



Herz-Kreislauf- und Atmungs-System

Studierende HST, Pharmazeutische Wissenschaften
Studierende der Medizin ETH

Polybook designed by
Christina M. Spengler, Philipp Eichenberger

Funktion der luftleitenden Atemwege

Lernziele^M

Sie können

- die Funktion der unterschiedlichen Abschnitte der luftleitenden Atemwege, sowie Beispiele von pathophysiologischen Veränderungen und Effekten von Medikamenten erläutern
- die Technik und das Vorgehen zur Bestimmung der Atemwegsfunktion (dynamische Spirometrie), sowie die erhaltenen Daten erklären
- die Veränderung der Messwerte bei ausgewählten extrathorakalen und intrathorakalen Veränderungen der Atemwege beurteilen

Information^{FS20}

Zum Prüfungsstoff gehören:

- Der Inhalt dieses Kapitels, inkl. messtechnischer Informationen, die *im jeweils verlinkten Kapitel* des Teils *Diagnostik des Atmungssystems* beschrieben sind
- Antworten zu den Study Questions, welche der Vertiefung des Inhaltes, der Verknüpfung des Inhaltes mit weiteren Themen des 1. Studienjahres, sowie der kritischen Auseinandersetzung mit dem Populärwissen dienen. Sie sind im Kapitel *Atmungssystem – Antworten zu Study Questions* des Teils *Study Questions & Answers* zu finden

Nicht zum Prüfungsstoff gehören:

- Textteile , Abschnitte und Links in grauer Schrift. Diese Informationen sind für die speziell Interessierten gedacht, resp. zum Nachschlagen in späteren Jahren.

An interactive or media element has been excluded from this version of the text. You can view it online here:

<https://wp-prd.let.ethz.ch/WP0-CIPRF9683/?p=40>

Dieser Film von Lunge Zürich nimmt uns auf eine kurze Reise durch Atemwege.

Nase

Die Nase erfüllt eine wichtige Funktion bei der Atmung und Konditionierung der Atemluft. Sie ist Sitz des Riechsinn und bei der Sprachbildung beteiligt.

Nasenatmung

Der Hauptluftstrom streicht bei der Inspiration zwischen unterer und mittlerer Muschel vom Naseneingang zur Choane (laminare und turbulente Strömung), bei der Expiration etwas tiefer in der Gegenrichtung durch die Nase.

Die **respiratorischen, vegetativ gesteuerten Funktionen** der Nase bestehen in:

- **Regulierung des Atemstroms** und Anpassung an den momentanen Bedarf. Der Nasenwiderstand wechselt – je nach Blutfüllung – auch zwischen beiden Nasenhälften und ist abhängig vom körperlichen Aktivitätsgrad, körpereigenen und Umwelteinflüssen. Er weist einen zirkadianen Rhythmus auf.
- **Erwärmen der Atemluft** (32–34°C) durch unterschiedliche Blutfüllung der Schleimhaut und der Schwellkörper der Muscheln.
- **Reinigen der Atemluft** von Staubteilchen und von kleinen Fremdkörpern durch die Haare (Vibrissae) des Nasenvorhofs und durch den vom Flimmerepithel unterhaltenen Sekretstrom, der zum Rachen gerichtet ist (mukoziliäre Clearance).
- **Anfeuchten der Atemluft** durch Wasserverdunstung und Abgabe von Nasensekret, das gleichzeitig die Schleimhaut vor Austrocknung schützt.
- **Reflexfunktion** mit Nies-, Tränen- und Hustenreflex sowie Atemreflex (Atemstillstand bei plötzlich eindringendem Wasser).

Die Nase hat aber auch eine **Abwehrfunktion**:

- **Sekretorische Immunität** durch bakterielle Enzyme (Lysozym, Laktoflavin), leukozytäre Mediatoren (Eosinophiles kationisches Protein = ECP, Leukotriene) und Immunglobuline (IgA, IgG) im viskösen Sekretfilm.
- **Unspezifische Detoxikation** von Gasen, z. B. Ozon (O₃) oder Schwefeldioxid (SO₂, das bei der Verbrennung von z.B. Kohle oder Erdölprodukten entsteht) intrazellulär durch Zytochrom-P-450, Superoxiddismutase, Glutathionperoxidase.

Zudem ist sie entscheidend für die normale **Sprachbildung**. Die Nase und wohl auch die Nasennebenhöhlen dienen beim Sprechen als **Resonanzraum**. Die Konsonanten m, n und ng (sog. Resonanten oder Rhinophone) werden gesprochen, ohne dass der Nasenrachenraum durch das Gaumensegel abgeschlossen ist. Die Luft strömt durch die Nase aus.

- Beim **geschlossenen Näseln** (Rhinophonia clausa = Rhinolalia clausa) ist dieser Luftstrom durch eine verlegte Nase behindert, die Sprache klingt tot; Stockschnupfensprache bei Rhinitis, vergrößerter Rachenmandel, Tumoren, Polypen. Der Resonanzraum fehlt.
- Beim **offenen Näseln** (Rhinophonia aperta = Rhinolalia aperta,) haben alle Laute einen nasalen Beiklang. Es fehlt der Abschluss des Nasenrachenraumes, z.B. bei Vorliegen einer Gaumensegellähmung oder einer Gaumenspalte.

Und die Nase hat die wohlbekannte **Riechfunktion**. Bei schnuppernder Atmung gelangen Luftwirbel mit wasserlöslichen Riechstoffen in gas- oder staubförmigem Zustand vom Naseneingang her und beim Schlucken oder Ausatmen über den Nasenrachenraum (gustatorisches Riechen) bis in die **Regio olfactoria**. Die Riechmoleküle lösen sich im Schleim, der die Riechzellen des Riechepithels bedeckt. Sie gelangen zu den Poren der

Riechhaare dieser Neurone. In den sich anschliessenden Riechkölbchen sind **spezifische Rezeptorproteine** (Odor Binding Proteins) verankert. Aus mehreren Zellen mit denselben Rezeptoren bilden sich überlappende Inseln, zu denen ein spezifischer Duftstoff passt wie der Schlüssel zum Schloss (nebenbei existiert ein sog. vomeronasales Organ, das eine andere anatomische Struktur hat und der dient Wahrnehmung von Pheromonen, d.h. Sexuallockstoffen, dient).

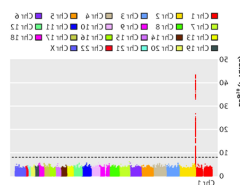
Der Mensch kann ca. **10'000 Düfte** unterscheiden mit ca. 350 verschiedenen Riechrezeptoren. Man unterscheidet heute **10 verschiedene Duftklassen**, die aufgrund von Kreuzadaptationsversuchen und aufgrund der Kenntnis partieller Anosmien (teilweise fehlende Wahrnehmung bestimmter Düfte, sog. „Geruchsblindheit“) definieren konnte. Ein Beispiel für einen **Kreuzadaptationsversuch** ist, dass man sich bei längerer Exposition zu Zigarettenrauch an den ‚Duft‘ gewöhnt, diesen also nicht mehr wahrnimmt, aber trotzdem Kaffee noch wahrnehmen kann. Personen mit **partieller Anosmie** können zum Beispiel genetisch bedingt, wie kürzlich gezeigt wurde, den „typischen“ Urinduft nach Spargelgenuss, konkret bestimmte Metaboliten (Abbauprodukte), nicht riechen können (hier sei auf eine amüsante Studie von Markt et al. hingewiesen, die in der Weihnachts-Schmunzel-Ausgabe des British Medical Journal im Jahr 2016 erschienen ist, s.u.).

Sniffing out significant “Pee values”: genome wide association study of asparagus anosmia.
Markt et al., BMJ (2016)

Nurses' Health Study and Health Professionals
Follow-up Study cohorts.

6909 men and women of European-American
descent with available genetic data from genome
wide association studies.

Metabolites: Methanethiol and S-methyl thioesters metabolites



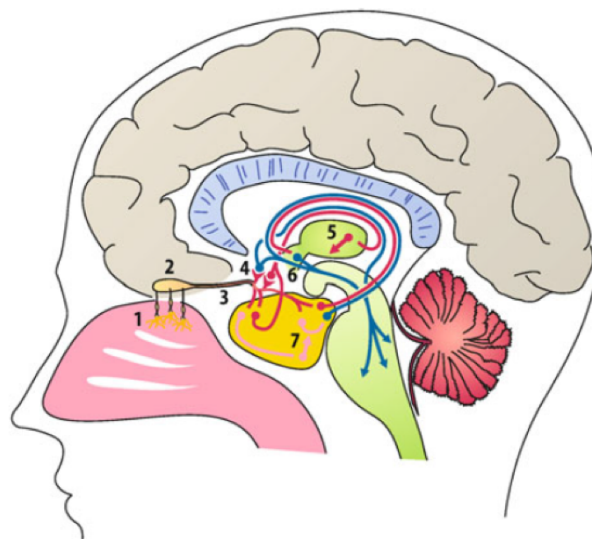
Film: <https://www.bmj.com/content/355/bmj.i6071>



Diese Studienergebnisse dienen der reinen Illustration.

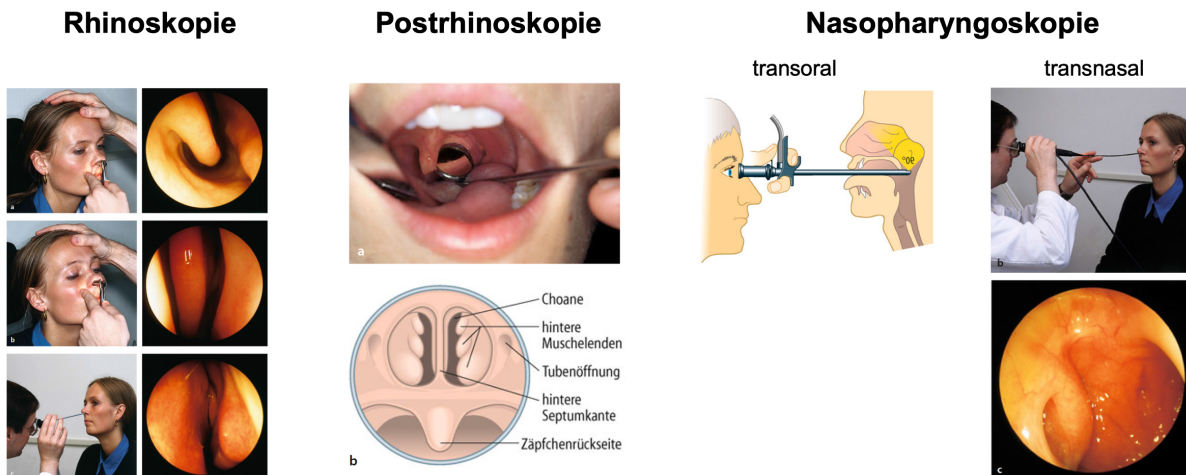
Andere Personen riechen z.B. Blausäure (kann tödlich sein) oder Bittermandeln nicht. Eine **komplette Anosmie** kann z.B. durch Adenoviren oder Grippeviren hervorgerufen werden, wobei eine schwere, irreversible Verlaufsform in ca. 1-2% der Grippeerkrankungen mit starkem Schnupfen auftritt.

Die Duftinformation ist zentral mehrfach verschaltet, so zum Beispiel auch zu vegetativen Kernen des Hypothalamus.



Quelle: Schmidt et al. Physiologie des Menschen.
Springer Verlag

Diagnostisch wird die Nase optisch untersucht, entweder direkt oder endoskopisch, oder im Fall von vermuteten (partiellen) Anosmien mit Riechtests.



Pathophysiologisch führt eine **Behinderung der Nasenatmung** zur Mundatmung, was zu einer **Austrocknung**, einer **Reizung** und möglicherweise einer **Entzündung** der unteren Atemwege führen kann. Eine **verstärkte Füllung** der Muscheln und/oder eine **vermehrte Sekretion** kann physiologisch auftreten, z.B. führt Einatmen warmer Luft zu einer Abschwellung und einatmen kalter Luft (ja sogar kalte Füße) zu einer Anschwellung der Muscheln und zu einer vermehrten Sekretion. Eine vermehrte Füllung der Muscheln und/oder eine vermehrte Sekretion können auch hormonell bedingt sein oder durch Entzündung, Allergie, mechanische, chemische oder thermische Reize, oder sogar durch gewisse parenteral (unter Umgehung des Darmes) gegebene Medikamente entstehen.

in brief

- Die **Funktionen der Nase** sind respiratorische, vegetativ gesteuerte Funktionen (Regulierung des Atemstroms, Erwärmung, Reinigung und Anfeuchtung der Atemluft, Schutzreflexe), Abwehrfunktion (sekretorisch, unspezifisch), dient als Resonanzraum für die Sprachbildung und der Geruchswahrnehmung.
- **Pathophysiologisch** führt eine Behinderung der Nasenatmung zu Austrocknung, Reizung und evtl. Entzündung der oberen und/oder unteren Atemwege. Durch (virale) Infekte kann eine (vorübergehende oder persistierende) Anosmie entstehen, partielle Anosmien sind z.T. genetisch bedingt.
- Die **Untersuchung** erfolgt in erster Linie optisch, ausser beim Test der Geruchswahrnehmung.

Mundhöhle – Pharynx – Larynx

In der Mundhöhle beginnt der **Schluckakt**, der die Nahrung über Pharynx (Rachen), Larynx (Kehlkopf), und Ösophagus zum Magen führt. Mundhöhle und Pharynx bilden dabei

eine funktionelle Einheit, in der sich Luftweg (Nase-Rachen-Kehlkopf) und Speiseweg (Mund-Rachen-Ösophagus) kreuzen, währenddessen die **Atmung unterbrochen** wird. Die beteiligten Muskeln werden durch das **Schluckzentrum** im Hirnstamm koordiniert und über Hirnnerven (V, VII, IX, X und XI) sowie zervikale Nerven (C1-C3) motorisch und sensibel innerviert. Zur Aufbereitung des Speisebreis ist zusätzlich eine ausreichende Speichelproduktion, zum Transport eine normale Schleimhaut erforderlich.

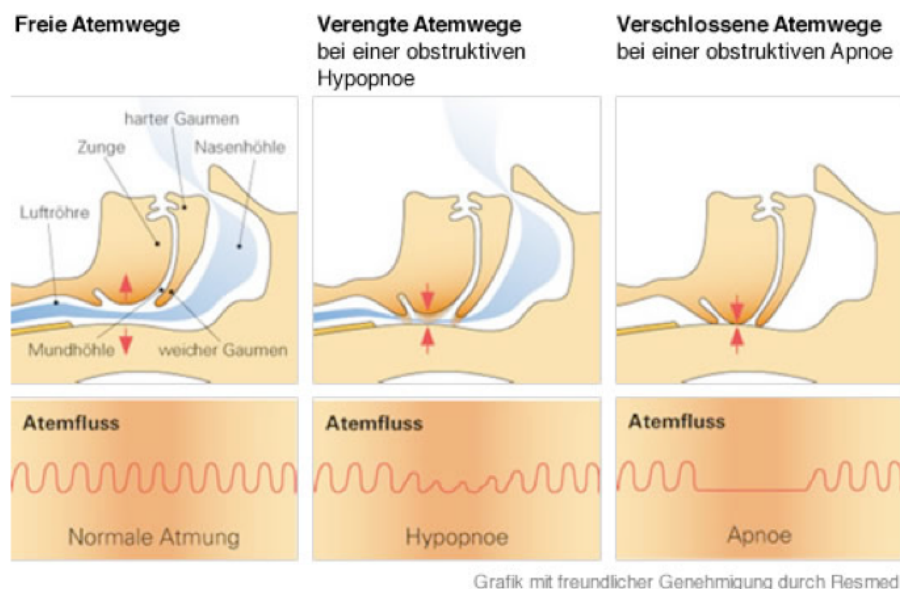
Vier Phasen des Schluckvorganges werden unterschieden:

- **Vorbereitungsphase** durch Beissen, Kauen und Formen des Speisebolus
- **Orale Transportphase** bis zum Gaumenbogen (z.T. willkürlich), dauert ca. 1 s
- **Pharyngeale Phase** mit Transport bis zum Ösophaguseingang (unwillkürlich), dauert ca. 1 s
- **Ösophageale Phase** mit Transport in den Magen (unwillkürlich), dauert zwischen 4-20 s

Mundhöhle

Der **Schluckreflex** wird durch die auf dem Zungengrund gelandete Nahrung ausgelöst, was zum Abschluss des Nasenrachenraumes führt. Die Mundhöhle hat zusätzlich eine **Abwehrfunktion** (Tonsillen), und sie beinhaltet mit den entsprechenden Rezeptoren auf der Zunge den **Geschmackssinn** (süss, sauer, salzig, umami [„wohlgeschmeckend, herzhaft, würzig, fleischig“]).

Pathophysiologisch sind im Rahmen der Atmungsfunktion die Tonsillen und Tumoren relevant. **Vergrösserte Tonsillen**, wie auch **Tumoren**, können die Atmung beeinträchtigen, insbesondere können vergrösserte Tonsillen schon im Kindesalter zu einem obstruktiven Schlafapnoe-Syndrom führen. Auch ein Zurückfallen der Zunge mit zeitweisem Verschluss des Rachenraumes während des Schlafes kann zu einem obstruktiven Schlafapnoe-Syndrom führen (vgl. auch Vorlesung der Kliniker^M).



Obstruktive Schlafapnoe bei Verschluss des Rachenraumes.

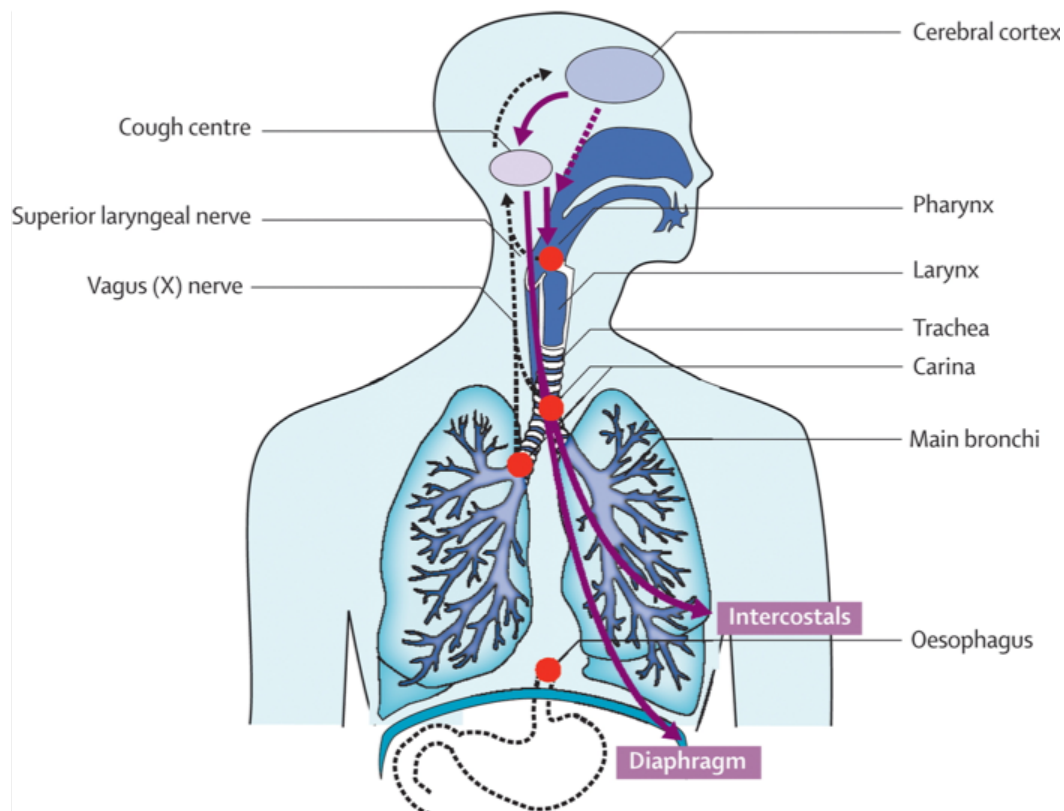
Pharynx und Larynx

Pharynx und Larynx haben wichtige Funktionen im Rahmen der Atmung. Sowohl der Schluckreflex wie auch der Hustenreflex bilden eine **Schutzfunktion für die Atemwege**.

Beim **Schluckreflex** schliessen sich der Nasenrachenraum durch **Anheben des**

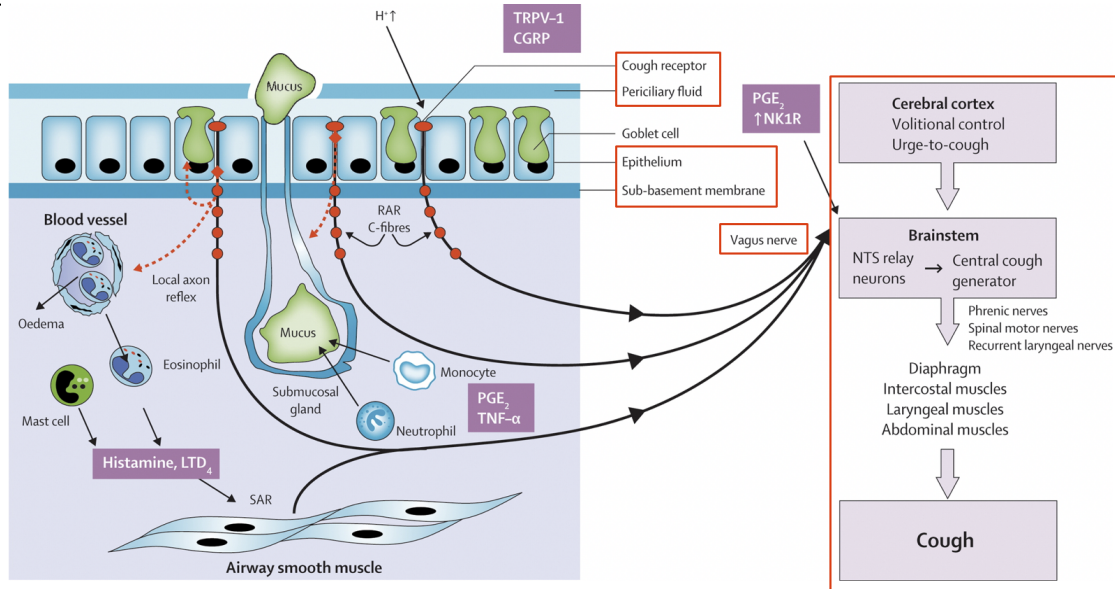
weichen Gaumens an die Rachenhinterwand und der Kehlkopfeingang durch **Höhertreten des Kehlkopfes** und damit Druck des Zungengrundes auf die Epiglottis, die sich vor den Kehlkopfeingang legt. Die **Stimmlippen**, welche bei Atmung und Phonation geöffnet sind, verschliessen jetzt die Glottis. Der Speisebrei wird über die Recessus piriformes durch Kontraktion des M. constrictor pharyngis in den Anfangsteil des Ösophagus geschluckt und gelangt schlussendlich durch die peristaltischen Kontraktionen der Ösophaguswand in den Magen.

Der **Hustenreflex** wird ausgelöst, sobald ein Fremdkörper in den Kehlkopf oder die Trachea gelangt. Der Reflex beinhaltet eine komplexe Abfolge atmungsrelevanter Vorgänge, welche zentral durch das im oberen Bereich des Hirnstamms und im Pons gelegene **Hustenzentrum** koordiniert werden.



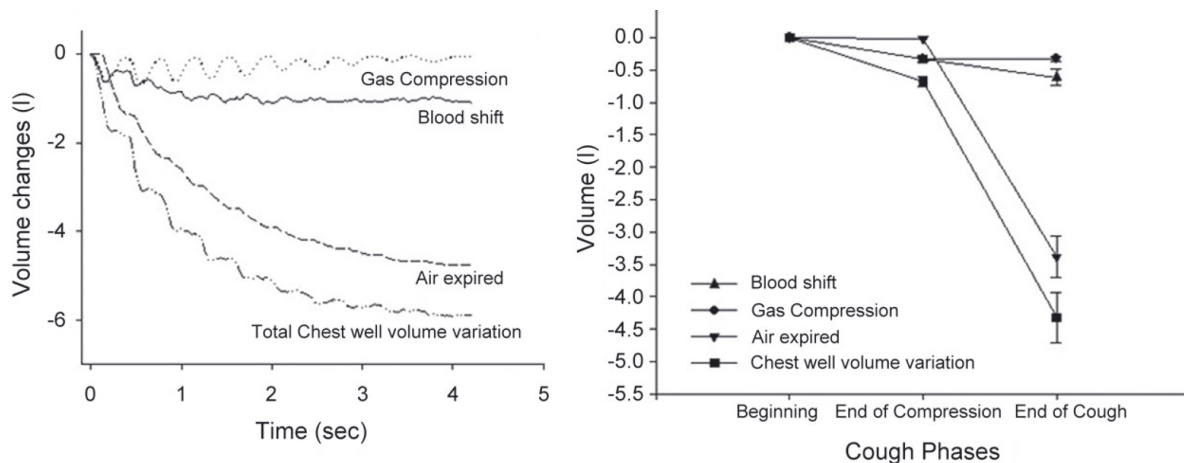
Afferente und efferente Äste des Hustenreflexes im Überblick. Quelle: Chung und Pavord, Lancet, 2008.

Zunächst führen **Afferenzen**, d.h. sensorische Fasern vom Flimmerepithel, über den N. vagus zur Medulla. Auch kardiale, oesophageale und andere Anteile des N. vagus können einen Hustenreflex auslösen. Zu den **Efferenzen** gehören einerseits Fasern des N. vagus, die den Larynx innervieren, andererseits werden Zwerchfell, in- und expiratorische Muskeln über N. vagus, N. phrenicus und motorische Nerven innerviert. Der Hustenreflex steht aber auch unter Einfluss des Cortex, denn wir können das Husten willentlich (bis zu einem gewissen Grad) unterdrücken. Die folgende Abbildung zeigt diese Prozesse detailliert, wobei die rot eingerahmten Aspekte aktuell relevant sind.



Afferente und efferente Äste des Hustenreflexes im Detail. Merken Sie sich die rot eingerahmten Strukturen und Vorgänge. Quelle: Chung und Pavord, Lancet, 2008.

Atemmechanisch läuft während des Hustenreflexes folgendes ab (illustriert in der Abbildung unten): Nach einer initialen **Inspirationsphase** (Einatmung mittels Zwerchfell und externer Interkostalmuskulatur) erfolgt der Verschluss der Glottis (Larynx), und die Aktivierung der Ausatemmuskulatur (interne Interkostalmuskulatur, Abdominalmuskulatur). Es folgt die **Kompressionsphase** mit einem Druckaufbau innerhalb des Thorax und somit innerhalb der Lunge, das Atemgas in der Lunge wird komprimiert, das Volumen des Thorax verringert sich, während noch kein Atemgas ausgeatmet wird. Durch den erhöhten Druck wird auch das intrathorakale Blutvolumen reduziert. Die **Expirationsphase** startet mit dem Öffnen der Glottis, wodurch ein hoher expiratorischer Atemfluss entsteht, der zum „Mitreissen“ und Entfernen von Mukus und/oder einem allfälligen Fremdkörper aus den trachea-bronchialen Arealen führt.

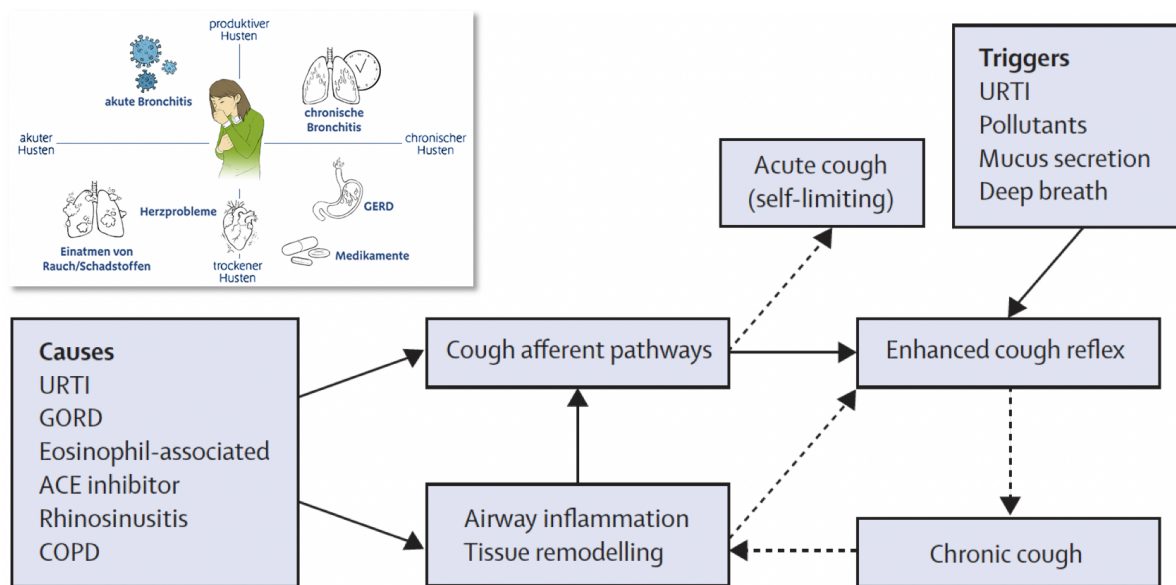


Veränderungen des Thoraxvolumens (chest wall volume), des Volumens der ausgeatmeten Luft (am Mund integrierter Atemfluss; air expired), des Blutvolumens im Thorax (blood shift), sowie des Gasvolumens (gas compression, aufgrund der sich verändernden Druckverhältnisse innerhalb des Thorax). Links: Veränderungen der Volumina im Laufe von ca. 10 Hustenstößen, alle während einer Ausatemungsphase. Rechts: Veränderungen der Volumina während einem Hustenstoß. Quelle: Smith et al., J Physiol, 2012.

Pathophysiologisch können unterschiedliche Ursachen zu akutem oder auch chronischem Husten führen (vgl. auch Vorlesungen der Kliniker^M). Landesabhängig leiden bis zu 18% der Bevölkerung an chronischem Husten (CH: ca. 9% der Raucher, 3% der Nichtraucher). Häufige Ursachen sind:

- **akute Infektionen:** z.B. Tracheobronchitis, Lungenentzündung oder Keuchhusten
- **chronische Entzündungen:** z.B. Bronchiektasen, zystische Fibrose oder Tuberkulose
- **Atemwegserkrankungen:** z.B. Asthma, chronische Bronchitis, sog. chronischer postnasaler Drip
- **Tumoren** in Atemwegen und/oder Lunge
- **Fremdkörper** in Atemwegen und/oder Lunge
- **Reizung des äusseren Gehörgangs**
- **Kardiovaskuläre Erkrankungen:** z.B. Herzinsuffizienz, Lungenembolie, Aortenaneurisma
- **Weitere Erkrankungen:** z.B. Reflux Oesophagitis
- **Medikamente:** z.B. ACE-Hemmer (angiotensin-converting enzyme Hemmer → Bradykinin-Konzentration ↑)

Die folgende Abbildung illustriert die an der Entstehung eines chronischen Hustens beteiligten Mechanismen.

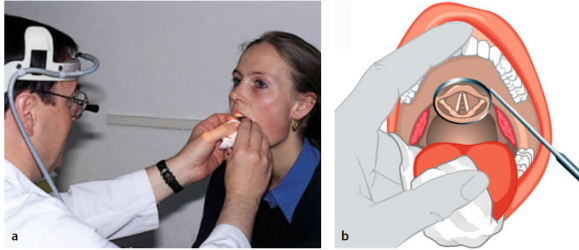


Entstehung des chronischen Hustens (circulus vitiosus). URTI: upper respiratory tract infection, GORD: gastro-oesophageal reflux, COPD: chronic obstructive pulmonary disease. Quelle: Chung und Pavord, Lancet, 2008.

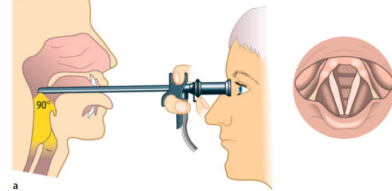
Den **Stimmlippen** kommt im Rahmen der **Atmung** eine besondere Bedeutung zu, denn während der Inspiration sind sie geöffnet, während der Expiration hängt der Öffnungszustand davon ab, ob die Person ruhig oder stark atmet, oder ob sie spricht oder singt (**Phonation**), was den Atemstrom drosselt. Letzteres wird besonders deutlich bei intensiver körperlicher Aktivität, die es – aufgrund der Notwendigkeit grosser Atemflüsse – nicht mehr erlaubt, zu sprechen.

Die Stimmlippen und der Larynx können mit verschiedenen sogenannten Laryngoskopen / Endoskopen visualisiert werden.

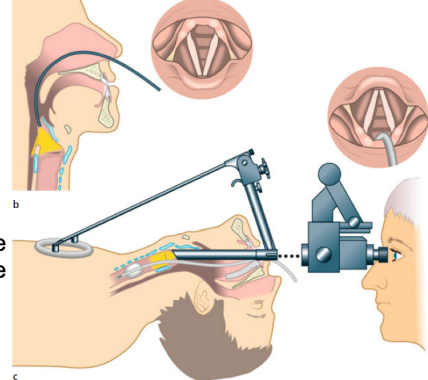
Spiegellaryngoskopie



Lupenlaryngoskopie



Flexible Endoskopie



Direkte Laryngoskopie
zur Mikrochirurgie

Unterschiedliche Laryngoskope zur Visualisierung des Kehlkopfes. Quelle: Lenarz, Boenninghaus. HNO. Springer Verlag.

Nachfolgender Filmausschnitt veranschaulicht die Aktivität der Stimmlippen bei der Phonation.

A video element has been excluded from this version of the text. You can watch it online here:
<https://wp-prd.let.ethz.ch/WP0-CIPRF9683/?p=40>

Quelle: Youtube (www.youtube.com/watch?v=-XGds2GAvGQ)

Pathophysiologisch können sich **Knötchen**, z.B. durch Überbeanspruchung, **Polypen** oder **Tumoren** auf den Stimmlippen bilden, was zu **Heiserkeit** und je nach Grösse, auch zu **Atemnot / Dyspnoe** führen kann. Auch als Folge einer Intubation (Beatmungsschlauch durch den Mund, Pharynx und Larynx in die Trachea) kann eine Funktionsstörung oder Schädigung der Stimmlippen auftreten, die (meist vorübergehend) zu Heiserkeit führt.



Knötchen auf den Stimmbändern. Quelle: Lenarz, Boenninghaus. HNO. Springer Verlag.

Gutartige Veränderungen können funktionell therapiert werden (vgl. nachfolgender Filmausschnitt), während fortgeschrittene, bösartigen Tumoren bis zu einer Laryngektomie (totale Entfernung des Kehlkopfes) führen können.

A video element has been excluded from this version of the text. You can watch it online here:
<https://wp-prd.let.ethz.ch/WP0-CIPRF9683/?p=40>

Quelle: Mayo Clinic (www.youtube.com/watch?v=hBdRdo3zcSs)

Ein **funktionelles Stimmlippen-Problem** ist die sogenannte **Vocal Cord**

Dysfunction, eine Adduktion der Stimmbänder während der Inspiration oder während des ganzen Atemzyklus. Sie führt zu einem sogenannten **Stridor**, einem pathologischen Atemgeräusch, während der Phase, in der die Stimmbänder pathologisch eng gestellt sind. Die Vocal Cord Dysfunction wird manchmal, speziell auch im Kontext von körperlicher Aktivität, mit (Leistungs)-Asthma verwechselt (das in erster Linie expiratorische Veränderungen erzeugt). Eine Extremform der Dysfunktion ist der Laryngospasmus.

A video element has been excluded from this version of the text. You can watch it online here:
<https://wp-prd.let.ethz.ch/WP0-CIPRF9683/?p=40>

Quelle: Youtube (www.youtube.com/watch?v=gmNwpJf1zUQ)

Der folgende Film zeigt - zur Illustration - den Weg vom Mund bis in die Trachea anhand einer Intubation.

A video element has been excluded from this version of the text. You can watch it online here:
<https://wp-prd.let.ethz.ch/WP0-CIPRF9683/?p=40>

Quelle: New England Journal of Medicine

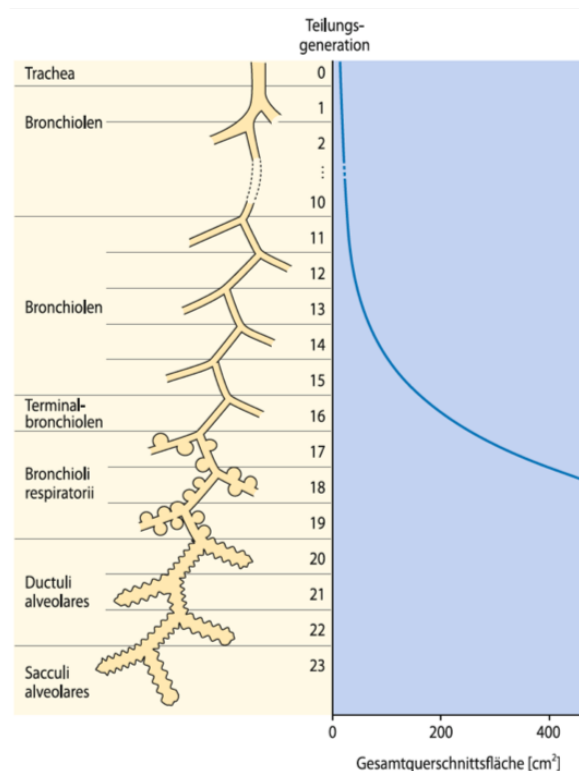
in brief

- In der **Mundhöhle** wird der Schluckreflex ausgelöst (2 v. 4 Phasen), welcher mit der Atmung interagiert. Die Tonsillen haben Abwehrfunktion.
- **Pathophysiologisch** behindern vergrösserte Tonsillen und Tumoren die Atmung. Während des Schlafes können vergrösserte Tonsillen oder das Zurückfallen der Zunge zu obstruktiver Schlafapnoe führen.
- **Pharynx und Larynx** sind am Schluck- wie auch am Hustenreflex beteiligt. Die Stimmlippen sind während der Einatmung weit geöffnet, während der Ausatmung hängt die Öffnung von deren Funktion ab (Phonation, eng; verstärkte Atmung, weit).
- **Pathophysiologisch** führen Knötchen, Polypen oder Tumoren auf den Stimmlippen, aber auch eine Funktionsstörung nach Intubation oder eine funktionelle Dysfunktion (VCD, Spasmus) zu Heiserkeit und/oder Dyspnoe oder zu einem Stridor. Unterschiedliche Ursachen können zu akutem (Fremdkörper, Atemwegsinfektion, Reizung des Gehörgangs, Herzstolpern, Medikamente) oder chronischem (Atemwegsinfektion, chronische Bronchitis, Asthma, COPD, kardiovaskuläre Erkrankungen, Tumoren, Reflux, ACE-Hemmer) Husten führen.
- Die **Untersuchung** dieser Abschnitten erfolgt hauptsächlich optisch oder mit bildgebenden Verfahren.

Trachea und Bronchien

Über die **Trachea** gelangt die Luft in die beiden **Hauptbronchien** und verteilt sich dann auf die immer feineren Verzweigungen des Bronchialbaums. Bis zu den **Terminalbronchiolen** der 16. Teilungsgeneration hat das Atemwegssystem vorwiegend eine **Leistungsfunktion**. Daran schließen sich die **Bronchioli respiratorii** an (17.-19. Genera-

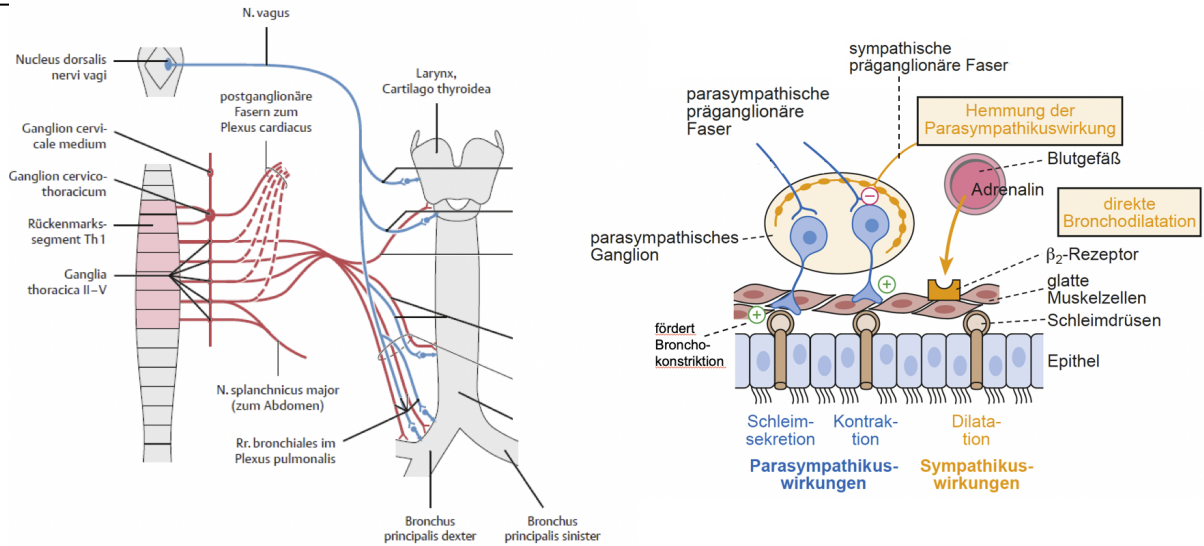
tion), in deren Wänden bereits einige Alveolen vorkommen. Mit der 20. Aufzweigung beginnen die **Alveolargänge** (Ductuli alveolares), die mit Alveolen dicht besetzt sind. Dieser Bereich, der überwiegend dem Gasaustausch dient, wird als **Respirationszone** bezeichnet.



Aufzweigungen des Atemwegssystems (links) mit der Kurve des Gesamtquerschnitts (rechts), die den einzelnen Teilungsgenerationen zugeordnet sind. Man erkennt die starke Zunahme des Atemwegsquerschnitts in der Übergangszone, die sich in der Respirationszone weiter fortsetzt.
Quelle: Schmidt et al, Physiologie des Menschen, Springer-Verlag.

Auch die **Bronchien** sind mit Flimmerepithel ausgekleidet und mit zahlreichen mukösen Drüsen ausgestattet. Diese Drüsen sezernieren viskösen Schleim, an dem Fremdkörper (z.B. Staubpartikel) haften. Die Zilien des Flimmerepithels schlagen 12 - 20-mal/s und bewegen den Schleim mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 cm/min auf einem vom Epithel sezernierten Flüssigkeitsfilm in Richtung Mundhöhle (**mukoziliärer Transport**). Dieser Prozess, ist u.a. bei zystischer Fibrose (auch Mukoviszidose genannt) und bei starken Rauchern gestört. Die Schleimproduktion (ca. 10 - 100 ml/d) ist abhängig von lokalen Reizen (z.B. Rauch) und von der vagalen Stimulation. Der Schleim wird gewöhnlich verschluckt und die Flüssigkeit im Magen-Darm-Trakt resorbiert, oder er wird abgehustet (Schutzreflex).

Die Weite der Bronchien wird über den Kontraktionsgrad der glatten Bronchialmuskulatur bestimmt. Sie steht unter Kontrolle des vegetativen Nervensystems. Unter dem Einfluss des **Sympathikus** (Noradrenalin, β_2 -Rezeptoren) kommt es zu einer Erschlaffung der glatten Bronchialmuskulatur und damit zu einer Erweiterung der Bronchien (**Bronchodilatation**). Der **Parasympathikus** (Acetylcholin, muskarinische Rezeptoren) bewirkt eine Kontraktion der glatten Muskulatur, wodurch die Bronchien verengt werden (**Bronchokonstriktion**), bei Ruheatmung in der späten Expirationsphase.

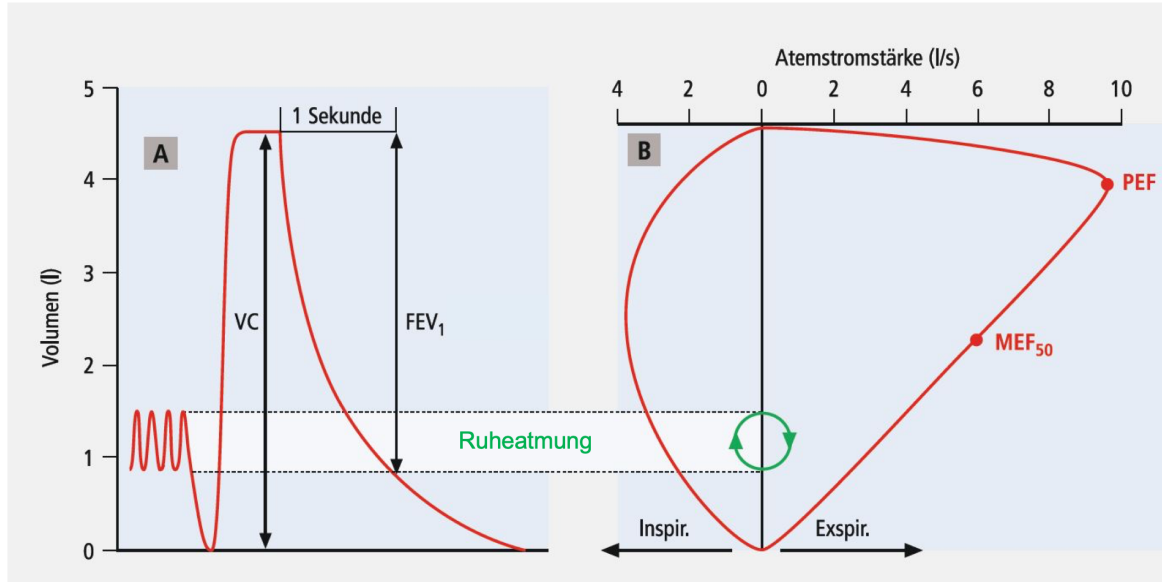


Vegetative Innervation der Bronchien. Quelle: Fahlke et al, Taschenatlas Physiologie, Elsevier-Verlag

Auch **Entzündungsmediatoren** (z.B. Histamin, Leukotrien D_4) und **Allergene**, die u.a. eine Histamin-Freisetzung bewirken, führen zu einer Bronchokonstriktion.

Eine **pathophysiologische Verengung** (Obstruktion) durch Bronchokonstriktion findet sich u.a. bei **Asthma** oder chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (**COPD**). Diese Bronchokonstriktion kann, je nach Ursache, mittels β_2 -Rezeptor-Agonisten, Muskarin-Rezeptor-Antagonisten und/oder Leukotrienrezeptor-Antagonisten behandelt werden. Allergische Reaktionen, v.a. auch der oberen Atemwege, können mit Histamin-Rezeptor-Antagonisten behandelt werden. (Details vgl. Vorlesung der Kliniker(innen)^M). Auch **Tumoren** oder inhalierte Gegenstände (Erdrüsschen) führen zu einer Obstruktion der Atemwege.

Diagnostisch kann die Funktion der Atemwege mittels einer forcierten Spirometrie untersucht werden (vgl. Kapitel Diagnostik des Atmungssystems - *Lungenfunktion (statisch und dynamisch)*^M). Dabei wird die Person angehalten, nach vollständiger Einatmung explosiv, so rasch wie möglich und so vollständig wie möglich auszuatmen. Anhand der Veränderung des Atemflusses in Abhängigkeit des Volumens, wird eine Obstruktion ersichtlich.



VC: Vitalkapazität

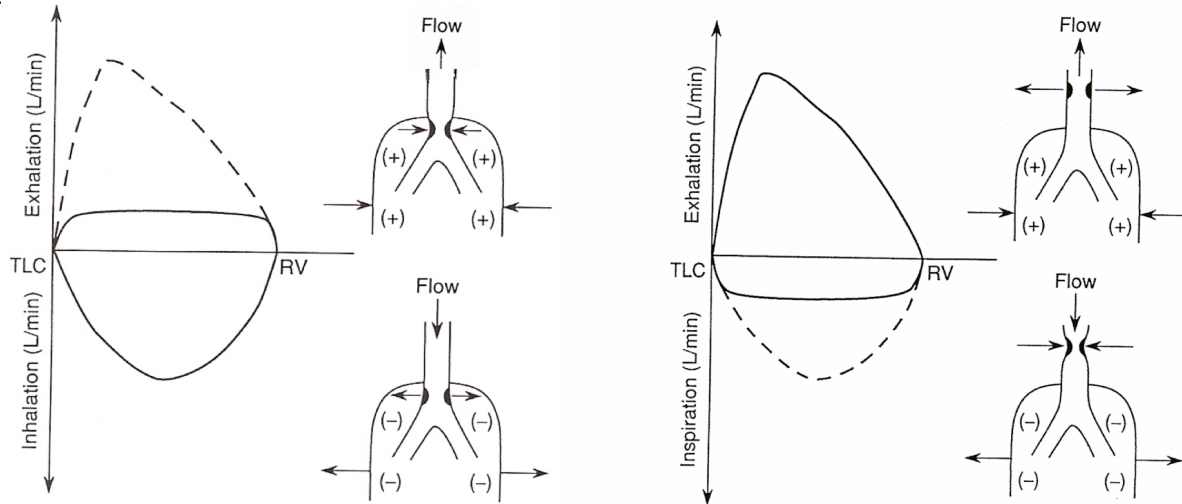
FEV₁: in der 1. Sekunde ausgeatmetes Volumen

PEF: maximale Atemstromstärke (peak expiratory flow rate)

MEF₅₀: Atemstromstärke bei 50 % der Vitalkapazität

Forcierte Spirometrie. A: Volumen-Zeit-Diagramm. B: Fluss-Volumen-Diagramm. Quelle: Vaupel et al. Anatomie, Physiologie, Pathophysiologie. Wiss. Verlagsges. (modifiziert)

Die folgende Abbildung zeigt schematisch, aufgrund welcher physikalischer Gegebenheiten eine **intrathorakale Atemwegs-Obstruktion** (innerhalb des Thorax befindliche Verengung der Atemwege), **resp. extrathorakale Atemwegs-Obstruktion** (Verengung Atemwege ausserhalb des Thorax) den expiratorischen Atemfluss (flow nach oben), resp. inspiratorischen Atemfluss (flow nach unten) unterschiedlich beeinträchtigt. Wir sehen zum **Beispiel** in der Abbildung unten links, dass **bei der forcierten Expiration** (hier Exhalation) innerhalb des Thorax ein grösserer Druck (+) entsteht, wenn die Ausatemungsmuskeln bei der forcierten Expiration kontrahieren (Pfeile von aussen gegen den Thorax gerichtet). Dieser positivere Druck innerhalb des Thorax (und dehalb auch hinnerhalb der Atemwege) führt zu einem Druckgefälle zur Umgebung (ausserhalb des Mundes) und es resultiert ein expiratorischer Fluss (flow nach oben). Durch den positiven Druck innerhalb des Thorax werden jedoch auch die **intrathorakalen Atemwege von aussen zusammengedrückt**, sodass sich eine Obstruktion der Atemwege (hier als Tumor innerhalb der Atemwege gezeichnet) stärker auf den maximal produzierbaren Fluss auswirkt und dieser behindert wird (Abflachung der Kurve). Im Gegensatz dazu werden, wie in der Abbildung unten rechts dargestellt, die **extrathorakalen Atemwege** durch den positiven Druck, der bei der forcierten Expiration innerhalb der Atemwege entsteht, **von innen auseinandergedrückt**, sodass sich eine extrathorakale Atemwegsobstruktion wenig(er) bemerkbar macht. Genau umgekehrt sind die Beeinträchtigungen des Flusses während der Inspiration: intrathorakale Obstruktionen zeigen sich wenig(er), extrathorakale hingegen mehr.



Schematische Darstellung der Veränderung des Fluss-Volumen-Diagramms bei intra-thorakaler (links) und extra-thorakaler (rechts) Obstruktion. Die horizontalen Pfeile zeigen die Kräfte, welche auf die entsprechenden Strukturen wirken während Inspiration, resp. Expiration. (+) und (-) zeigen den intrathorakalen Druckunterschied relativ zum Umgebungsdruck. Quelle: L.K. Davies, MD.

in brief

- Die **Bronchien und Bronchiolen** leiten die Luft zur Respirationszone und zurück. Dank schleimproduzierenden Drüsen und Flimmerepithel entsteht ein mukoziliärer Transport von Reiz- und Fremdstoffen zur Mundhöhle. Die Bronchienweite wird mittels sympathischer (Bronchodilatation) und parasympathischer (Bronchokonstriktion) Innervation der glatten Muskulatur reguliert und durch weitere Faktoren (z.B. Entzündungsmediatoren) beeinflusst.
- **Pathophysiologisch** kann eine Verengung der Atemwege durch Bronchokonstriktion (Asthma, COPD, Allergene etc.) oder weitere Faktoren (Fremdkörperinhalation, Tumoren etc.) entstehen. Bei vorhandener Bronchokonstriktion kann eine Dilatation durch β_2 -Agonisten oder Muskarin-Rezeptor-Antagonisten erwirkt werden.
- **Diagnostisch** werden je nach vermuteter Ursache Lungenfunktionstests, optische (Fremdkörper, Tumoren) oder bildgebende Verfahren (Tumoren, Gewebsveränderungen) eingesetzt. Der Lungenfunktionstest dient auch der Differenzierung von intra- und extrathorakalen Obstruktionen der Atemwege.

Zur Illustration zeigt der folgende Film die Durchführung eines Lungenfunktionstests mit einer Patientin, die an zystischer Fibrose leidet, einer Erkrankung, welche zu einer fibrotischen Veränderung der Lunge führt. Dies führt zu einer Restriktion (nicht mehr vollständig expandierbare Lunge), längerfristig jedoch auch zu einer Obstruktion (Atemwegsveränderungen, u.a. auch durch rezidivierende Bronchitis, Bronchiektasen, vgl. Klinik).

A video element has been excluded from this version of the text. You can watch it online here:

<https://wp-prd.let.ethz.ch/WP0-CIPRF9683/?p=40>

Study Questions

- Welche typischen Eigenschaften haben die luftleitenden Atemwege und welche anatomischen Strukturen gehören dazu?
- Wie nennt man das in den luftleitenden Atemwegen enthaltene Luftvolumen?
- Weshalb werden im Winter die luftleitenden Atemwege mehr gereizt? – Was könnte dies für eine pathophysiologische Bedeutung haben?
- Welches sind die typischen Techniken zur Visualisierung der Atemwege?
- Auf welche verschiedenen Arten kann der Luftstrom der luftleitenden Atemwege physiologisch und pathophysiologisch verändert werden?
- Welche Reflexe der luftleitenden Atemwege sind überlebenswichtig, was sind Auslöser und was die Effekte?
- Weshalb (physiologisch betrachtet) ist das Essen beim Rennen schwieriger als beim Gehen? Zu welcher subjektiven Wahrnehmung führt Essen beim Rennen?
- Weshalb führen ACE-Hemmer zu Husten? (vgl. z.B. Up-To-Date)
- Wie wird die Weite der Bronchien reguliert und welche medikamentösen Mechanismen können diese beeinflussen? Bei welchen Krankheiten werden diese Medikamente eingesetzt?
- Wie interpretieren Sie die Fluss-Volumen-Kurve der CF-Patientin? Welche anatomisch-physiologischen Aspekte bestimmen die Form einer solchen Kurve?

Zum Kapitel [Study Questions & Answers – Atmungssystem](#)