

Katharina Ecker

# Atmung & Niere

Das Skript der Physiologie für Veterinärmediziner  
Teil 3

1. Auflage

# Inhaltsverzeichnis

[Atmung](#)

[Niere](#)

Komm schon!

Atme!



Nope.

Du kannst mich nicht zwingen.

# Atmung

## 1. Gase

Bevor man sich mit der Atmung beschäftigt, sollte man sich zuerst kurz über die Eigenschaften der Stoffe, um die es geht, Gedanken machen – nämlich Gase. Gase setzen sich aus Molekülen zusammen, die im Raum weit voneinander entfernt sind. Verschiedene Gase lassen sich in jedem beliebigen Verhältnis mischen und ergeben einen völlig homogenen Stoff, der sich – wegen den relativ großen Abständen zwischen den Molekülen – leicht komprimieren lässt und den Raum, in dem er sich befindet, immer vollständig ausfüllt. Gase verhalten sich unter normalen Bedingungen wie ideale Gase, wodurch man ihr Verhalten vereinheitlichend beschreiben kann.

Ein ideales Gas besitzt einige Eigenschaften, die das Rechnen damit vereinfachen. Seine Atome oder Moleküle sind, verglichen mit ihrem mittleren Abstand zueinander, vernachlässigbar klein und üben keinerlei Kräfte aufeinander aus. Die Gasteilchen fliegen im Raum umher, wobei jede Richtung gleich oft vorkommt. Sie können untereinander kollidieren oder an die Wände des Raumes stoßen, die Stöße sind dabei elastisch. Wenn man dem Gas Energie, beispielsweise in Form von Hitze zuführt, ändert sich die kinetische Energie der Atome. Damit ist die Geschwindigkeit der Gasteilchen direkt von der Temperatur abhängig.

Um den Zustand eines Gases zu beschreiben, verwendet man Druck, Volumen und Temperatur, sogenannte Zustandsgrößen, die für Gase in einem einfachen Zusammenhang stehen, der als das allgemeine Gasgesetz bezeichnet wird.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

p = Druck [Pa]

V = Volumen [l]

R = ideale Gaskonstante, mit einem Wert von 8,3145 J/(mol•K)

T = Temperatur [K]

n = Stoffmenge [mol]

### 1.1. Avogadro - Gesetz

Vom allgemeinen Gasgesetz lassen sich einige Spezialgesetze ableiten, wie beispielsweise das Avogadro - Gesetz. Wenn man Druck und Temperatur konstant hält, dann ist das Volumen proportional der Stoffmenge, wie man aus der oberen Gleichung ablesen kann. Für Normbedingungen ergibt sich bei einem Druck von 101,325 kPa, einer Temperatur von 273,15K (= 0 °C) und einer Stoffmenge von 1 mol ein Gasvolumen von 22,414 l. Diese Zahl wird auch als Avogadro - Konstante bezeichnet.

### 1.2. Boyle - Mariotte - Gesetz

Ein anderes abgeleitetes Gesetz ist das Boyle - Mariotte - Gesetz, welches die Stoffmenge und Temperatur konstant hält und somit den Zusammenhang zwischen Volumen und Druck eines Gases darstellt. Das Volumen eines Gases ist dabei umgekehrt proportional dem Druck, sprich: verdoppelt man das Volumen, halbiert sich der Druck und vice versa. Somit gilt für ein Gas, welches man unter 2 verschiedenen Druckverhältnissen beobachtet:

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2$$

Das bedeutet, dass ein mit Luft gefüllter Luftballon im Wasser bei einer Tiefe von 10m, in welcher ein Druck von 2 atm oder 202,650 kPa herrscht, also der doppelte Druck verglichen mit dem auf Meereshöhe, auf sein halbes

Volumen komprimiert wird. Das gilt natürlich auch für die Lunge von Säugetieren. Beispielsweise wird bei einem Tauchgang auf 90m von dem normalerweise beim ausgewachsenen Menschen 5 Liter betragenden Lungenvolumen dieses auf 500ml komprimiert. Dieses Prinzip macht man sich jedoch auch bei der Inspiration zunutze, da dabei durch Anheben der Rippen das Thoraxvolumen vergrößert wird, wodurch ein Unterdruck aufgebaut wird, welcher die Lunge dehnt und somit zum Luftestrom führt.

Wenn als zweite konstante Größe neben der Stoffmenge der Druck konstant gehalten wird, so ergibt sich aus dem allgemeinen Gasgesetz das zweite Boyle - Mariotte - Gesetz, welches die Beziehung zwischen Volumen und Temperatur darstellt, die direkt proportional zueinander sind.

$$V_1/V_2 = T_1/T_2$$

### 1.3. Dalton - Gesetz

Ein weiteres Gesetz für Gase ist das Dalton - Gesetz. Dieses bezieht sich nicht, wie die Vorangegangenen, auf ein einzelnes Gas, sondern auf Gemische von Gasen, die jedoch nicht miteinander reagieren, sich daher auch weder anziehen noch voneinander abstoßen. Wenn man also in einem Volumen mehrere Gase hat, übt jedes davon einen gewissen Druck auf die Wände des Volumens aus, welchen man als Partialdruck bezeichnet. Der Partialdruck eines Gases entspricht dem Druck, den es ausüben würde, wenn es alleine im selben Raum wäre, natürlich bei gleicher Stoffmenge und Temperatur. Da die Gase nicht miteinander interagieren, ergibt sich für den Gesamtdruck des Gemisches, dass er gleich der Summe der Partialdrücke jedes seiner Komponenten ist.

$$P_{\text{ges}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots$$

#### 1.4. Fick'sches Diffusionsgesetz

Bei der Atmung geht es zuerst darum, dass Gas durch die Alveolarmembran diffundiert, bevor es sich in einer Flüssigkeit löst. Dafür benötigen wir zuerst das Verständnis für Diffusionsvorgänge und somit auch das Fick'sche Diffusionsgesetz.

$$\mathbf{dn/dt = - D \cdot A \cdot dc/dx}$$

$dn/dt$  = Stoffmenge, die pro Zeiteinheit diffundiert

$D$  = Diffusionskoeffizient

$A$  = Fläche

$dc/dx$  = Konzentrationsgradient

Der Diffusionskoeffizient ist das Maß der Beweglichkeit von Molekülen und abhängig vom Typ des Mediums. Er wird üblicherweise angegeben in  $m^2/s$  und ist in Gasen vor allem vom herrschenden Druck und der Temperatur abhängig. Je größer der Druck und je tiefer die Temperatur ist, desto niedriger ist auch der Diffusionskoeffizient.

Da bei der Atmung Gase durch eine Membran diffundieren müssen, sollte das Fick'sche Diffusionsgesetz daran angepasst werden.

$$\mathbf{dn/dt = P \cdot A \cdot \Delta c}$$

$P$  = Permeabilitätskoeffizient

$\Delta c$  = Konzentrationsdifferenz

Diese Gleichung zeigt, dass nicht die Teilchenkonzentration, sondern ausschließlich der Konzentrationsunterschied zwischen 2 Kompartimenten für die Diffusion wichtig ist. Für die Geschwindigkeit sind die Fläche, die dem Gas für die Diffusion zur Verfügung steht, und natürlich das Material und die Dicke der Membran

entscheidend. Die Diffusionszeit lässt sich folglich aus der Membrandicke und dem Diffusionskoeffizienten berechnen.

$$t = x^2/D$$

t = Zeit

x = Diffusionsweg, sprich: Membrandicke

D = Diffusionskoeffizient

Im Gewebe kann Sauerstoff nur sehr langsam diffundieren, verglichen mit der Luft, wodurch auch die Größe von Organismen, die ohne Atmungsorgane überleben können auf einen Durchmesser von 1mm begrenzt ist, außer sie zeigen sehr niedrige Stoffwechselaktivität, wie beispielsweise Quallen. Die Diffusionszeit für das Durchdringen von 1 µm Gewebe beträgt für Sauerstoff  $10^{-4}$  s, bei 10 µm bereits 0,01 s und bei 1mm 100 s. Für 1cm benötigt Sauerstoff 10 000 Sekunden, also über 166 Minuten, was die Notwendigkeit dichter Kapillarnetze erklärt. Dabei diffundiert Sauerstoff wegen der geringeren Masse auf jeden Fall schneller als CO<sub>2</sub>.

Da oftmals die Konzentrationsdifferenz zwischen den Kompartimenten unbekannt ist, hilft man sich mit der Diffusionskonstante K, welche die Menge an Gas in cm<sup>3</sup> angibt, die pro Minute bei einem herrschenden Gradienten von 101,325 kPa durch eine Membranfläche von 1cm<sup>2</sup> diffundiert. Die Diffusionskonstante basiert dabei auf dem Unterschied der Partialdrücke.

### 1.5. Henry'sches Gesetz

Nach der Diffusion durch die Membran, lösen sich die Gase im Blut, was durch das Henry'sche Gesetz beschrieben wird. Henry fand heraus, dass bei gegebener Temperatur die Löslichkeit eines Gases in einer Flüssigkeit in direktem

Zusammenhang mit dem Partialdruck des Gases oberhalb der Flüssigkeit steht.

$$c = \alpha \cdot p$$

c = Konzentration

$\alpha$  = Löslichkeitskoeffizient

p = Partialdruck

Bei dieser Formel ist für die Atmung entscheidend, dass bei gleichem Partialdruck O<sub>2</sub> sich um vieles weniger gut löst als CO<sub>2</sub>, da dieses besser löslich ist. Sowohl in Wasser als auch in Gewebe ist es etwa 30 Mal besser löslich, wodurch die Konzentration unter Standarddruck und 15 °C für O<sub>2</sub> 34ml/l H<sub>2</sub>O und für CO<sub>2</sub> 1019ml/l H<sub>2</sub>O beträgt.

Allgemein ist noch zu sagen, dass bei steigender Temperatur die Löslichkeit von Gasen in der Flüssigkeitsphase sinkt, wodurch kaltes Wasser reicher an Sauerstoff ist als warmes. Für Fische relevant ist auch, dass sich Gase in Salzwasser schlechter lösen als in Süßwasser. Während sich bei 0 °C im Süßwasser noch 10ml O<sub>2</sub>/l H<sub>2</sub>O befinden, sind es im Salzwasser nur 8ml O<sub>2</sub>/l H<sub>2</sub>O. Bei 15 °C hingegen sinken die Konzentrationen auf 7ml O<sub>2</sub>/l H<sub>2</sub>O im Süß - und 6ml O<sub>2</sub>/l H<sub>2</sub>O im Salzwasser.

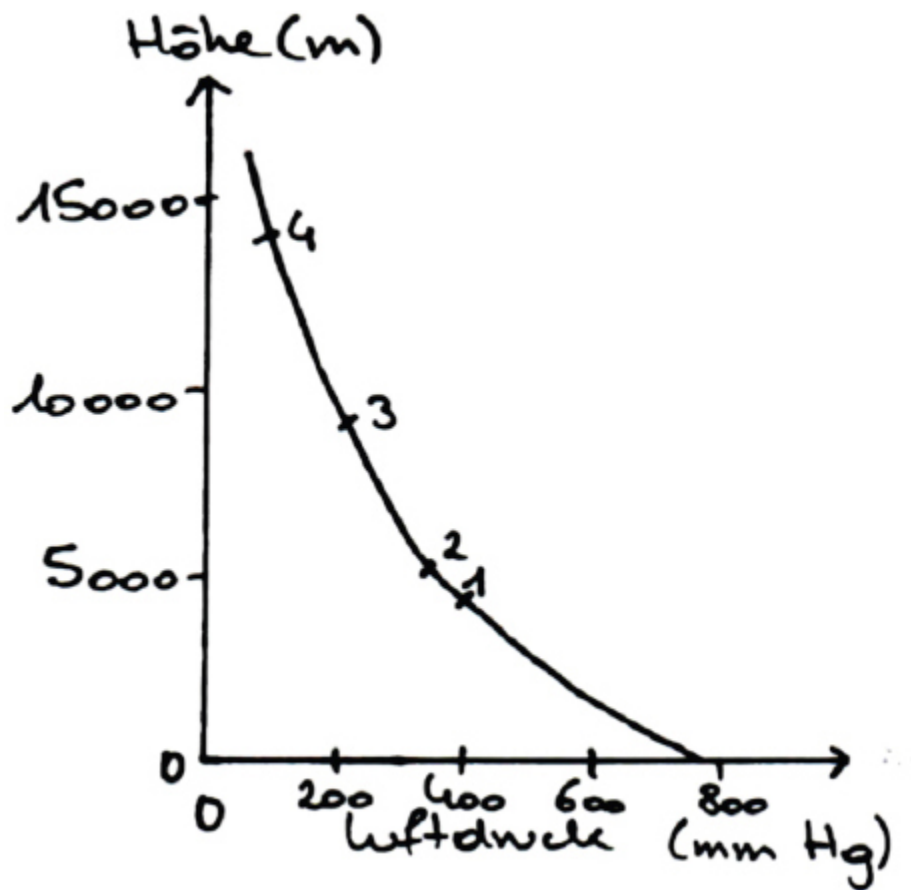
Das Henry'sche Gesetz ist wieder für Taucher relevant. Taucht jemand in große Tiefen, ist er erhöhtem Druck ausgesetzt, wodurch mehr Sauerstoff im Blut in Lösung geht. Taucht er dann wieder auf und ist dabei zu schnell, kommt es infolge der Verringerung des Drucks zu verminderter Löslichkeit der Luft im Blut und somit zur Bildung von Blasen, was im Fall einer Luftembolie auch tödlich enden kann.

## 1.6. Zusammensetzung der Luft

Die Zusammensetzung der Luft ist von der Sättigung mit Wasserdampf abhängig und gleichzeitig auch von der Höhe, allerdings ist sie bis in ca 100km Höhe konstant und somit ist sie für die Zusammensetzung irrelevant. Trockene Luft besteht zu 78,09% aus  $N_2$ , zu 20,95% aus  $O_2$ , zu 0,93% aus Argon und zu 0,03% aus  $CO_2$ . Stickstoff hat einen Partialdruck von 593mm Hg, Sauerstoff von 159mm Hg, Argon von 7,1mm Hg und  $CO_2$  von 0,23mm Hg.

### 1.7. Höhenanpassung

Bei zunehmender Höhe nimmt bei gleichbleibender Gaszusammensetzung der Luftdruck ab, sodass auf 6000m über dem Meeresspiegel der Partialdruck von Sauerstoff nur noch bei 80mm Hg liegt, auf 8800m bei 42mm Hg, bei 13 000m bei 25mm Hg und bei 19 000m auf 10mm Hg.



1: nicht - akklimatisierte Personen verlieren das Bewusstsein

2: höchste menschliche Siedlung

3: maximale Höhe, bei der akklimatisierte Menschen für einige Stunden mit Luftatmung überleben können

4: maximale Höhe, bei der ein Mensch bei reiner Sauerstoffatmung überleben kann

Kurzfristig kommt es durch den abfallenden Sauerstoffpartialdruck zur Hyperventilation, welche zu einer respiratorischen Alkalose führt, da dadurch vermehrt  $\text{CO}_2$  abgeatmet wird. Das bewirkt, dass sich die Sauerstoffbindungskurve nach links verschiebt, wodurch die Sauerstoffaufnahme in der Lunge steigt, die Abgabe im Gewebe jedoch sinkt. Dadurch kommt es zu Verschlechterung der Leistungsfähigkeit.

Bei längeren Höhengaufenthalten wird die respiratorische Alkalose renal kompensiert, indem die Niere vermehrt Bicarbonat ausscheidet, damit der pH - Wert des Blutes konstant bleibt. Außerdem wird sie durch den verminderten Sauerstoffgehalt des Blutes zur verstärkten Freisetzung von Erythropoetin angeregt, was die Erythropoese fördert. Die höhere Anzahl der Erythrocyten können dann auch insgesamt mehr Sauerstoff transportieren und so wird der Sauerstoffgehalt des Blutes normalisiert. Weiters wird in den Erythrocyten vermehrt 2,3 - Bisphosphoglycerat gebildet, was die Sauerstoffbindungskurve wieder nach rechts rücken lässt.

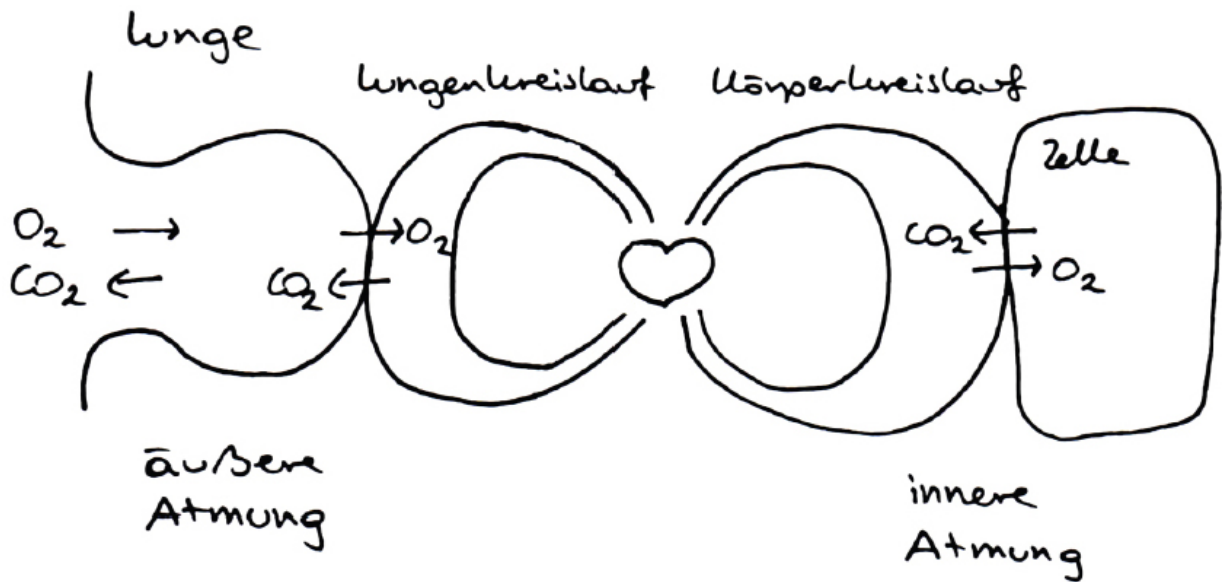
## 2. Atmung

Die Atmung der Säugetiere wird als „Pool - System“ beschrieben, da der Gasaustausch zwischen Kapillaren und Alveolen in der Lunge stattfindet und die Alveolen einen großen Vorrat an Sauerstoff, also einen Sauerstoffpool, beinhalten.

## Pool system



Man unterscheidet grob zwischen der äußeren und der inneren Atmung und kann den Atemvorgang kurz zusammenfassen als: Sauerstoff wird durch das Einatmen der Umgebungsluft bis zu den Lungenalveolen transportiert. Dieser Vorgang erfolgt durch Konvektion, also durch Strömung und wird als Ventilation bezeichnet. Anschließend können  $O_2$  bzw.  $CO_2$  durch Diffusion von den Alveolen in die Kapillaren gelangen und umgekehrt von den Kapillaren in die Luft der Alveolen. Der Gastransport mit dem Blut kann wieder als Konvektion beschrieben werden, dem sich der Gasaustausch zwischen Blut und Gewebe wieder durch Diffusion anschließt. In der Zelle wird  $O_2$  zu den Mitochondrien transportiert, wodurch die innere Atmung stattfinden kann.



### 3. Atemwege

Das Atemwegsystem kann in 2 Abschnitte unterteilt werden: die Leitungszone und die Respirationszone. Zur Leitungszone gehören die Trachea, die Bronchien, Bronchiolen und Terminalbronchiolen. Hier wird Luft nur geleitet, es findet also kein Gasaustausch statt, wodurch man das System auch als Totraum bezeichnet. Die Respirationszone umfasst die Ductuli und Sacculi alveolares, in welchen der Gasaustausch stattfindet.

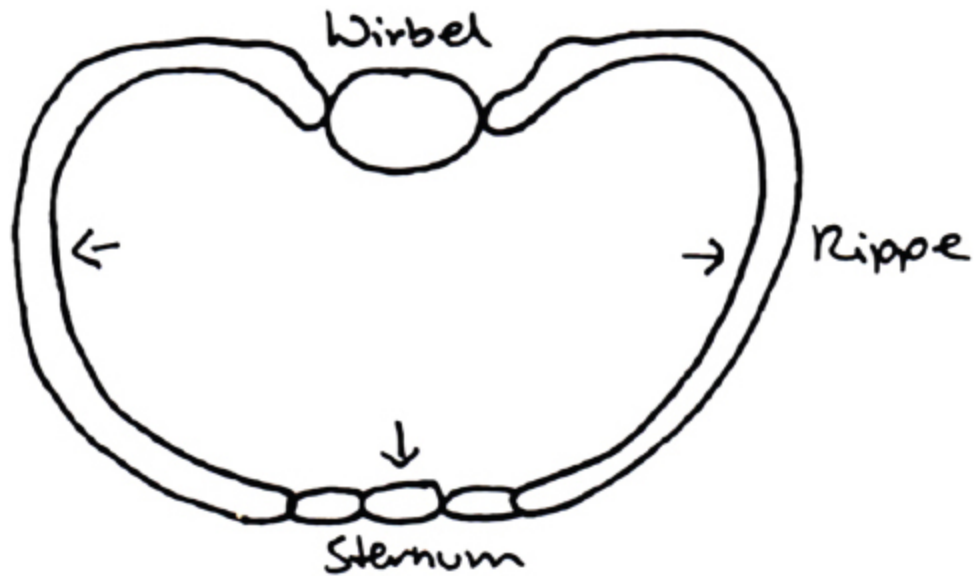
Die Aufgaben der Leitungszone sind vor allem die Reinigung, Erwärmung und Anfeuchtung der eingeatmeten Luft, sodass sie mit Körpertemperatur und wasserdampfgesättigt in den Alveolen ankommt. Gereinigt wird sie zum einen von den Epithelzellen, in deren Schleimschicht bereits kleine Partikel hängenbleiben, welche dann durch den Schlag der Cilien an der apikalen Membran des Epithels Richtung Epiglottis bewegt werden, zum anderen auch durch den Hustenreflex, wenn größere Partikel entfernt werden müssen. Durch die dabei entstehende, stark beschleunigte Expiration werden die Partikel nach außen geschleudert.

Durch die starke Verzweigung der luftleitenden Abschnitte und der weintraubenartigen Anordnung der Alveolen erreicht die Lunge eine immense Oberfläche. Beispielsweise hat 1cm<sup>3</sup> Lunge eine Oberfläche von bereits 800cm<sup>2</sup>, die gesamte Lunge des Menschen eine Oberfläche von 100m<sup>2</sup> und die eines Pferdes ungefähr 2000m<sup>2</sup>. Wenn man bedenkt, dass jede Alveole von einem Kapillarnetz umgeben ist, das rund 80% ihrer Oberfläche abdeckt und somit diese 80% zum Gasaustausch zur Verfügung stehen, sofern die Kapillaren geöffnet sind, kann man sich vorstellen woher die Effizienz dieses Systems kommt.

#### 4. Atemvorgang

Die Ventilation kann nur durch eine Volumensänderung des intrathorakalen Raums, also durch Rippenbewegung, was als Brustatmung bezeichnet wird, oder durch Zwerchfellkontraktion, was als Bauchatmung bezeichnet wird, stattfinden.

Die Grundlage der Brustatmung ist der Winkel in denen die Rippen zu den Wirbeln stehen. Dadurch kommt es zu einer Drehbewegung, wenn die Rippen angehoben werden und somit zu einer Vergrößerung des Thorax nach lateral und ventral. Die Rippenbewegung kommt durch die Arbeit der Zwischenrippenmuskeln zustande, bei der Inspiration durch die äußeren Zwischenrippenmuskeln, bei der Expiration - allerdings nur bei forcierter Atmung - durch die inneren Zwischenrippenmuskeln. In Ruhe läuft die Expiration passiv.



Die Bauchatmung ist effektiver als die Brustatmung und daher immer an der Ventilation beteiligt. Sie wird über die mehr oder weniger starke Wölbung des Zwerchfells in den Intrathorakalraum vermittelt. Für die Inspiration kontrahiert sich das Zwerchfell und wird dadurch Richtung Bauchraum gezogen, bei der Expiration entspannt es sich und wandert wieder stärker in den Thoraxraum.

Durch beide Mechanismen sinkt der intrathorakale Druck während der Inspiration und steigt während der Expiration.

