FEV1) bezeichnet. Die forcierte, angestrengte Expiration ist nicht physiologisch. Sie dient in erster Linie zur Feststellung einer Obstruktion (Verengung der Atemwege) und zur Differenzierung einer Restriktion. Unter Ruheatmung kann eine Obstruktion mit Hilfe der Ganzkörperplethysmographie oder durch Messung des Atemwegswiderstandes mit der Oszillations- oder Unterbrechermethode nachgewiesen werden.

Lässt man einen Patienten maximal, d.h. so tief und so rasch wie möglich, ein- und ausatmen, so erhält man, berechnet auf die Minute, als Volumen den Atemgrenzwert (AGW), auch Atemreserve oder maximale willkürliche Ventilation (maximal voluntary ventilation = MVV) genannt. Dieses Volumen wird selbst bei schwerster Arbeit nie erreicht. Atemreserve ist deshalb ein wenig zutreffender Ausdruck."¹

Aussagekräftig sind neben den statischen und dynamischen Volumina die Atemflusswerte (in Litern pro Sekunde gemessen), die Atemdrücke (in kPa oder cm H₂O gemessen), atemmechanische Größen (gemessen in kPa • s/l), die Lungendurchblutung, das Ventilations-Perfusions-Verhältnis, die Diffusion, Sauerstofftransport, Gas-Austausch und Gas-Transport im Blut, Blutgase (...).

Was wird gemessen?

Man unterscheidet Messungen des *statischen* und der *dynamischen* Ventilation. Hier die wichtigsten Parameter für die

Statische Ventilation

- also die Messgrößen, die unabhängig von der Zeit gemessen werden, die Sie zur Atmung brauchen)

AZV (= AV = AP = VT)

Atemzugvolumen oder Atemvolumen:

Das ist die pro Atemzug ein- (=inspiratorisch) bzw. ausgeatmete (expiratorische) Luftmenge (normal um 0,5 l)

ERV

Expiratorisches Reservevolumen:

¹ W. Schmid, *Angewandte Lungenfunktionsprüfung, München-Deisenhofen, 1996, 6. Auflg., S. 1. Ich stützte mich im Folgenden vor allem auf Prof. Schmid, der am St. Hildegardis-Krankenhaus in Mainz arbeitet.*

d. i. die Luftmenge, die nach normaler Ausatmung mit Anstrengung zusätzlich ausgeatmet werden kann. (Die Menge beträgt etwa 1/3 von der Vitalkapazität)

FRC = TGV

Funktionelle Residualkapazität/Thorakales Gasvolumen:

d. i. die Luftmenge, die *nach* normaler Ausatmung in der Lunge (intrathorakal) bleibt.

FVC/FVK

Forcierte expiratorische Vitalkapazität

Das ist die Luftmenge, die vollständig und mit Kraftanstrengung (forciert) ausgeatmet werden kann

IRV

Inspiratorisches Reservevolumen:

d. i. die Luftmenge, die nach normaler Einatmung zusätzlich eingeatmet werden kann

ITGV = TGV

thorakales Gasvolumen:

Diese Grösse beinhaltet die FRC = funktionelle Residualkapazität plus nicht-ventilierbare Gasvolumina, also die Luftmengen, die immer in der Lunge sind und nicht ein- und ausgeatmet werden

RV

Residualvolumen:

d. i. die intrathorakale Luftmenge nach maximaler Ausatmung (Die RV ist stark grössen- und altersabhängig, beträgt aber normal ungefähr zwischen 1,5 - 2,5 l)

TLC

Totale Lungkapazität:

d. i. das maximale Luftfassungsvermögen des Thorax. Sie setzt sich rechnerisch aus dem Residualvolumen und der Vitalkapazität zusammen.

VC = VK = VT_{max}

Vitalkapazität:

Das ist die Luftmenge, die nach *vollständiger* Ausatmung maximal eingeatmet werden kann. (die Normalwerte sind vor allem grössenabhängig). Es setzt sich somit die Vitalkapazität (VC) aus dem Atemvolumen (oder Atemzugsvolumen -AZV), dem expiratorischen Reservevolumen

(ERV) und dem inspiratorischem Reservevolumen (IRV) zusammen.

Hier die wichtigsten Messparameter² für die

D y n a m i s c h e V e n t i l a t i o n

D i f f u s i o n u n d G a s d r ü c k e

- also u.a. die Messgrößen, die in Zeiteinheiten gemessen werden -

| | |
|---|--|
| A | alveolär |
| a | arteriell |
| AaD | alveolo-arterielle Druckdifferenz |
| AaDO₂ | alveolo-arterielle Sauerstoffdruckdifferenz |
| AGW = MVV | Atemgrenzwert |
| AMV = VE | Atemminutenvolumen |
| Atemvolumen mal Atemfrequenz pro Minute (normal 6 - 8 l) | |
| AST siehe FEV₁ | Atemstosstest |
| AV = VT | Atemvolumen |
| BTPS | Körpertemperatur |
| C | Compliance |
| DL | Diffusionskapazität (DK) der Lunge |
| DLCO | DK der Lungen für Kohlenmonoxid |
| FACO₂ | alveoläre Kohlendioxid-Konzentration |
| FECO₂ | expiratorische Kohlendioxid-Konzentration |
| FEV₁ | Forciertes expiratorisches Volumen in der Sekunde |
| (Einsekundenwert/Einsekundenkapazität) (normal über 75% von der Vitalkapazität (VC) - siehe Tiffeneau Test = FEV₁ geteilt durch Vitalkapazität mal 100) | |
| FO₂ | Sauerstoffkonzentration |
| I_B | Broca-Index. |
| Der Broca-Index berechnet sich individuell aus Körpergewicht geteilt durch Grösse | |

² Da immer wieder verschiedene Abkürzungen für die einzelnen Messgrößen verwendet werden, habe ich mich bemüht, die synonymen Abkürzungen anzugeben.

(cm) × 100.

MEF Maximum expiratory flow = maximale expiratorische Atemstromstärke

MVV/AGW Maximal willkürliche Ventilation

(von keiner besonderen Bedeutung - Wert ist stark grössenabhängig)

P Pressure, Druck

PAO₂ alveolärer Sauerstoffdruck

PaO₂ arterieller Sauerstoffpartialdruck

PaO₂ ist bei Gesunden vom Alter (A), von der Körpergrösse (L) und vom Gewicht (G) abhängig. L + G werden im Broca-Index ausgedrückt (I_B).

PAOC₂ alveolärer Kohlendioxiddruck

PaCO₂ arterieller Kohlenmonoxiddruck

PC pulmokapillärer Druck

PEF Peak Expiratory Flow = Spitzenfluss

PI_{max} maximaler inspiratorischer Druck

PO.1 inspiratorischer Druck nach 1 Sekunde

PO.1_{max} maximaler inspiratorischer Druck nach 1 Sekunde

PA= Alveolardruck und pulmoarterieller Druck

PAP= Pulmoarterieller Mitteldruck

PEF Peak Expiratory Flow = Spitzenfluss

pH Wasserstoffionenkonzentration

misst den Säuregrad. Grobe Faustregel: über sieben alkalischer Bereich, unter 6 saurer Bereich. Blut und Serum haben einen Normalwert um 7,41

Q/HZVHMV Durchblutung der Lunge, Perfusion

R Resistance, Widerstand

R_{aw} Atemwegswiderstand

R_{ex} expiratorischer Atemwegswiderstand

R_{in} inspiratorischer Atemwegswiderstand

R_{sp} spezifischer Atemwegswiderstand

R_{tot} totaler, gesamter Atemwegswiderstand

SO₂ Sauerstoffsättigung

| | |
|---|--|
| TGV = ITGV | intrathorakales Gasvolumen |
| Tiffeneau-Wert | Der T. - Wert berechnet sich aus FEV₁ dividiert durch VC |
| (VT_{max})mal hundert. Liegt der errechnete Wert <u>unter</u> 75 % ist | von einer Obstruktion auszugehen. |
| TC = TK | Totalkapazität |
| V | Volumen |
| V | Zeitvolumen, Ventilation |
| VA | alveoläre Ventilation |
| Anteil der Ventilation, der tatsächlich in die Alveolen gelangt und am Gasaustausch beteiligt ist | |
| VA/Q | Ventilations-Perfusionsverhältnis |
| VE = AMV | Ausatembolumen = Atemminutenvolumen |
| VD | Totraumvolumen |
| VD berechnet sich aus alveolärer Kohlendioxidkonzentration minus der expiratorischen Kohlendioxidkonzentration mal dem Ausatemvolumen geteilt durch die alveoläre Kohlendioxidkonzentration. | |
| VD/VE | Totraumventilation |
| Die Totraumventilation ist das Produkt aus Totraum mal Atemfrequenz (VD=VD mal f) | |
| VA/Q | Ventilations-/Perfusionsverhältnis |
| VE/AMV | Atemminutenvolumen |
| VC/VK | Vitalkapazität |
| VT = AZV = AV | Atemzugsvolumen |

A t e m f l u s s w e r t e

Unter einem Atemfluss- oder Atemströmungswert versteht man ein Atemzeitvolumen - s. o. - jedoch zu einem genau definierten Punkt oder Zeitintervall der ein- oder ausgeatmeten Luftmenge.

"Der stets zu Beginn der Ausatmung registrierte maximale Fluss wird als Spitzenfluss oder Peak Flow (PEF = peak expiratory flow) bezeichnet. Zwischen 25% und 75% der forcierten Vitalkapazität (FVC/FKV) wird der mittlere forcierte expiratorische Fluss (MEF 95 - 75%) gemessen, der auch als MMEF oder FEF 25 - 75% (maximal mid-expiratory flow,

forced expiratory flow) angegeben wird. Ausserdem wird noch zum Zeitpunkt der Ausatmung eines bestimmten Volumenanteils der forcierten expiratorische Vitalkapazität (FVC/FKV), so bei 75, 50 und 25%, der jeweilige Fluss angegeben, z.B. MEF 75%. Die Prozentzahlen bedeuten, wie viel der forcierten expiratorischen (f. e.) Vitalkapazität noch in den Lungen enthalten ist. Bei MEF 75% sind also erst 25% der f. e. Vitalkapazität ausgeatmet.

Alle diese Werte werden in Litern pro Sekunde (l/s) angegeben, obwohl kürzer gemessen wird. Das Gemessene wird auf Sekunde hoch gerechnet. Die Atemflusswerte sind nur einigermaßen aussagekräftig, wenn sie bei maximal forcierter Ex- oder Inspiration gemessen werden, wobei die Ausatmungswerte mehr über die Weite der Atemwege aussagen. Weil diese bei der Einatmung stets weiter sind, kann bei der Einatmung ein gleiches Volumen mit niedrigeren Flussraten in der gleichen Zeit aufgenommen werden als es bei der Ausatmung möglich wäre. Das Bezugsvolumen jeder Flussmessung ist die forcierte Vitalkapazität (FVC/FVK).

Wie die Vitalkapazität sind auch die PEF- und MEF-Werte abhängig von der Grösse, dem Alter und dem Gewicht (Broca-Index) der untersuchten Person.

A t e m d r ü c k e - A t e m w e g s w i d e r s t a n d

Bei der Atmung wirkt gegen den Luftstrom ein Reibungswiderstand. Dieser Reibungswiderstand erhöht sich, wenn Thorax und Lungengewebe an Elastizität verloren haben. Erhöhter Reibungswiderstand geht mit niedrigen dynamischen Atemvolumina (FEV₁ und MVV) und Flusswerten (PEF und MEF) einher. Grundsätzlich lässt sich sagen: Der Atemwegswiderstand (R) ist umso höher, je grösser die Länge der Bronchialwege und je höher die Viskosität der Atemluft beschaffen ist. Schon kleinste Verengungen der Bronchien bewirken eine *starke Zunahme des Atemwegswiderstandes (R)*

Diese Verengungen der Bronchien bezeichnet man als Obstruktion.

Daneben sind wichtig der transbronchiale, transpleurale (transpulmonaler/transösophagealer) und der transthorakale Druck. Diese Drücke sind ein Mass für die Effektivität der Atempumpe und lassen Rückschlüsse auf die Ermüdbarkeit der Atemmuskulatur zu. Gemessen wird der Druck am Mund, der entsteht, wenn 0,1 Sekunde nach Beginn der Einatmung der Atemstrom durch einen kurzzeitigen Verschluss unterbrochen wird. Der Wert wird mit dem Kürzel **PO.1** bezeichnet. Der Druck am Mund, gemessen über einen ganzen Einatemzug, wird als Mundverschlussdruck bezeichnet und mit dem Kürzel **PI** ausgedrückt. PO.1 und PI sollen proportional sein.

Alle diese Drücke werden in kPA oder cm H₂O gemessen, sagen aber nur etwas aus, wenn sie bezogen sind auf das geförderte Luftvolumen, den Atemstrom oder die Zeit.

Atemmechanische Grössen

Vom Atemwegswiderstand war schon die Rede. Er wird als Resistance (R) geführt oder als airways resistance (R_{raw}) angegeben. Die Normalwertspanne bewegt sich *bis* 0,3 kPa • s/l oder 3,5 cm H₂O/l/s.

Die Compliance (C) zeigt an, welches Volumen unter welchem Druck bewegt werden kann. Die Compliance wird unter statischen Bedingungen (statische Compliance) und unter dynamischen Bedingungen (dynamische Compliance) gemessen. Die Normalwerte liegen zwischen 0,03 und 0,05 l /kPa bzw. 0,3 und 0,5 l/cm H₂O. **Achtung:** Die Compliance nimmt wegen des Verlustes an Elastizität des Lungengewebes und der damit leichteren Dehnbarkeit im Alter zu, d.h. es kann ein grösseres Volumen mit kleinerem Druckaufwand, jedoch bei höherem Residualvolumen () gefördert werden.

Bei der Messung der Atemmuskelkraft und des Atemantriebs ist das Verhältnis des Munddruckverschlusses nach 0,1 Sekunde (PO.1) zum eingeatmeten Volumen (V) eine wichtige atemmechanische Grösse (PO.1/VI). Bei dieser dynamischen Messung werden die elastischen und viskösen Atemwiderstände mit erfasst. Als Normwert für die PO1/VI kann 0,55 kPa/l angegeben werden. Allerdings ist die Streuung erheblich und geht nach Schmid bei Normalpersonen von 0,07 bis 3,0 kPa/l.

Lungendurchblutung

"Die Grösse der Lungendurchblutung (Perfusion) entspricht dem Förderverlauf des rechten Herzens und damit dem Herzminutenvolumen (HMV). In Ruhe beträgt das HMV 4 - 5 l/min. Bei Belastung ist ein Anstieg bis maximal 30 l/min möglich. Das HMV ist das Produkt aus Schlagvolumen (SV) und Herzfrequenz (f).

Im Rahmen der Lungenfunktionsdiagnostik sind neben der Grösse des Herzminutenvolumens die Drücke im kleinen Kreislauf, die bei Belastung entstehen oder schon in Ruhe vorhanden sind und im Falle der Erhöhung zum Cor pulmonale³ und letztendlich in die Rechtsherzinsuffizienz führen, bedeutsam.

Ein Anstieg der pulmonalen Drücke entsteht, wenn der Strömungswiderstand in den Gefässen der Lunge zunimmt. Dies ist der Fall, wenn das Strombett der Lunge entweder verkleinert wird, wie bei Lobektomien (Entfernung eines Lungenlappens) oder Pneumektomien (Entfernung eines Lungenflügels), oder wenn eine funktionelle Engstellung der Lungengefässe erfolgt. Letzteres ist der Fall bei Sauerstoffmangel in den Alveolen (alveoläre Hypoxie). Die Engstellung der Lungengefässe (..) hat den physiologischen Sinn, Blut aus schlecht belüfteten Lungengebieten in gut belüftete umzuleiten. Ist jedoch kein gut belüfte-

³ Cor pulmonale: Reaktion des Herzens auf eine akute oder chronische, durch eine Erkrankung der Lunge bedingte Drucksteigerung im Lungenkreislauf. Symptomatisch für eine CP sind Rechtsherzerweiterung und -vergrösserung, Zyanose (Blaufärbung der Lippen z.B.) sowie mässige Schweratmung etc.

tes Lungengebiet vorhanden (globale Hypoventilation), so muss zwangsläufig der Druck im Lungenkreislauf ansteigen.

Mit einer pulmonalen Hypertonie, bei Verengung oder Verkleinerung des Gefäßbettes, ist eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeit in den Gefäßen verbunden, wenn das Herzminutenvolumen gleichbleibt oder gar zunimmt. Dies führt dazu, dass das Blut, welches die Alveolen umströmt und dort mit Sauerstoff aufgeladen werden soll, **rascher die Alveolen umfließt** und somit die Zeit des Kontaktes mit den luftführenden Medien, die Kontaktzeit, verkürzt ist. Dieser Effekt wird auch **Kurzschlussdurchblutung** genannt (Ulmer) genannt. Die eigentliche Effektivität der Atmung, die Arterialisierung⁴, wird dadurch vermindert.

Mit einer Verringerung von Lungenvolumen, durch Resektion oder Kompression (Erguss), Abnahme der Elastizität durch Bindegewebsvermehrung oder interstizielle Wassereinlagerung, wird anatomisch oder funktionell **die Gasaustauschfläche verkleinert**.

Dieser Zustand wird als Restriktion der Lunge bezeichnet." (Schmid, a.a.O., S. 22f)

Ventilations-Perfusions-Verhältnis

"Für die Effektivität der Atmung, die Arterialisierung des Blutes, ist entscheidend, dass möglichst in allen Lungengebieten die alveoläre Ventilation (VA) und die Lungenperfusion (Q) aufeinander abgestimmt sind. Da die alveoläre Ventilation etwa 4 - 5 Liter pro Minute beträgt und das Herzminutenvolumen ebenfalls etwa um die 5 Liter pro Minute, ist das Verhältnis von Atmung zu Durchblutung (VA/Q) etwa 0,8 bis 1,0.

Dieses Verhältnis ist schon beim Gesunden nicht in allen Lungenteilen einheitlich. (..) Beim Kranken wird dieses Verhältnis noch mehr gestört, so dass z.B. bei **Störungen der Ventilation (Lungenemphysem)** oder der **Lungenperfusion (Lungenembolie)** Extremverhältnisse von der Kurzschlussdurchblutung (Shunt) bis zur Totraumventilation (VD) auftreten können. Sowohl bei der Kurzschlussdurchblutung als auch bei der Totraumventilation findet keinerlei Gasaustausch mehr statt. Das Shuntblut entspricht in seiner Zusammensetzung dem gemischt-venösen Blut, die Totraumluft der Zusammensetzung der Einatemluft." (Schmid, a.a.O., S. 23f). Der Sauerstoff wird nicht ab- und das Kohlenmonoxid nicht aufgeladen, um abgeatmet zu werden.

Diffusion und Sauerstofftransport

In den Alveolen wird der Sauerstoff ins Blut und das Kohlendioxid vom Blut in die Alveolen diffundiert. Die Diffusion ist ein physikalischer Vorgang. Sie ist nicht stoffwechselabhängig und benötigt keine Energie. Folgende Faktoren sind massgeblich:

⁴ Abgabe des Sauerstoffs ins arterielle Blut.

- ❖ Grösse des Druckunterschieds (Druckgradient) der Gase: die Diffusion vollzieht sich gut, umso besser der alveoläre Druck ist und der Druckgradient von O₂ (Sauerstoff) und CO₂ (Kohlendioxid) grösser ist
- ❖ Dicke und Diffusionswiderstand der alveolo-kapillären Membran: "Je dicker die alveolo-kapilläre Membran oder je mehr Wasser in sie eingelagert ist, oder je stärker der Bindegewebsanteil bei Lungenstauung und pulmonaler Hypertonie ist, desto schlechter sind die Diffusionseigenschaften" (Schmid, a.a.O., S. 25)
- ❖ Diffusionseigenschaft der Gase: CO₂ diffundiert sechsmal rascher durch die alveolo-kapilläre Membran als Sauerstoff. Deshalb kann auch nur die Sauerstoffdiffusion und niemals die Kohlenstoffdiffusion gestört sein. Steigt der CO₂-Gehalt im Blut an, ist das nie die Folge einer Diffusionsstörung, sondern zeigt eine Kurzschlussdurchblutung oder eine globale Hypoventilation (verminderter Atemantrieb) an, bei der CO₂ nicht abgeatmet wird. Ist das der Fall, ist damit immer eine Erniedrigung des Sauerstoffgehaltes im Blut verbunden, da bei Kurzschlussdurchblutung auch kein Sauerstoff ins Blut gelangt.
- ❖ Grösse der Gasaustauschfläche: Diese Grösse entspricht im Normalfall der Oberfläche der Alveolen und Bronchioli respiratorii - etwa 50 - 100 Quadratmeter. Sie ist verkleinert beim Lungenemphysem und bei Resektion durch Abnahme der Alveolaroberfläche und des gesamten Strömungsbettes infolge gleichzeitigen Kapillarverlustes.

Die Diffusion wird gemessen als **Diffusionskapazität (DL)** in ml/min • kPa oder ml/min • mmHg.

Die eingeatmete Umgebungsatemluft eines Gesunden gelangt unter normalem Druck (101,3 kPa = 760 mmHg) wasserdampfgesättigt in die Alveolen. Diese Luft besteht zu ca. 79% aus Stickstoff, 21% aus Sauerstoff, 1% aus Edelgasen und aus Kohlendioxid. "Rechnet man die Volumenanteile auf Drücke um, so beträgt bei 37° der Druck des gesättigten Wasserdampfs 6,3 kPa = 47 mmHg; der Druck von CO₂ beträgt etwa 5,3 kPa = 40 mmHg, entsprechend 5,6 % der trockenen Ausatemluft, während der Sauerstoffdruck der trockenen Einatemluft entsprechend 20,93% von 95,0 kPa = 19,9 kPa (20,92 % von 713 Torr = 149,2 mmHg) beträgt. Somit findet man in den Alveolen einen Sauerstoffdruck von etwa 14,7 kPa = 110 mmHg.

Für den Gasaustausch ist nun entscheidend, wie viel an Transportmedien, sprich Hämoglobin, zur Verfügung steht. Vom Hämoglobin wissen wir, dass es bereits venös zu etwa 75% abgesättigt in die Alveolarkapillaren gelangt. Es wird dort zu 100 % aufgesättigt. Bei dieser Sättigung nimmt es in der Minute noch etwa 280 - 300 ml Sauerstoff auf. Dies entspricht der normalen Sauerstoffaufnahme (V O₂) des Körpers in Ruhe." (Schmid, a.a.O., S. 27)

Wie nun die Sauerstoff (O₂)-Aufnahme und die Kohlendioxid (CO₂)-Abgabe berechnet wird, finden Sie im Anhang.

Wichtig ist hier vor allem der RQ-Wert - der **respiratorische Quotient**. Er berechnet sich nach folgender Formel:

$$RQ = VCO_2 (=Kohlendioxid-Abgabe) : VO_2 \text{ (Sauerstoffaufnahme).}$$

Normal schwankt der RQ zwischen 0,7 - 0,8. Steigt der RQ - Wert auf über 1.0 kann eine **Hyperventilation** als bewiesen gelten. Sie kann durch unökonomische Atmung oder durch ein Sauerstoffdefizit bei Belastung bedingt sein.

Zu berücksichtigen ist dabei auch, dass alle Atemluft, die in Ihren grossen bis kleinen Bronchien während eines Atemzuges stehen bleibt, am Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid (Gasaustausch) **nicht** teilnimmt, sich also in diesem Augenblick im **Atmungstotraum** befindet. Auch der Totraum, die Totraumluft und - vor allem - das Totraumvolumen geben diagnostisch weitere Aufschlüsse. Bei Lungen- und oder Herzerkrankten weicht der „physiologische“ vom „anatomischen“ Totraum ab. Bei Gesunden beträgt der (grössenabhängige) Totraum um 170 ml. Bei einer Atemfrequenz von 12/Minute ergibt dies eine Totraumventilation von 2040 ml. Bei einem Atemminutenvolumen von 7 Litern beträgt die alveoläre Ventilation ungefähr 5 Liter.

Steigt die Totraumventilation und sinkt der pO_{2a} (arterielle Sauerstoffdruck) ist das der Hinweis auf eine **Verteilungsstörung** und **Partialinsuffizienz**.

Sinkt aber der arterielle Sauerstoffdruck im Verhältnis des respiratorischen Quotienten (RQ) proportional dem Anstieg des pCO_{2a} (Kohlensäuredrucks), dann handelt es sich um eine **globale Insuffizienz**. Bei beiden Formen ist der Gasaustausch und dessen Verteilung gestört.

„Eine erhebliche Vergrösserung der Totraumbelüftung, wie bei schweren Verteilungsstörungen, führt dann aber auch zu einer verminderten Ventilation des verbliebenen belüfteten Alveolarraumes.

Mit dem Anstieg des pCO_{2a} (Kohlensäuredrucks) sinkt entsprechend der pH-Wert (Wasserstoffionenkonzentration) ab.“ Es entsteht eine **respiratorische Azidose** (Übersäuerung), die aufgeschaukelt werden kann durch Metabolisierungsstörungen mit Azidosefolgen⁵ (Blut- und Gewebeübersäuerung durch gestörte aerobe Energiegewinnung aus Sauerstoff auf Zellebene - zelluläre Störung in der Atemwegskette) in anderen Organen bzw. Körpersystemen

⁵ W. T. Ulmer erwähnt hier die diabetische Azidose und das Auftreten „anderer Säuren (...) bei sehr schwerer körperlicher Arbeit“, führt aber leider nicht weiter aus, dass prinzipiell alle Zellgifte in der Lage sind, die zelluläre Atmungskette zu (zer)-stören und Azidose durch Umschaltung auf anaerobe Energiegewinnung mittels Gärung zu erzeugen, vgl. Ulmer, Lungenfunktions - Manual, Stuttgart, 1998, S. 4.

- ist also ein wichtiger diagnostischer Hinweis auf eine andere Erkrankung unter Mitbeteiligung des Bronchialsystems.

Der bronchiale Provokationstest (BPT)

Nach herrschender Lesart dient der unspezifische Provokationstest der Sicherung der Diagnose und der zutreffenden Einschätzung, wie schwer eine Bronchialerkrankung ist.

Man unterscheidet die

- unspezifische Provokationstestung
- spezifische Provokationstestung

Bei der unspezifischen BPT wird die Reagibilität der Atemwege auf unspezifische Reize überprüft. Das kann man

- chemisch mit Acetylcholin, Histamin oder Carbachol
- physikalisch mittels Kälte oder Hitze
- pharmakologisch mittels β -adrenerge Blocker
- atemmechanisch durch Belastungsinduktion und/oder Hyperventilation.

Die wohl meisten unspezifischen Provokationstestungen im Rahmen von lungenfachärztlichen Begutachtungen werden gedoppelt, nämlich chemisch und atemmechanisch, durchgeführt. Auf Kälte/Hitze bzw. β -adrenerge Blocker wird weit gehend verzichtet, es sei denn, eine Praxis hat einen so genannten Kaltluftgenerator.

Der unspezifische chemische PBT

Ein Gesunder reagiert bei unspezifischer chemischer Provokation nicht.

Pathologisch ist der Anstieg des FEV_1 - Wertes um mehr als 20% oder des Atemwegswiderstandes um mehr als 100% des Ausgangswertes.

Nachteil des unspezifischen BPT auf chemischem Wege ist, dass er bis heute nicht standardisiert ist. Häufig angewandt wird die dosimetrische Provokation. Bei fortlaufender Bestimmung z.B. des Atemwegswiderstandes wird der Grad der Empfindlichkeit am Verbrauch der P-Lösung gemessen.

Die unspezifische BPT sollte nicht durchgeführt werden, wenn ein/e PatientIn mehr als eine leichte manifeste Atemwegsobstruktion hat (FEV_1/IVC kleiner 50%). Sie ist auch nicht angezeigt, wenn z.B. ein Lungenemphysem, d.h. eine unheilbare Lungenschädigung, oder ein

Cor pulmonale, also die Reaktion des Herzens auf eine akute oder chronische Drucksteigerung im Lungenkreislauf, bedingt durch eine Erkrankung der Lunge.

Die spezifische BPT

Der spezifische BPT wird der allergologisch-klinisch-immunologischen Diagnostik zugeordnet. Sie werden mit den Allergenen provoziert, die verdächtig werden, ursächlich für Ihre allergisch bedingte obstruktive Atemwegserkrankung zu sein.

Hier stellen sich drei wesentliche Probleme, die vor allem für mutmasslich Berufserkrankte fatal sind. Der Aussagewert von inhalativen Allergen-Provokationstests ist *erstens* bei all jenen PatientInnen grundlegend eingeschränkt, die im unspezifischen PPT mit einem mehr als 20%igen Atemwegswiderstand (FEV1) reagieren, weil sie oft bereits positiv auf inhalede Substanzen jeglicher Art reagieren. Reagieren sie aber nicht auf alles Mögliche, kann ein spezifischer BPT *zweitens* nur dann Erfolg haben, wenn das oder die Auslöserallergen/e bekannt sind. Das aber sind sie sehr häufig nicht, weil die beruflich betroffenen PatientInnen in der Regel mit Allergencocktails umgegangen sind, deren Einzelbestandteile unbekannt sind und/oder sich in der Provokationssituation nicht realitätsgerecht zusammen mischen lassen.

Hinzu kommt *Drittens*: Der inhalative BPT ist für Allergiker unter Umständen auch noch gefährlich. Er kann im schlimmsten Fall einen allergischen Schock auslösen bzw. die bestehende Allergisierung verschlimmern.

Die broncho - alveoläre Lavage

Sie kann oder sollte eine diagnostische Alternative vor allem bei chemisch-irritativ bedingten obstruktiven Atemwegserkrankungen bzw. bei Erkrankungen durch Isocyanate (BK-Ziff. 1315) sein.

Mit broncho-alveolärer Lavage ist so etwas wie Lungenwaschung gemeint. Während der Lavage werden zelluläre Bestandteile und Eiweisskomponenten (Zellausstrich) entnommen und untersucht. Finden sich im Ausstrich spezifische Immunparameter verändert und IgE-, IgG- und IgG₄-Antikörper, ist das der Nachweis einer spezifischen allergischen Reaktion.

Soll = Normwerte

In der Lungenfunktionsdiagnostik spricht man von Sollwerten, sind Normwerte gemeint. Der Ist-Wert ist der in der Einzelnen individuellen Untersuchung erreichte Wert, wobei immer mehrere Durchgänge gemacht und die besten dabei erreichten Werte die Grundlage für die diagnostische Auswertung sein sollen. Darüber haben sich schon viele von Ihnen gewundert und fälschlicherweise gemeint, dass sei ein Trick. Es ist kein Trick und in sich plausibel, denn in der Lungenfunktionsdiagnostik soll bestimmt werden, wie funktionstüchtig Ihre Lunge ist. Für die Beurteilung ausschlaggebend kann dann logischerweise nur der

beste der erzielten Werte sein. Das dazu häufig vorgetragene Argument, damit würde die allgemein schlechte Alltagsatmung nicht erfasst, trifft leider nicht, da das Ziel der Lungenfunktionsdiagnostik nicht ist, die Kurven der Alltagsatmung abzubilden, sondern die Funktionsbreite zu erfassen.

Die Sollwerte sind - ich habe es mehrfach erwähnt - häufig von der Grösse, dem Gewicht und dem Alter der Person abhängig. Im Anhang finden Sie danach geordnete Tabellen für Sollwerte. Es gibt nun aber auch Lungenfachärzte, die andere z. T. erheblich kompliziertere Berechnungsformeln empfehlen und verwenden. Schmid hat in seinem Büchlein einige dieser Formeln präsentiert - Sie finden sie ebenfalls im Anhang.

Umrechnungsfaktoren:

1 mm Hg = 1 Torr = 133,3 Pa

1 cm H₂O = 98,07 Pa

1 mbar = 100,0 Pa

Anhang

Erkrankungen der Bronchien/Lunge sind Gegenstand folgender Ziffern der Berufskrankheitenliste:

1315: Erkrankungen durch Isocyanate (obstruktive/restriktive Zeichen und/oder allergische Alveolitis)

4101: Quarzstaublungenerkrankung - Silikose (obstruktive Bronchitis, Lungenemphysem, Druckerhöhung im kleinen Kreislauf mit Cor pulmonale u.a.)

4102: Quarzstaublungenerkrankung in Verbindung mit Aktiver Lungentuberkulose (Siliko-Tuberkulose) (

4103: Asbeststaublungenerkrankung (Asbestose) oder durch Asbeststaub verursachte Erkrankung der Pleura (chronisches unspezifisches respiratorisches Syndrom mit Zeichen der Restriktion und/oder Gasaustauschstörung, emphysematöse Lungenveränderungen i. S. von Lungenfibrose und später Rechtsherzhypertrophie - Cor pulmonale - CCT!)) - siehe BG-Anmerkungen zum ärztlichen Merkblatt.

4104: Lungenkrebs oder Kehlkopfkrebs in Verbindung mit:

- Asbeststaublungenerkrankung (Asbestose)

- mit durch Asbeststaub verursachten Erkrankungen der Pleura oder

bei Nachweis der Einwirkung einer kumulativen Asbestfaserstaub-Dosis am Arbeitsplatz von mindestens 25 Faserjahren (25×10^6 [(Fasern/m³) × Jahre]) Achtung: Rückwirkungsklausel 1992

4106: Erkrankungen der tieferen Atemwege und der Lungen durch Aluminium und seine Verbindungen (verstärkte Lungenzeichnung, Spontanpneumothorax mit Folge chronischer Bronchitis und Emphysem mit Einschränkung der Atemfunktion einschliesslich u.U. Cor pulmonale - CCT!))

4107: Erkrankungen an Lungenfibrose durch Metallstäube bei der Herstellung oder Verarbeitung von Hartmetallen (interstitielle Lungenfibrose mit obstruktiver Atemwegserkrankung als Komplikation und Restriktionszeichen - CCT!). Die Lungensiderose und die Elektroschweisserlunge fallen nicht darunter. Die Elektroschweisserlunge kann inzwischen als Quasi-BK nach § 9 Abs. 2 SGB VII anerkannt werden (Hess. LSG, HV-Info 21/1997, 1999, bestätigt durch BSG 27. 5. 1997, HV-Info 21/1997, 2013.

4108: Erkrankungen der tieferen Atemwege und der Lungen durch Thomasmehl (Thomasphosphat)

4109: Bösartige Neubildungen der Atemwege und der Lungen durch Nickel oder seine Verbindungen (keine histologischen Besonderheiten).

4110: Bösartige Neubildungen der Atemwege und der Lungen durch Kokereirohgase (keine histologischen Besonderheiten) - Lungenkrebs durch polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe bei Nachweis der Einwirkung einer kumulativen Dosis von mindestens 100 Benzo(a)pyren-Jahren [(µg/m³) × Jahre], derzeit noch nach § 9 Abs. 2 SGB VII.

4111: Chronisch obstruktive Bronchitis oder Emphysem von Bergleuten unter Tage im Steinkohlebergbau bei Nachweis der Einwirkung einer kumulativen Dosis von in der Regel 100 Feinstaubjahren (mg/m³) × Jahre) Achtung: Rückwirkungsklausel 1992, vom BSG jüngst bestätigt (Bronchialobstruktion bei wenigstens zweitweise gemessener Erhöhung des zentralen oder peripheren Atemwegswiderstandes oder Minderung des Einsekundenwerts FEV1 mit Abfall der Strömungsgeschwindigkeit im Fluss-Volumen - Diagramm. Lungenemphysem: Erhöhung des intrapulmonalen Residualvolumens und der Totalkapazität, im Röntgenbild abgeflachte Zwerchfellkuppen, breite Zwischenrippenräume und mehr strahlentransparente Lungenfelder. Davon abzugrenzen die im Wesentlichen allergisch verursachte obstruktive Atemwegserkrankung, die vorwiegend als Asthma bronchiale oder asthmoide Bronchitis bei Sensibilisierung gegenüber überall vorkommenden Umweltallergenen z.B. Pflanzenpollen, Hausstaubmilben oder Tierepithelien vorkommt)

4201: Exogen-allergische Alveolitis (Restriktion (Verminderung der Vitalkapazität) und pulmonale Diffusionsstörung (Verminderung des CO-Transfer-Faktors, Abfall des Sauerstoffparzialdrucks im arteriellen Blut nach Ergometer-Belastung) bei Atemnot, Husten ohne Auswurf, Fieber, Gliederschmerzen wie bei Entzündungen, IgG im Serum erhöht)

4202: Erkrankungen der tieferen Atemwege und der Lungen durch Rohbaumwoll-, Rohflachs - oder Rohhanfstaub (Byssinose)(Erscheinungen wie bei den anderen Atemwegserkrankungen, typisch im Anfangsstadium aber das „Montagssyndrom“ = gleich sehr starke Beschwerden, die sich während der Woche trotz Belastung vermindern)

4303: Adenokarzinome der Nasenhaupt- und Nasennebenhöhlen durch Stäube von Eichen- oder Buchenholz.

4302: Durch chemisch-irritativ oder toxisch wirkende Stoffe verursachte obstruktive Atemwegserkrankung, die zur Unterlassung usw. (Atemwegsobstruktion häufig in Verbindung mit Lungenüberblähung, Entzündungszeichen mit Schleimhautschwellung, Dyskrinie und Störungen des Selbstreinigungsmechanismus der Atemwege - es werden mehrere Krankheitsstadien unterschieden)

4301: Durch allergisierende Stoffe verursachte obstruktive Atemwegserkrankungen (einschließlich Rhinopathie), die zur Unterlassung usw.