

Reinhard Larsen

Thomas Ziegenfuß

Beatmung

Grundlagen und Praxis

Reinhard Larsen
Thomas Ziegenfuß

Beatmung

Grundlagen und Praxis

Mit 112 Abbildungen

4., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage

Prof. Dr. med. Reinhard Larsen

Direktor der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie
der Universitätskliniken des Saarlandes
Gebäude 57
66421 Homburg/Saar

Dr. med. Thomas Ziegenfuß

Chefarzt der Abteilung für Anästhesie und Intensivmedizin
St. Josef Krankenhaus Moers
Asberger Str. 4
47441 Moers

Ihre Meinung interessiert uns: www.springer.com/978-3-540-88811-6

ISBN-13 978-3-540-88811-6 4. Auflage 2009 Springer Medizin Verlag Heidelberg
ISBN 3-540-40775-8 3. Auflage 2004 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer Medizin Verlag

springer.de

© Springer Medizin Verlag Heidelberg 1997, 1999, 2004, 2009

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Produkthaftung: Für Angaben über Dosierungsanweisungen und Applikationsformen kann vom Verlag keine Gewähr übernommen werden. Derartige Angaben müssen vom jeweiligen Anwender im Einzelfall anhand anderer Literaturstellen auf ihre Richtigkeit überprüft werden.

Planung: Ulrike Hartmann

Projektmanagement: Gisela Schmitt

Copy-Editing: Michaela Mallwitz, Tairnbach

Layout und Umschlaggestaltung: deblik Berlin

Satz: Fotosatz-Service Köhler GmbH – Reinhold Schöberl, Würzburg

SPIN: 11306245

Gedruckt auf säurefreiem Papier 2122 – 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur 4. Auflage

Ein Praxisbuch lebt von der Aktualität!

Für die Neuauflage wurden daher sämtliche klinisch wichtigen Erkenntnisse und praktischen Fortschritte der Beatmungstherapie in die entsprechenden Kapitel aufgenommen. Eine herausragende Rolle spielt dabei die lungenprotektive Beatmung, deren Vorteile und Nutzen beim akuten Lungenversagen kaum noch strittig sind, jedoch noch nicht im erforderlichen Umfang eingesetzt werden. Gleichzeitig wurden inzwischen veraltete Konzepte gestrichen, so dass der Umfang des Buches nicht wesentlich zugenommen hat.

Insgesamt möchten wir unseren Lesern mit dem Buch den notwendigen Kenntnisstand für die moderne Atemtherapie und Beatmungspraxis zusammen mit einer kritischen, evidenzbasierten Bewertung ihrer Vor- und Nachteile vermitteln.

An dieser Stelle danken wir unseren zahlreichen Lesern für die wertvollen Hinweise und Verbesserungsvorschläge. Ebenso danken wir den Mitarbeitern des Springer-Verlags, allen voran Frau Ulrike Hartmann, für die engagierte Unterstützung bei der Neuauflage. Wir freuen uns auch bei der 4. Auflage über kritische und konstruktive Hinweise unserer Leser und wünschen ihnen eine erkenntnisreiche Lektüre!

Homburg und Moers im März 2009

Reinhard Larsen

Thomas Ziegenfuß

Vorwort zur 1. Auflage

Dass die Menschen so oft falsche Urteile fällen, rührt gewiss nicht allein aus einem Mangel an Einsicht und Ideen her, sondern hauptsächlich davon, dass sie nicht jeden Punkt im Satz unter das Mikroskop bringen und bedenken.

Lichtenberg (1778), Sudelbücher, Nr. 864

Die maschinelle Beatmung, früher ein eher einfacher mechanischer Vorgang, hat sich dank neuer Respiratortechnologie und einer Vielzahl unterschiedlicher Beatmungsmodi, zu einer komplexen therapeutischen Maßnahme entwickelt, die vom Intensivmediziner ein umfassendes Verständnis der Grundlagen, Prinzipien und Differenzialindikationen verlangt. Diese Grundvoraussetzung jeder praktischen Beatmungstherapie kann heutzutage nicht mehr, gleichsam nebenbei am Krankenbett, erworben werden, sondern bedarf eines intensiven Studiums und Selbstdenkens. Das vorliegende Buch soll nach dem Willen der Autoren den Weg dorthin aufzeigen und zum »Gebrauch der eigenen Augen«, sprich, zum Lernen durch sorgfältige Beobachtung und praktisches Tun anregen.

Das Buch ist eine systematische Einführung in die maschinelle Beatmung und Atemunterstützung des Intensivpatienten, ein Lehr- und Lernbuch, das dem Leser in leicht verständlicher Weise, ausgehend von den anatomischen, physiologischen und pathophysiologischen Grundlagen, das zwingend erforderliche Rüstzeug für die Praxis der Beatmung auf der Intensivstation und im Operationssaal vermittelt. Im praktischen Teil des Buches, der angewandten Atem- und Beatmungstherapie, werden die Einteilung und Klassifizierung der Beatmungsgeräte und Beatmungsformen dargestellt, gefolgt von einer ausführlichen Beschreibung der Einstellgrößen am Respirator, der Standardformen der Beatmung, der alternativen Beatmungsformen und schließlich der derzeit als unkonventionell eingestuften Verfahren der Atemunterstützung, bis hin zu den adjuvanten Maßnahmen wie Überwachung der Beatmung, Lungenpflege, fiberoptische Bronchoskopie und Thoraxdrainagen. Ein weiterer praktischer Teil des Buches befasst sich mit der Atemunterstützung und Beatmung bei typischen respiratorischen Erkrankungen und Störungen wie ARDS, akute Dekompensation bei COPD, Status asthmaticus und Thoraxtrauma. Im vierten und letzten Teil schließlich werden spezielle Beatmungsprobleme dargestellt: Beatmung bei Schädel-Hirn-Trauma und erhöhtem intrakraniellen Druck, Beatmung von Kindern, Narkosebeatmung und die postoperative Routinebeatmung.

Es war unsere Absicht, ein umfassendes, aber dennoch kompaktes Lehrbuch für die Kitteltasche vorzulegen, in dem die maschinelle Beatmung und Atemunterstützung auf der Grundlage gesicherter physiologischer und klinischer Untersuchungen dargestellt und dem Intensivmediziner praktische Leitlinien für seine Tätigkeit auf der Intensivstation an die Hand gegeben werden. Daher haben wir uns nicht nur auf unsere eigene intensivmedizinische Erfahrung gestützt und neue Blicke durch alte Löcher geworfen, sondern, neben den aktuellen Erkenntnissen der wissenschaftlichen Literatur und der intensivmedizinisch tätiger Kollegen, wenn immer möglich, die Empfehlungen von Konsensuskonferenzen zur Klassifizierung von Respiratoren, Beatmungsformen und zur Therapie respiratorischer Erkrankungen berücksichtigt, wohl wissend, dass es sich hierbei nicht selten um vorläufige Leitlinien handelt, die weiterentwickelt und dem jeweiligen wissenschaftlichen Erkenntnisstand angepasst werden müssen.

Das Buch wendet sich an alle Ärzte, die Intensivpatienten betreuen, seien es Anästhesisten, Chirurgen, Neurochirurgen, Internisten, Neurologen und Pädiater; weiterhin an Ärzte in Weiterbildung, die sich mit Fragen der Atemunterstützung und Beatmung befassen wollen; und nicht zuletzt an alle auf den verschiedenen Intensivstationen und in anästhesiologischen Operationsbereichen tätigen Schwestern und Pfleger. Die Gruppe der Fachschwestern und -pfleger für Intensivmedizin bedarf, wie die Ärzte, einer speziellen Unterweisung in der maschinellen Beatmung sowie der unterstützend und ergänzend eingesetzten respiratorischen Therapiemaßnahmen einschließlich derer spezifischer Auswirkungen und Gefahren. Denn gerade die Mitglieder dieser Gruppe sind es, die während ihrer

kontinuierlichen Anwesenheit am Bett des beatmeten Patienten die Funktion des Respirators überwachen, bedrohliche Komplikationen rechtzeitig erkennen und besonders die respiratorische Therapie einschließlich der unterstützenden Maßnahmen umsetzen müssen. Für sie soll das vorliegende Buch als Ausbildungsgrundlage dienen, aber auch zum (zugegeben nicht ganz einfachen) Selbststudium anregen.

Die Autoren danken sehr herzlich Frau Kerstin Rupp, Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin der Universitätskliniken des Saarlandes, für die perfekte EDV-Erfassung des Manuskripts und die unermüdliche Hilfe bei der Korrektur des Umbruchs, Herrn Victor Oehm, Springer Verlag, für die nie nachlassende Unterstützung und empathische Begleitung bei der Verwirklichung des Textes sowie Herrn J. Sydor, Springer Verlag, für stets kompetente, reibungslose und angenehme Zusammenarbeit bei der Herstellung des Buches.

R. Larsen
T. Ziegenfuß
Homburg, im Juli 1997

Inhaltsverzeichnis

1	Anatomie der Atmungsorgane	1	15	Auswirkungen und Komplikationen der Beatmung	275
2	Physiologie der Atmung	18	16	Überwachung der Beatmung	295
3	Blutgase	54	17	Analgesie, Sedierung und Muskel- relaxierung	316
4	Säure-Basen-Haushalt	69	18	Lungenpflege	328
5	Respiratorische Insuffizienz – Allgemeine Pathophysiologie	84	19	Fiberoptische Bronchoskopie	342
6	Endotracheale Intubation	97	20	Thoraxdrainagen	348
7	Tracheotomie	131	21	Akutes Lungenversagen (ARDS)	358
8	Klassifizierung und Steuerungs- prinzipien der Beatmungsgeräte	146	22	Akute respiratorische Insuffizienz bei chronisch-obstruktiver Lungen- erkrankung (COPD)	376
9	Einteilung und Klassifikation der Beatmungsformen	160	23	Status asthmaticus	393
10	Einstellgrößen am Beatmungsgerät	171	24	Beatmung beim Thoraxtrauma	403
11	Standardformen der Beatmung	191	25	Beatmung bei Schädel-Hirn-Trauma und erhöhtem intrakraniellm Druck	411
12	Alternative Beatmungsformen	210	26	Beatmung von Kindern	416
13	Unkonventionelle Verfahren der respiratorischen Unterstützung	249	27	Intra- und postoperative Beatmung	424
14	Praxis der Beatmung	259		Stichwortverzeichnis	433

Anatomie der Atmungsorgane

1.1 Atemwege – 2

1.1.1 Trachea – 2

1.1.2 Extrapulmonale Hauptbronchen – 3

1.2 Lungen – 4

1.2.1 Lungenlappen – 4

1.2.2 Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia – 4

1.2.3 Lungenläppchen, Lobuli pulmonalis – 6

1.2.4 Azinus – 7

1.2.5 Bronchialbaum der Lunge – 7

1.2.6 Alveolen, Ort des Gasaustausches – 10

1.2.7 Blutgefäßsystem der Lunge – 13

1.2.8 Innervation der Lunge – 14

1.3 Pleura und Pleurahöhlen – 14

1.3.1 Lungen- und Pleuragrenzen – 15

1.4 Thoraxskelett – 16

1.5 Atemmuskulatur – 16

Literatur – 17

Die Atmungsorgane bestehen aus den Atemwegen und den Lungen. Wichtigste Funktion der Atmungsorgane ist die **äußere Atmung**, die Aufnahme von Sauerstoff und die Abgabe von Kohlendioxid. Hierbei dienen die Atemwege dem Transport der Atemgase sowie der Reinigung, Anfeuchtung und Erwärmung der Inspirationsluft, weiterhin der Laut- und Sprachbildung. Der Austausch der Atemgase erfolgt in den Alveolen durch Diffusion, der Gaswechsel durch Volumenänderungen der Lunge. Dieser Vorgang wird als **Ventilation** bezeichnet.

1.1 Atemwege

Topographisch werden obere und untere Atemwege unterschieden (Abb. 1.1):

- **obere Atemwege:** Nasenhöhle, Pharynx, Kehlkopf,
- **untere Atemwege:** Trachea, Bronchialsystem der Lunge.

Funktionell werden die Atmungsorgane in luftleitende und respiratorische, d. h. gasaustauschende Abschnitte unterteilt:

- **luftleitende Abschnitte:** Nasenhöhle, Kehlkopf, Trachea, Bronchen, Bronchiolen, Bronchioli terminales,
- **gasaustauschende Abschnitte:** Bronchioli respiratorii, Alveolen.

Die Atemwege beginnen mit den beiden Nasenlöchern und enden in den Alveolen. Zwischen Nase und Alve-

olen sind die luftleitenden Abschnitte geschaltet. Sie leiten die Atemluft, am Gasaustausch sind sie hingegen nicht beteiligt.

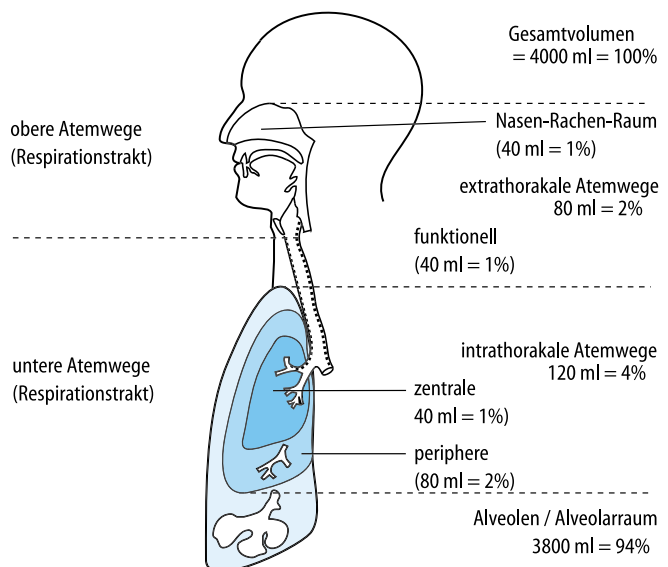
Der Tracheobronchialbaum mit seiner zunehmenden Aufzweigung kann in verschiedene Generationen von luftleitenden Wegen eingeteilt werden, beginnend bei der Trachea als Generation 0 und endend in den Alveolarbläschen als Generation 23.

1.1.1 Trachea

Die Trachea ist eine ca. 10–12 cm lange Röhre mit einem Durchmesser von 1,8–2 cm. Sie beginnt extrathorakal unterhalb des Ringknorpels (Pars cervicalis), in Höhe des 4.–7. Halswirbelkörpers und verläuft intrathorakal (Pars thoracica) durch das obere Mediastinum bis zur Verbindung zwischen Corpus und Manubrium des Sternums, 5–7 cm von der Haut entfernt; dort, an der Bifurkation, verzweigt sie sich in die beiden Hauptbronchen. Die Bifurkation befindet sich – abhängig vom Alter – in Höhe des 4.–5. Brustwirbels (beim Neugeborenen: 2. BW, beim Älteren: 7. BW).

Aufbau der Wand. Die äußere Wand besteht aus 16–20 elastisch miteinander verbundenen, hufeisenförmigen Knorpeln. Die Hinterwand dagegen wird von der knorpelfreien, bindegewebig-muskulösen Pars membranacea gebildet; diese membranöse Hinterwand liegt über den ganzen Verlauf der Trachea dem Ösophagus an. Durch die Knorpelspangen bleibt das Lumen

■ **Abb. 1.1.** Einteilung des Respirationstrakts und Verteilung der Luftvolumina bei Atemmittellage. Der Respirationstrakt besteht aus den extra- und intrathorakalen Atemwegen und dem Alveolarraum. Der Kehlkopf trennt den oberen vom unteren Respirationstrakt. Der Durchmesser der peripheren Atemwege beträgt weniger als 2 mm



1.1 · Atemwege

der Trachea ständig geöffnet, allerdings genügen bereits Drücke von ca. 40 cm H₂O (1 cm H₂O=98,07 Pa), um die Trachea im extrathorakalen, d. h. Halsbereich vollständig zu verschließen. Diese Gefahr besteht z. B. bei Nachblutungen von Schilddrüsenoperationen. Im Thorax kann die Trachea durch hohe intrathorakale Drücke, z. B. beim Husten, komprimiert werden.

Aufgrund ihrer hohen Elastizität verlängert sich die Trachea bei tiefer Inspiration um bis zu 5 cm, auch folgt sie allen Kopf-, Kehlkopf- und Halsbewegungen.

Schleimhaut. Die innere Schicht der Trachea wird von einer Schleimhaut mit Flimmerepithel und einer drüsenreichen Lamina propria gebildet. Die Schleimhaut ist fest mit den Knorpelspannen verbunden, über der Pars membranacea hingegen verschieblich. Die Drüsen bilden ein seromuköses Sekret, das als dünnflüssiger Film direkt dem Epithel aufliegt. In diesem Schleimfilm schlagen die Kinozilien in Richtung Kehlkopf und befördern einen eingedickten Film mit Staubteilchen und Mikroorganismen nach oben. Dieser Mechanismus, der selbst in den kleinsten Bronchiolen vorhanden ist, wird als **mukoziliäre Clearance** bezeichnet.

Zu den Zellen ohne Zilien gehören die schleimproduzierenden Becherzellen, weiterhin Basalzellen – kleine Zellen mit ovalem Kern.

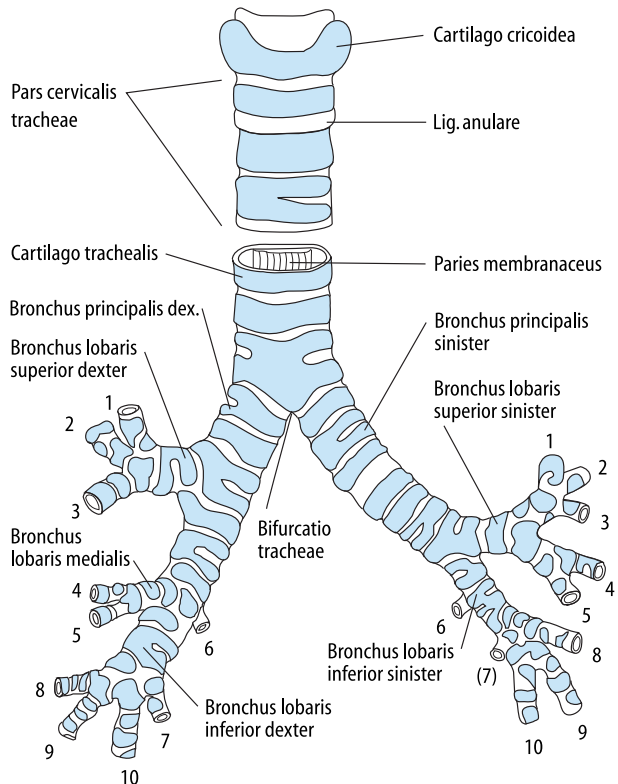
Innervation und Gefäßversorgung. Der M. trachealis der Pars membranacea wird vom N. vagus über Äste des N. laryngeus recurrens innerviert, im unteren Bereich durch direkte Äste. Die sensible und sekretorische Innervation der Schleimhaut erfolgt ebenfalls durch den N. vagus. Die Gefäße der Schleimhaut werden von sympathischen Fasern des Grenzstrangs innerviert, die z. T. mit Vagusästen zur Trachea ziehen.

Die Blutversorgung der Trachea erfolgt überwiegend aus der A. thyroidea inferior.

1.1.2 Extrapulmonale Hauptbronchen

An der Bifurkation der Trachea springt vom letzten Trachealknorpel ein halbmondförmiger Sporn, die Carina, in die Lichtung vor. Hier beginnt die gabelförmige Aufteilung in den rechten und linken Hauptbronchus, die beide am jeweiligen Lungenhilus in ihre Lunge eintreten und sich unmittelbar danach weiter

Abb. 1.2. Trachea, Haupt-, Lappen- und Segmentbronchien. Der mittlere Trachealabschnitt wurde weggelassen, um den Paries membranaceus darzustellen. (Schiebler 2005)



aufzweigen, beginnend mit dem Oberlappenbronchus (■ Abb. 1.2).

Zwischen rechtem und linkem Hauptbronchus bestehen folgende klinisch wichtigen Unterschiede:

- rechter Hauptbronchus: kurz, 1–2,5 cm lang; etwas größerer Durchmesser (ca. 14 mm); Winkel zwischen Trachea und Bronchus: nur 22°,
- linker Hauptbronchus: 4,5–5 cm lang; Durchmesser ca. 12,5 mm; stärkere Abwinkelung; mindestens 35°,
- Winkel zwischen beiden Bronchen: variabel, meist 55°–65°.

Wegen der geringeren Abwinkelung gelangen Fremdkörper oder ein zu tief eingeführter Tubus beim Erwachsenen leichter in den rechten Hauptbronchus.

Bei tiefer Inspiration erweitern sich die Hauptbronchen um 2–3 mm.

Wandaufbau und Schleimhaut. Der Aufbau von Wand und Schleimhaut der Hauptbronchen entspricht dem der Trachea: rechts 6–8, links 9–12 hufeisenförmige Knorpelspangen an den Vorder- und Seitenwänden, bindegewebig-muskulöse Membran an der Hinterseite mit hoher Elastizität, Schleimhaut aus zylindrischem Epithel mit Flimmerzellen und schleimproduzierenden Becherzellen.

Innervation und Gefäßversorgung. Innervation s. Trachea; die Gefäßversorgung der Hauptbronchen erfolgt überwiegend aus Rr. bronchiales.

1.2 Lungen

Die beiden Lungen, Pulmo dexter und Pulmo sinister, gliedern sich in Lappen, Segmente, Läppchen und Azini (■ Abb. 1.3). Jede Lunge füllt eine der beiden Pleurahöhlen aus und ist, bis auf den Lungenhilus, vollständig mit der **Pleura visceralis**, dem Lungenfell, überzogen. Die Pleura visceralis ist von der glatten mesothelialen Auskleidung der Pleurahöhle, der **Pleura parietalis** oder dem Rippenfell, durch den Pleuraspalt getrennt. Im Pleuraspalt befindet sich ein Flüssigkeitsfilm, der die Verschieblichkeit der Lunge ermöglicht.

Die Lungen sind durch das Mesopneumonium am Mediastinum befestigt; das Mesopneumonium wird durch die Umschlagfalte der Pleura visceralis in die Pleura parietalis gebildet. Der obere Teil des Mesopneumoniums umfasst den Lungenhilus, Hilum pulmonis, mit Hauptbronchus, Lungengefäßen und Nerven, der untere Teil ist als Duplikatur zum Lig. pulmonale ausgezogen.

Beide Lungen sind grundsätzlich ähnlich gestaltet und gegliedert, allerdings mit einigen Unterschieden. So besteht die rechte Lunge aus 3 Lappen, die linke hingegen nur aus 2.

1.2.1 Lungenlappen

Beide Lungen werden durch Spalten, Fissurae interlobares, die fast bis zum Hilus einschneiden, in Lungenlappen getrennt. Die Lungenlappen sind von der Pleura visceralis überzogen, die in der Tiefe der Spalten auf den Nachbarlappen übergeht.

Rechte Lunge. Die rechte Lunge besteht aus 3 Lappen:

- Oberlappen, Lobus superior,
- Mittellappen, Lobus medius,
- Unterlappen, Lobus inferior.

Der Unterlappen wird von den beiden anderen Lappen durch die Fissura obliqua getrennt, Mittel- und Oberlappen durch die Fissura horizontalis.

Linke Lunge. Im Gegensatz zur rechten besteht die linke Lunge nur aus 2 Lappen:

- Oberlappen, Lobus superior,
- Unterlappen, Lobus inferior.

Getrennt werden die beiden Lappen nur durch die Fissura obliqua. Der Oberlappen der linken Lunge entspricht dem Ober- und Mittellappen der rechten. Er ist allerdings, bedingt durch das Herz, kleiner als diese beiden Lappen.

Lungenhilus. Hauptbronchus, Gefäße und Nerven bilden im Lungenhilus die **Lungenwurzel**, Radix pulmonis. Am weitesten dorsal liegt der Hauptbronchus; vor dem Bronchus verläuft die eintretende Pulmonalarterie. Die Lungenvenen verlaufen unterhalb der Lungenarterie und fließen im Hilus zu 2 Stämmen zusammen. Zwischen den Gefäßen liegen die Hiluslymphknoten; um den Hauptbronchus und die Pulmonalgefäße ziehen die Äste des Plexus pulmonalis, die Rr. bronchiales, in die Lunge, während die Vv. bronchiales und die Lymphgefäße den Hilus verlassen.

1.2.2 Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia

Segmente sind pyramiden- bis kegelförmige Einheiten der Lunge, deren Spitze zur Hilusregion gerichtet ist

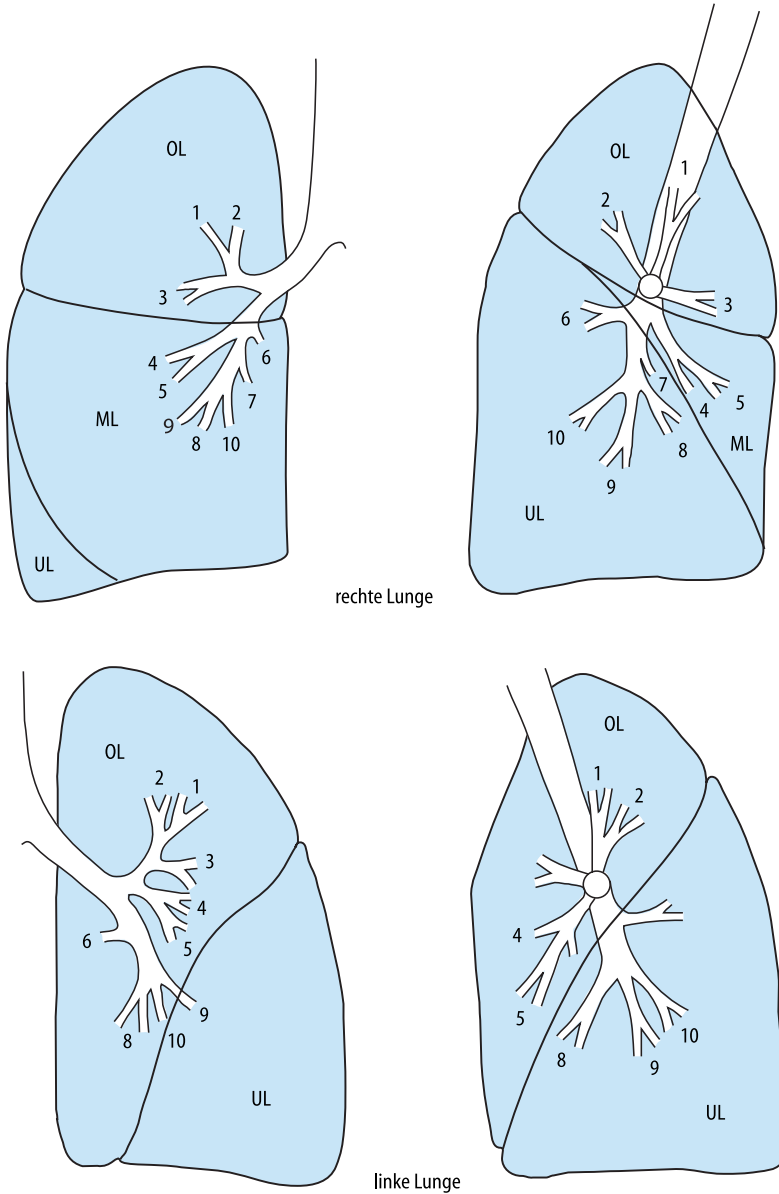


Abb. 1.3. Topographie der Lungenlappen und -segmente; links Ansicht von vorn, rechts Seitenansicht. Der rechte Mittellappen liegt der vorderen Thoraxwand an, der Unterlappen der lateralen und hinteren Wand. Die Zahlen kennzeichnen

die entsprechenden Segmente. Die Lingulasegmente der linken Lunge weisen einen gemeinsamen Stamm auf, vergleichbar dem des rechten Mittellappenbronchus. Das 7. Segment ist links meist nicht ausgebildet

(Abb. 1.4). Die Segmente werden von einem Segmentbronchus, seinen Ästen und einem stets begleitenden Ast der A. pulmonalis gebildet und voneinander – allerdings unvollständig – durch Bindegewebssepten abgegrenzt. An der äußeren Oberfläche der Lunge kön-

nen die Segmente nicht erkannt werden. Die rechte Lunge besteht in der Regel aus 10 Segmenten, die linke hingegen aus 9 (Tab. 1.1).

Die Segmentbronchen treten am Hilus ein und verlaufen in der Segmentachse; sie verzweigen sich im Seg-

Tab. 1.1. Lungensegmente und zugeordnete Bronchien

Rechte Lunge	
Lobus superior	Bronchus lobaris superior dexter
Segmentum apicale (1)	Bronchus segmentalis apicalis
Segmentum posterius (2)	Bronchus segmentalis posterior
Segmentum antierius (3)	Bronchus segmentalis anterior
Lobus medius	Bronchus lobaris medius dexter
Segmentum laterale (4)	Bronchus segmentalis lateralis
Segmentum mediale (5)	Bronchus segmentalis medialis
Lobus inferior	Bronchus lobaris inferior dexter
Segmentum superius (6)	Bronchus segmentalis superior
Segmentum basale mediale (7)	Bronchus segmentalis basalis medialis
Segmentum basale antierius (8)	Bronchus segmentalis basalis anterior
Segmentum basale laterale (9)	Bronchus segmentalis basalis lateralis
Segmentum basale posterius (10)	Bronchus segmentalis basalis posterior
Linke Lunge	
Lobus superior	Bronchus lobaris superior sinister
Segmentum apicoposterius (1+2)	Bronchus segmentalis apicoposterior
Segmentum antierius (3)	Bronchus segmentalis anterior
Segmentum lingulare superius (4)	Bronchus lingularis superior
Segmentum lingulare inferius (5)	Bronchus lingularis inferior
Lobus inferior	Bronchus lobaris inferior sinister
Segmentum superius (6)	Bronchus segmentalis superior
Segment fehlt meist	
Segmentum basale antierius (8)	Bronchus segmentalis basalis anterior
Segmentum basale laterale (9)	Bronchus segmentalis basalis lateralis
Segmentum basale posterius (10)	Bronchus segmentalis basalis posterior

ment mit 6–12 dichotomen Aufteilungen in die mittleren und kleinen Bronchen, auf die schließlich die Bronchiolen folgen.

Anzahl der in beiden Lungen enthaltenen Segmente

- Rechte Lunge: 10 Segmente, davon 3 im Oberlappen, 2 im Mittellappen und 5 im Unterlappen
- Linke Lunge: 9 Segmente, davon 5 im Oberlappen und 4 im Unterlappen

1.2.3 Lungenläppchen, Lobuli pulmonalis

Die Lungenläppchen (■ Abb. 1.5) sind durch lockeres Bindegewebe voneinander abgegrenzt, allerdings nur in der mittleren Zone der Lungenlappen zu erkennen. Hier bilden sie polygonale Felder mit einem Durchmesser von 1–4 cm, während im Lappenkern keine lobuläre Unterteilung vorhanden ist.

Ein Läppchen wird von Bronchiolen der 1. Generation versorgt, die sich im Läppchen 3- bis 4mal aufteilen. Die letzte Generation sind die Bronchioli terminales. Aus ihnen gehen die Endaufzweigungen des

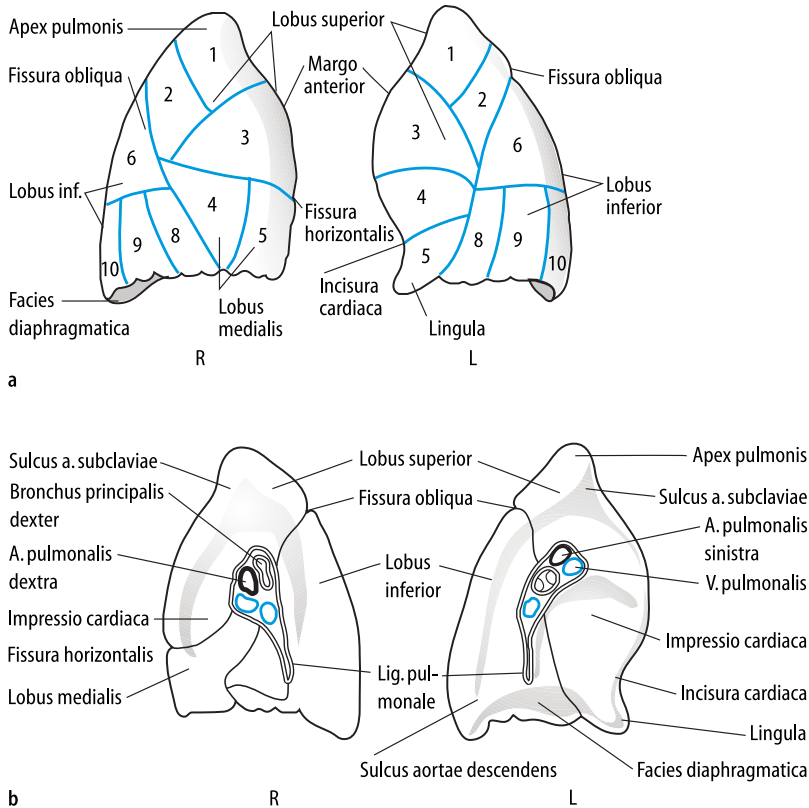


Abb. 1.4. Seitenansicht (Facies costalis) der rechten und linken Lunge; Segmentgrenzen rot, Lungensegmente durch Ziffern gekennzeichnet; Fälderung der Lungenoberfläche entsprechend den Lobuli. **b** Mediale Ansicht der rechten und

linken Lunge; Lungenhilus mit Arterien (schwarz), Venen (blau) und Bronchien (linker Hauptbronchus nicht bezeichnet). (Schiebler 2005)

Bronchialbaums hervor, auf denen sich die Alveolen befinden.

1.2.4 Azinus

Ein Azinus umfasst die aus einem Bronchiolus terminalis hervorgehende Endaufzweigung mit den zugehörigen Alveolen, den kammerartigen Lungenbläschen. Die Azini sind voneinander nicht durch Bindegewebe abgegrenzt. Ein Acinus pulmonalis umfasst 1500–4000 Alveolen, der Durchmesser beträgt 2,5–5, maximal 8 mm.

1.2.5 Bronchialbaum der Lunge

Der Bronchialbaum besteht aus einem proximalen **konduktiven** Abschnitt, der die Atemluft lediglich leitet, und einem distalen Abschnitt, in dem der **Gasaustausch** stattfindet (Abb. 1.6).

Der konduktive Abschnitt entspricht dem Totraumanteil des Atemzugvolumens. Insgesamt lassen sich folgende luftleitende Abschnitte des Bronchialbaums unterscheiden:

- rechter und linker Hauptbronchus (► s. oben),
- Lappenbronchen,
- Segmentbronchen,
- Bronchiolen,
- terminale Bronchiolen.

Nach Weibel kann der Tracheobronchialbaum auch »in Generationen« unterteilt werden, wobei sich mit jeder

Abb. 1.5. a Bronchopulmonales Segment. Die Segmentarterie und der Bronchus segmentalis treten an der Kante in das keilförmige Segment ein, die Vene (blau) verläuft intersegmental. Lobuli durch eingelagerten Kohlenstaub scharf abgegrenzt. **b** Schematische Darstellung eines Lobulus. B1 kleiner Bronchus, B2 Bronchiolus. (Schiebler 2005)

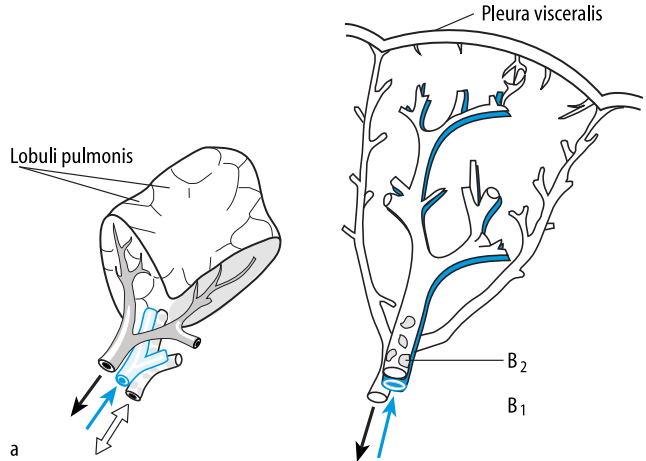


Abb. 1.6. Durchmesser der verschiedenen Anteile des Bronchialbaums; Gesamtquerschnitt $S(z)$ bezogen auf die jeweiligen Teilungsgenerationen. Hbr Hauptbronchus, Br mittlere und kleine Bronchien, BrI Bronchiolen, TBrl Bronchioli terminales, RBrl Bronchioli respiratorii, AD Ductus alveolares, AS Alveolarsäckchen. (Matthys u. Seeger 2008)

extrathorakal		Z	$S(z) \text{ cm}^2$
Luftleitende Zone	Trachea	0	2,54
	HBr	1	2,33
	Br	2	2,13
	BrI	3	
	BrI	4	2,48
Übergangs- und respiratorische Zone	↓	↓	↓
	TBrl	16	180,0
	RBrl	17 19	944,0
	AD		
	AS	23	5880,0

neuen Generation die Anzahl der Luftwege etwa verdoppelt:

- Trachea: Generation 0,
- Haupt-, Lappen- und Segmentbronchien: Generation 1–4,
- kleine Bronchien: Generation 5–11,
- Bronchiolen: Generation 12–16,
- respiratorische Bronchiolen: Generation 17–19.

Lappenbronchen

Die Lappenbronchen, Bronchi lobares, entspringen aus dem Hauptbronchus; den Lungenlappen entsprechend gibt es rechts 3 und links 2. Ihr Durchmesser beträgt 8–12 mm. Der rechte Oberlappenbronchus entspringt direkt im Hilus, also extrapulmonal, Mittel- und Unterlappenbronchus im weiteren Verlauf des Stammbronchus. Der linke Oberlappenbronchus verlässt ebenfalls

extrapulmonal den Hauptbronchus. In beiden Lungen setzen jeweils nur die Unterlappenbronchen den Verlauf und Bau des Hauptbronchus fort und bilden mit ihm zusammen die großen Bronchen. Die anderen Lappenbronchen und die Bronchen des Unterlappens umfassen hingegen die mittleren Bronchen.

Segmentbronchen

Die Segmentbronchen, Bronchi segmentales, entstehen aus den Lappenbronchen. Sie teilen sich zunächst in 6–12 mittlere Bronchen auf, wobei der Durchmesser bis auf 2 mm abnimmt. Es folgen dann die kleinen Bronchen, bei denen der kleinste Durchmesser nur noch 1 mm beträgt. Die beiden Hauptbronchen und die großen Bronchen besitzen, wie die Trachea, U-förmige Knorpelspangen, die mittleren und kleinen Bronchen hingegen nur noch unregelmäßig geformte Knorpelplatten.

Bronchiolen

Bronchiolen entspringen aus den kleinen Bronchen; sie teilen sich 3- bis 4mal dichotom und versorgen mit ihren Aufzweigungen jeweils ein Lungenläppchen. Knorpelanteile sind in den Bronchiolen nicht mehr vorhanden, jedoch ist die glatte Muskulatur hier kräftig entwickelt.

Bronchioli terminales. Dies sind die Endaufzweigungen der Bronchiolen, das Ende des konduktiven Bronchialbaums. Ihr Durchmesser beträgt 0,3–0,4 mm.

Bronchioli respiratorii

Die Bronchioli respiratorii entstehen durch weitere, dichotome Aufteilung der Bronchioli terminales. Ihr mittlerer Durchmesser beträgt 0,4 mm. Mit ihnen als Übergangszone beginnt der respiratorische Bronchialbaum. Die Bronchioli respiratorii teilen sich in 5–8 gleichförmige Aufzweigungen, den Ductus alveolares, die vollständig aus aneinanderliegenden Alveolen bestehen. Die lichte Weite der Alveolargänge beträgt 0,25–0,4 mm. Meist enden die Gänge in 2 kurzen Sacculi alveolares von gleicher Struktur.

Wandaufbau des konduktiven Bronchialbaums

Bronchen. Alle Bronchen sind prinzipiell wie die Trachea aufgebaut, jedoch besitzen die Lappen- und Segmentbronchen keine hufeisenförmigen Knorpelspangen, sondern nur noch unregelmäßig geformte, immer kleiner werdende Knorpelstücke. Die Knorpelstücke sind in eine Faserschicht aus Kollagenfasern und elastischen Netzen eingebettet, mit denen sie die Tunica fibrocartilaginea bilden. Innen schließt sich eine

dünne Schicht glatter Muskulatur, die Tunica muscularis, an. In den großen Bronchen verläuft die Muskulatur ringförmig, in den kleinen Bronchen wird sie kräftig und verläuft spiralförmig in sich überkreuzenden Windungen.

In der Lamina propria der Schleimhaut verlaufen die zahlreichen seromukösen Bronchialdrüsen, weiterhin die Lymphfollikel (Abwehrfunktion) und Venenplexus. Das peribronchiale Bindegewebe (Tunica adventitia) führt Nerven sowie Blut- und Lymphgefäße. Dieses lockere Bindegewebe ermöglicht gleitende Verschiebungen des Bronchialbaums gegen das umgebende Lungengewebe während der Atembewegungen. Es erstreckt sich bis zu den Bronchioli respiratorii.

Bronchiolen. Die Bronchiolen enthalten keinen Knorpel, auch keine Drüsen; die Muskulatur ist kräftiger und verläuft in zirkulären bis schraubigen Windungen. Mit dem Lungengewebe sind die Bronchiolen über eine Bindegewebsschicht mit elastischen Faseranteilen gespannt. Bei Erschlaffung der Muskulatur hält der elastische Zug das Lumen der Bronchiolen offen; Kontraktion der Muskulatur kann hingegen das Lumen vollständig verschließen.

➤ **Kleine Bronchen und Bronchiolen können ihren Durchmesser durch Kontraktion der Muskulatur erheblich verändern, große und mittlere Bronchen hingegen nur wenig.**

Bronchioli terminales. Der Wandaufbau entspricht dem der Bronchiolen.

Bronchioli respiratorii. Sie gehen, wie bereits beschrieben, aus den Bronchioli terminales hervor und sind ähnlich wie diese aufgebaut. Allerdings befinden sich in der Muskulatur und in der elastischen Tunica mucosa Lücken, durch die sich Alveolen einzeln oder in Gruppen in das umgebende Lungengewebe vorwölben. Die Wände der Alveolen sind mit Plattenepithel ausgekleidet.

Ductus alveolares. Die Alveolargänge schließen sich an die Bronchioli respiratorii an; ihr Lumen wird von den aneinandergereihten Öffnungen der Alveolen gebildet. Die Wandabschnitte der Ductus sind von einschichtigem kubischem Epithel bedeckt. In den distalen Abschnitten ist keine Muskulatur mehr vorhanden, und die Alveolen besitzen nur noch elastische und kollagene Fasern.

Bronchialschleimhaut und mukoziliäre Clearance

Schleimfilm und Flimmerepithel. Die Schleimhaut des konduktiven Bronchialbaums besteht aus einem mehrreihigen Flimmerepithel, das sich auf einer Lamina propria aus lockerem Bindegewebe und elastischen Fasern befindet. Die Schleimhaut ist glatt ausgespannt, legt sich aber bei stärkerer Kontraktion der Muskulatur in Längsfalten. In den großen, mittleren und kleineren Bronchen enthält die Schleimhaut zahlreiche Becherzellen und Bronchialdrüsen. In den Bronchiolen wird das zylindrische Flimmerepithel einreihig, in den Bronchioli respiratorii kubisch. Bronchialdrüsen fehlen in den Bronchiolen.

Becherzellen und Bronchialdrüsen produzieren ein gemischtseromuköses Sekret, den **Schleimfilm**, der aus einer Sol- und einer Gelphase besteht und der Reinigung der Lunge von Staub und pathogenen Keimen dient.

In der basalen Solphase schlagen die Kinozilien und transportieren die oberflächliche Gelphase zusammen mit Staubpartikeln zur Trachea. Die Schlagfrequenz beträgt 15–25/s, die Transportgeschwindigkeit in den kleinen Luftwegen 1 mm/min, in der Trachea 2 cm/min.

Dieser Mechanismus wird als mukoziliäre Clearance bezeichnet.

Alveolarmakrophagen. Bis in die Alveolen gelangte Schwebeteilchen werden dort von Alveolarmakrophagen (Staubzellen) aufgenommen und gespeichert. Bei den Makrophagen handelt es sich um Monozyten aus dem Blut, die über die Kapillaren aus den Alveolarsepten durch das Alveolarepithel in das Alveolarlumen gelangen. Die Makrophagen wandern ins Bronchialsystem und werden nach oben transportiert. Ein Teil des Staubs gelangt über das Bindegewebe der Alveolarwände in das peribronchiale, subpleurale und interlobuläre Bindegewebe und wird dort von Histiozyten phagozytiert und abgelagert. Außerdem wird ein gewisser Teil der Staubpartikel über Lymphgefäße zu den regionären Lymphgefäßen transportiert.

1.2.6 Alveolen, Ort des Gasaustausches

In den Alveolen, den Lungenbläschen, findet der Gasaustausch statt. Die Alveolen sind allerdings keine Bläschen, sondern sechskantige bis kugelförmige Lufträume mit einem mittleren Durchmesser von 250–300 µm bei maximaler Entfaltung. Die Wände der Alveolen werden von den Inter-alveolarsepten gebildet, wobei be-

nachbarte Alveolen jeweils eine gemeinsame Wand besitzen. Dies gilt auch für die aneinandergrenzenden Alveolen der benachbarten Ductus und Sacculi.

Die Gesamtzahl der Alveolen jeder Lunge wird auf durchschnittlich 300 Millionen geschätzt, beträgt jedoch in Abhängigkeit von der Größe 200–600 Millionen. Die Größe der Alveolen hängt vom Lungenvolumen ab. Bei voller Entfaltung sind alle Alveolen von der Basis bis zur Spitze gleich groß, ansonsten aber im oberen Teil größer als im unteren. Die geringere Größe der Alveolen in den abhängigen Lungenpartien ist für den pulmonalen Gasaustausch von Bedeutung. Die von den Alveolarwänden gebildete Gasaustauschoberfläche beträgt 70–140 m², abhängig von Geschlecht, Körpergröße, Alter und Trainingszustand.

Inter-alveolarsepten

Die Inter-alveolarsepten, die Wände der Alveolen, bestehen aus folgenden Strukturen (■ Abb. 1.7):

- Bindegewebsseptum,
- alveoläres Kapillarnetz,
- Alveolarepithel.

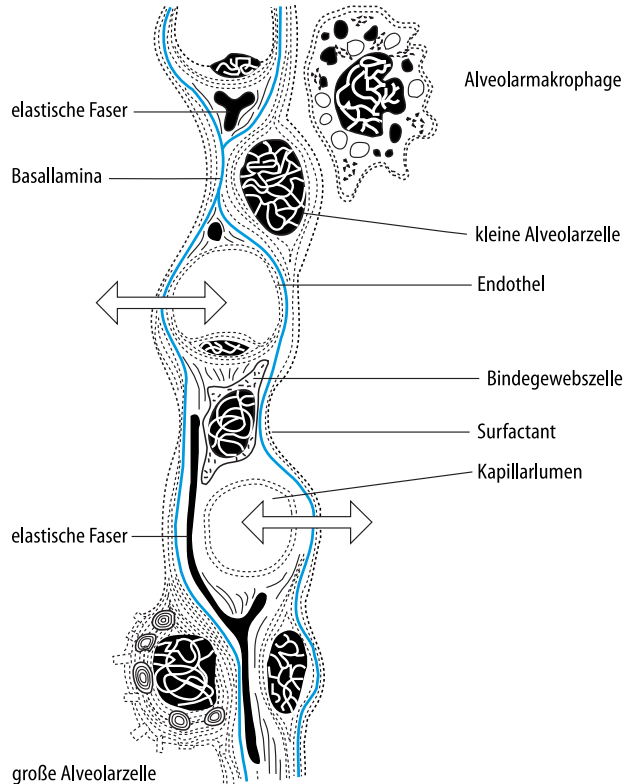
Bindegewebsseptum. Das Bindegewebe der Inter-alveolarsepten besteht aus kollagenen und retikulären Bindegewebsfasern und einem dichten elastischen Fasernetz, der Fortsetzung des elastischen Fasersystems der Wände von Bronchiolen und peribronchiolärem Gewebe. Hierdurch sind die Inter-alveolarsepten zwischen dem Bronchialbaum und der Lungenoberfläche elastisch ausgespannt.

Bei tiefer Inspiration werden die Kollagenfasern vollständig gestreckt und verhindern jede weitere Dehnung; gleichzeitig werden die elastischen Fasern etwa auf das Doppelte ihrer Ursprungslänge gedehnt und können nun bei abnehmender Entfaltung der Lunge auf ca. 60% ihrer Länge verkürzt werden, ohne dass hierdurch der gestreckte Verlauf verlorengeht. Dieses Verhalten ist für die Inter-alveolarsepten von Bedeutung, denn sie bleiben hierdurch bis zu einer Verkleinerung der Alveolen auf 20% ihres maximalen Volumens gestreckt und legen sich erst bei einer weiteren Abnahme des Lungenvolumens in Falten.

Die elastischen und kollagenen Fasern der Inter-alveolarsepten sind in eine dünne Schicht von interstitieller Grundsubstanz eingebettet, in der sich Fibroblasten, Makrophagen, Mastzellen und Leukozyten befinden. An der Grenze zum Alveolarepithel verdichtet sich das Bindegewebe an beiden Seiten zu einer **Basalmembran**.

Insgesamt bildet das Bindegewebe der Inter-alveolarsepten keine geschlossene Schicht, sondern eine

Abb. 1.7. Interalveolareseptum. 3 Kapillarquerschnitte im Bindegewebe. Die Basalmembran (blau) der Kapillaren und Alveolarepithelzellen sind an der Kontaktstelle zu einer gemeinsamen Membran verschmolzen. Pfeile: Weg des Gasaustausches



Platte mit zahlreichen großen Löchern und einem Netzwerk aus weitmaschigen Faserbündeln.

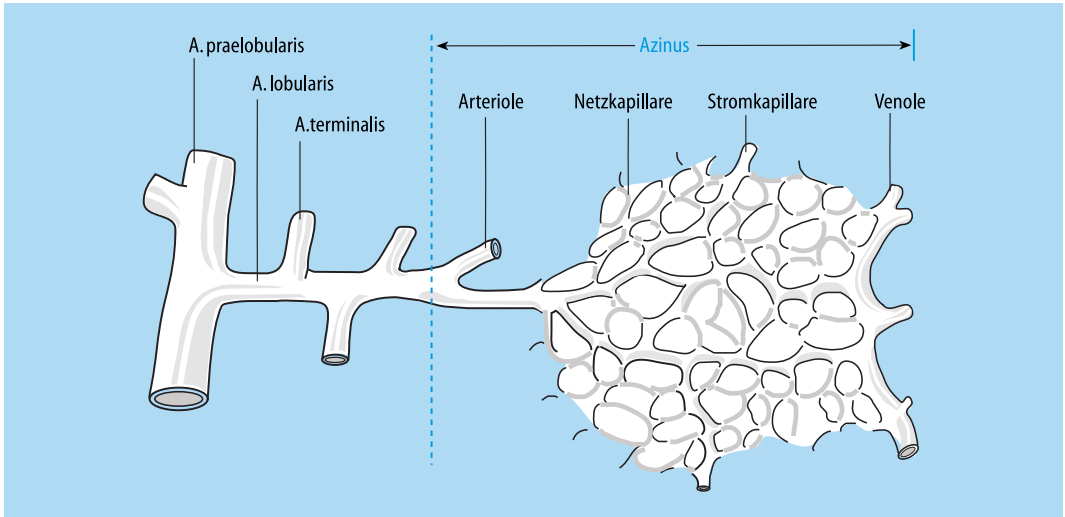
Alveoläres Kapillarnetz (Abb. 1.8). Das flächenhafte, einschichtige Kapillarnetz der Alveolen wird von der Bindegewebsplatte getragen. Die Kapillaren ziehen durch die Löcher der Platte und verlaufen teilweise auf der einen, teilweise auf der anderen Seite der Platte, jedoch immer so, dass sie an keiner Stelle der Bindegewebsplatte von beiden Seiten anliegen. Eine Kapillarseite ist also mit der Platte verbunden, die andere wölbt sich in den Alveolarraum vor.

Alveolarepithel. Die Alveolen werden vollständig von Alveolarepithel ausgekleidet. Das Alveolarepithel bedeckt beide Seiten der Bindegewebsplatte, außerdem das mit der Platte verflochtene Kapillarnetz. Zwei Typen von Epithelzellen (Pneumozyten) können unterschieden werden: Alveolarepithelzellen Typ I (Pneumozyten Typ I) und Alveolarepithelzellen Typ II (Pneumozyten Typ II).

Alveolarepithelzellen Typ I sind klein, dünn (50–150 nm) und flach ausgezogen. Sie bilden eine kontinu-

ierliche Zelllage und werden daher auch als **Deckzellen** der Interalveolarepten bezeichnet. Obwohl gering an Zahl, bedecken diese Zellen mehr als 90% der Oberfläche der Interalveolarepten. Der Kern dieser Zellen befindet sich in einer Masche des Kapillarnetzes; die Zellfortsätze breiten sich großflächig aus und überziehen die Kapillaren und das Bindegewebsseptum. An der direkten Auflagestelle von Epithelzelle und Kapillare verschmelzen ihre beiden Basallamina miteinander, sodass eine extrem dünne, fest miteinander verbundene Austauschbarriere entsteht. Ein Teil der Fortsätze der Typ-I-Zellen zieht zusammen mit einer Kapillare durch die Löcher der Bindegewebsplatte und gelangt auf deren andere Seite, wo sie ebenfalls eine großflächige Epithelbekleidung bildet. Die Fortsätze der Epithelzellen sind durch »tight junctions« fest miteinander verbunden. Hierdurch wird der interstitielle Raum gegen das Alveolarlumen abgedichtet. Einige benachbarte Interalveolarepten sind durch **Alveolarporen** verbunden; diese Poren sind durch Fortsätze der Alveolarepithelzellen ausgekleidet.

Alveolarzellen Typ II sind große Zellen, die meist einzeln zwischen den Typ-I-Epithelzellen liegen und



■ **Abb. 1.8.** Endstrombahn der Lunge mit Netz- und Stromkapillaren

nur ca. 7% der Alveolaroberfläche bedecken. Typ-II-Zellen produzieren v. a. Phospholipide, außerdem spezifische Proteine, die zusammen mit den Phospholipiden sezerniert werden und sich als gemeinsamer, monomolekularer Protein-Phospholipid-Film über der gesamten Oberfläche der Alveolen ausbreitet. Dieser sog. **Surfactant** setzt die Oberflächenspannung der Lunge ganz wesentlich herab und stabilisiert die Alveolen (Einzelheiten ► Kap. 2.3.4). Der Surfactant wird von Typ-I-Zellen und Alveolarmakrophagen resorbiert und von Typ-II-Zellen laufend neu gebildet. Daneben bilden Typ-II-Zellen neue Typ-I-Zellen, die selbst nicht teilungsfähig sind.

Bürstenzellen. Hierbei handelt es sich um einen Epithelzelltyp, der einen Bürstensaum besitzt. Die Zellen kommen nicht nur in den Alveolen vor, sondern auch verstreut im gesamten Bronchialbaum. Sie sollen Rezeptorfunktionen aufweisen und Stickstoffmonoxid produzieren können.

Alveolarmakrophagen. Diese Zellen werden als Monozyten im Knochenmark gebildet. Sie wandern über das Blut in die Inter-alveolarepten, verlassen dort die Kapillaren, durchdringen den Epithelbelag und kriechen auf der Oberfläche von Typ-I-Epithelzellen voran. Sie nehmen Keime sowie Staub- und Rußpartikel auf, weiterhin ausgetretene Erythrozyten und zerstörtes Alveolargewebe. Aktivierte Makrophagen können zudem eine Vielzahl sog. »proinflammatorischer Mediatoren« bilden, denen u. a. eine Schlüsselrolle in der Entstehung

bzw. Aufrechterhaltung bestimmter Lungenerkrankungen wie z. B. ARDS zugeschrieben wird.

Blut-Luft-Schranke

In den Inter-alveolarepten befindet sich die Grenze zwischen Blut und Luft, die Diffusionsbarriere, an der die Gase durch einfache Diffusion ausgetauscht werden. Die dünnste und damit kürzeste Strecke für den Gasaustausch liegt dort, wo die Kapillaren dem Alveolarepithel angelagert sind, d. h. an der Verschmelzungsstelle der Basalmembranen des Alveolarepithels und der Kapillaren. In diesem für den Gasaustausch bevorzugten Bereich mit einer Dicke von 0,2–0,4 mm müssen die Gase folgende Barrieren überwinden:

- das Plasma zwischen Erythrozyt und Endothel,
- das Zytoplasma der Kapillarendothelzellen,
- die miteinander verschmolzenen Basalmembranen von Kapillare und Alveolarepithel,
- das Zytoplasma der Alveolarepithelzellen Typ I,
- den Surfactant der Alveolen.

Auf der dem Bindegewebsseptum zugewandten Seite der Kapillaren ist die Barriere hingegen am dicksten: Hier müssen zusätzlich das Septum mit seinen Fasern und Zellfortsätzen sowie die Endothelzellkerne überwunden werden; entsprechend ist auch das Ausmaß des Gasaustausches in diesem Bereich geringer.

1.2.7 Blutgefäßsystem der Lunge

Das Blutgefäßsystem der Lunge besteht aus den Vasa publica und den Vasa privata. Die Vasa publica führen das Körperblut zum Gasaustausch durch die alveolären Kapillaren, die Vasa privata hingegen dienen der O₂-Versorgung des überwiegenden Anteils der Lunge, d. h. der Bronchen bis zu den Bronchioli terminales und des Gewebes der Lungenarterien sowie des peribronchialen Gewebes. Dagegen werden die Bronchioli respiratorii, die Ductus alveolares und die Bindegewebssepten und das subpleurale Gewebe von den Vasa publica versorgt.

Blutgefäßsystem der Lunge

■ Die Vasa publica umfassen:

- Pulmonalarterien mit ihren Ästen
- alveoläres Kapillarnetz
- Vv. pulmonales

■ Zu den Vasa privata gehören:

- Rr. bronchiales (Aa. bronchiales) des Körperkreislaufs
- Vv. bronchiales des Körperkreislaufs
- Anastomosen zwischen A. pulmonalis und Rr. bronchiales sowie zwischen Rr. bronchiales und Vv. bronchiales

Die Vasa publica werden auch als **Lungenkreislauf** oder kleiner Kreislauf bezeichnet. Der Lungenkreislauf muss jeweils das gesamte Schlagvolumen des rechten Ventrikels aufnehmen. Aufgrund der kurzen Gefäßstrecke und des großen Gesamtquerschnitts ist der Gefäßwiderstand im Lungenkreislauf sehr niedrig; Er beträgt etwa $\frac{1}{10}$ des Widerstands der Körpergefäße. Lungenkreislauf, Körperven und rechter Vorhof gehören zum **Niederdrucksystem** des Kreislaufs.

Aa. pulmonalis

Die beiden Pulmonalarterien entspringen aus dem Truncus pulmonalis. Jede Lungenarterie tritt in den Lungenhilus ein und folgt mit ihren Aufteilungen den Lappen-, Segment- und anschließenden Bronchen und Bronchiolen. Nach Eintritt in den Lungenhilus kreuzt die Pulmonalarterie den Hauptbronchus von ventral; die Äste lagern sich den Bronchusverzweigungen von lateral an, den Unterlappenbronchen hingegen von dorsal. Die Arterien sind in das lockere peribronchiale Bindegewebe eingebettet und gegen die Bronchen und das Lungengewebe während der Atembewegungen verschieblich. Die Endäste der Pulmonalarterien verlaufen

als Arteriolen zwischen den Ductus alveolares in den Inter-alveolarsepten und versorgen die Kapillarnetze aller umliegenden Alveolen. Die Äste der Aa. pulmonales sind Endarterien, d. h. zwischen ihnen gibt es keine Anastomosen von funktioneller Bedeutung.

Wandaufbau. Die Aa. pulmonales sind bis zu den kleinen Ästen Arterien vom elastischen Typ, da sie zum Niederdrucksystem gehören, allerdings mit dünnerer Wand als die entsprechenden Arterien des Körperkreislaufs. Die Endverzweigungen der Arterien gehören ab einem Durchmesser von 2–3 mm zum muskulären Bautyp.

Arteriolen. Die Lungenarteriolen sind keine typischen Widerstandsgefäße. Sie besitzen nur noch spiralförmige Muskelzellbündel, die durch muskelfreie Streifen unterbrochen werden und verlaufen bereits in den Inter-alveolarsepten. Ihr Durchmesser beträgt 150–50 µm.

Alveolarkapillaren. Die Arteriolen gehen über muskelfreie Präkapillaren mit einem Durchmesser von 70–40 µm in die Alveolarkapillaren mit einem Durchmesser von 6–9 µm über. Die Kapillaren bilden in den Inter-alveolarsepten engmaschige, flächige Netze mit einer großen Oberfläche für den Gasaustausch.

Lungenvenen

Das Blut der Alveolarkapillaren fließt über muskelfreie Postkapillaren in 50–80 µm weite Venolen, dann in kleine Venen mit einer dünnen Muskelzellschicht, schließlich in größere Venen, die in den Bindegewebslamellen zwischen den Segmenten oder unter der Pleura zum Lungenhilus verlaufen. Alle intersegmentalen Venen fließen im Hilus zu den beiden Lungenvenen zusammen. Die beiden Lungenvenen verlassen den Hilus ventral und kaudal vom Hauptbronchus und der A. pulmonalis. Die Vv. pulmonales sind relativ dünnwandig und weisen keine Klappen auf. Sie münden in den linken Vorhof.

Blutmenge im Lungenkreislauf

Im Lungenkreislauf befinden sich etwa 450 ml Blut, davon mehr als 50% in leicht dehnbaren Venen und ca. 100 ml im Kapillarnetz. Bei körperlicher Anstrengung kann die Blutmenge im Kapillarnetz auf 150–200 ml ansteigen. Intrathorakale Druckanstiege können die Lungenblutmenge hingegen drastisch reduzieren.

Vasa privata

Vasa privata sind Gefäße des großen Kreislaufs. 1–3 Rr. bronchiales jeder Lunge entspringen entweder

direkt aus der thorakalen Aorta oder aus der 3. oder 4. Interkostalarterie. Sie versorgen die Wand der Bronchen und die Wand der Pulmonalarterien.

Aus den Kapillarnetzen der Rr. bronchiales sammeln sich die Vv. bronchiales, die in Nähe des Hilus zu 2 Venenstämmen zusammenfließen und in die V. azygos und V. hemiazygos münden. Die weiter peripher gelegenen Vv. bronchiales münden in die Vv. pulmonales.

Anastomosen. Äste der Rr. bronchiales versorgen über arteriovenöse Anastomosen die Venenplexus der Schleimhaut kleiner Bronchen. Diese Plexus fließen in den Vv. pulmonales ab. Außerdem bestehen im Bereich der kleinen Bronchen Verbindungen zwischen Ästen der Rr. bronchiales und der A. pulmonalis, sog. Rr. pulmonobronchiales, also Verbindungsäste zwischen Lungen- und Körperkreislauf. Sie sind normalerweise geschlossen, können aber unter bestimmten Bedingungen geöffnet werden, z. B., wenn ein Lungenbezirk nicht belüftet ist.

Lymphgefäße

Zwei Lymphgefäßsysteme der Lungen können unterschieden werden:

- peribronchiales Lymphgefäßsystem,
- oberflächlich-segmentales Lymphgefäßsystem.

Diese beiden Systeme sind voneinander getrennt und fließen erst im Hilusbereich zusammen.

Peribronchiales Lymphsystem. Dieses System verläuft im Zentrum der Segmente; es beginnt im lockeren Bindegewebe der proximalen Bronchioli respiratorii mit Lymphkapillaren und verläuft über Lymphspalten und muskelfreie klappentragende Lymphgefäße. Zwischengeschaltet sind die Nodi lymphatici bronchopulmonales und die Nodi lymphatici tracheobronchiales superiores und inferiores (»Hiluslymphknoten«).

Oberflächlich-segmentales Lymphgefäßsystem. Das System beginnt mit Lymphkapillaren im Bindegewebe der Subserosa und der interlobulären und intersegmentalen Bindegewebssepten. Die Lymphkapillaren laufen zu Strängen zusammen entlang der Pulmonalvenenäste, mit denen sie bis zum Hilus ziehen. Erste Lymphknoten des Systems sind die Nodi lymphatici tracheobronchiales im Hilus. Hier fließen beide Lymphsysteme der Lunge zusammen.

1.2.8 Innervation der Lunge

Die efferenten Nervenfasern der Lunge stammen aus dem sympathischen Brustgrenzstrang (2., 3. und 4. Ganglion des Truncus sympathicus) und dem parasympathischen N. vagus. Sie vereinigen sich im Lungenhilus zum **Plexus pulmonalis** und ziehen mit ihren Ästen im peribronchialen Bindegewebe zu Muskulatur, Blutgefäßen, Drüsen und Pleura visceralis.

Die Äste des N. vagus enthalten auch **afferente Fasern**, über die Erregungen von den Dehnungsrezeptoren in Trachea, Bronchen, Bronchiolen und Pleura zu den Atemzentren in der Medulla oblongata laufen.

1.3 Pleura und Pleurahöhlen

Die Pleura ist eine seröse Haut aus Mesothel, einem einschichtigen Plattenepithel, und Lamina propria, die Lungen und Pleurahöhle überzieht. Unterschieden werden Pleura parietalis und Pleura visceralis.

Pleura parietalis (Brust- oder Rippenfell). Die Pleurahöhle wird vollständig von der Pleura parietalis ausgekleidet. Die Pleura mediastinalis überzieht seitlich das Mediastinum, die Pleura costalis die Innenfläche der Brustwand und die Pleura diaphragmatica die Oberseite des Zwerchfells. Die Umschlagstellen von der Pleura mediastinalis und der Pleura diaphragmatica in die Pleura costalis werden als **Pleuragrenzen** bezeichnet.

Pleura visceralis. Das Lungenfell überzieht die gesamte Lunge mit Ausnahme des Hilus; der Aufbau entspricht derjenigen der Pleura parietalis.

Pleurahöhlen. Die Pleurahöhlen sind geschlossene Räume ohne Verbindung zur umgebenden Atmosphäre. Sie werden von Rippen, Zwerchfell und Mediastinum begrenzt. Jede Pleurahöhle, Cavitas pleuralis, ist vollständig von einer Lunge ausgefüllt und mit parietaler Pleura ausgekleidet. Die innere, der Lunge zugewandte Schicht der Pleura parietalis besteht aus Mesothel, die äußere Schicht aus Kollagen und elastischen Fasern. An der Lungenwurzel gehen Pleura parietalis und Pleura visceralis ineinander über.

Zwischen Pleura parietalis und Pleura visceralis besteht ein kapillärer Spalt, der mit geringer Menge, ca. 5 ml, seröser Flüssigkeit gefüllt ist. Diese Flüssigkeit wird vom Mesothel beider Pleuren gebildet und auch resorbiert.

Die seröse Flüssigkeit im Pleuraspalt ermöglicht die Verschiebung der Lunge gegen die Brustwand und

1.3 · Pleura und Pleurahöhlen

fixiert außerdem die Lunge adhäsiv an der Wand der Pleurahöhle.

Innervation der Pleura. Nur die Pleura parietalis ist sensibel versorgt, die Pleura costalis durch die Interkostalnerven, die Pleurae mediastinalis und diaphragmatica durch den N. phrenicus.

Reserveräume – Recessus pleurales. Diese Komplementär- oder Reserveräume entstehen an den Übergängen eines Pleuraabschnitts auf den anderen. Teilweise liegen die Pleurablätter übereinander und heben sich bei tiefer Inspiration voneinander ab, sodass die Lunge sich in den erweiterten (Reserve-)Raum ausdehnen kann. Folgende Recessus sind von Bedeutung:

Recessus costomediastinalis. In der linken Pleurahöhle bilden die beiden Pleurablätter durch das nach links verschobene Perikard v. a. kaudal zwischen Perikard und Brustwand einen breiten Recessus, in der rechten Pleurahöhle hingegen nur einen schmalen. Durch das Anheben der Rippen bei tiefer Inspiration werden die Recessus eröffnet und können mit ihren vorderen Rändern dort hineingleiten.

Recessus costodiaphragmaticus. Tiefer Komplementärraum zwischen Zwerchfell und Brustwand (Sinus

phrenicostalis), der eine wesentliche Ausdehnung der Lunge bei tiefer Inspiration ermöglicht.

Bei tiefer In- und Expiration verschiebt sich der untere Lungenrand vorn jeweils um 2–3 cm, seitlich und hinten um 5 cm. Hieraus ergibt sich bei jungen gesunden Erwachsenen eine Gesamtverschieblichkeit der Lungen gegen die Thoraxwand vorn um 5–6 cm, seitlich in Axillarlinie und dorsal in der Skapularlinie um 10 cm.

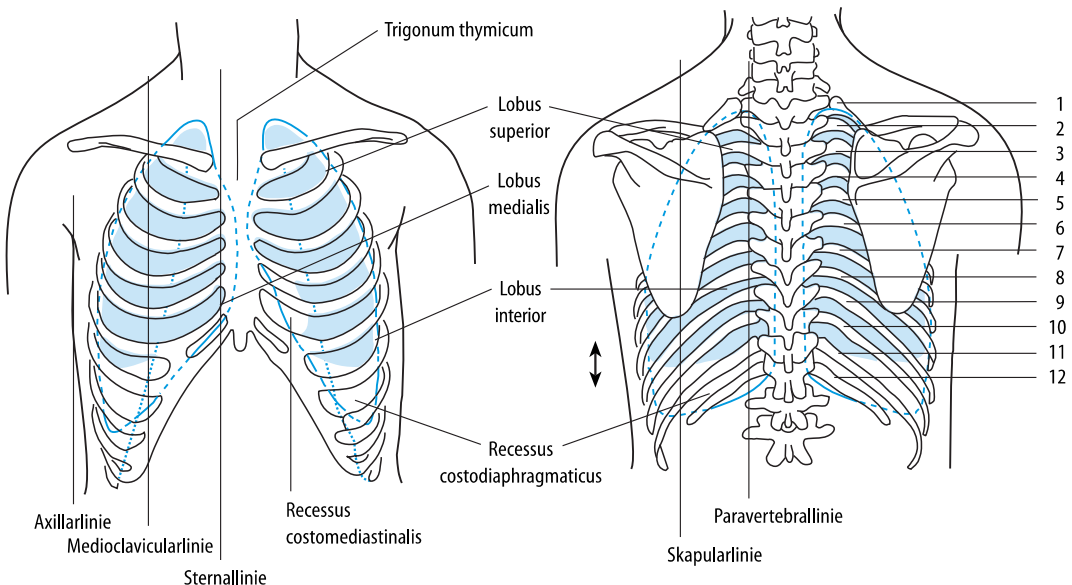
Die Atemverschieblichkeit der linken Lunge ist größer als die der rechten.

Pleura und Lunge stehen in enger topographischer Beziehung, wobei die Grenzen der Pleura parietalis fixiert sind, während sich die Lungengrenzen während der Atmung verschieben. Für die Bestimmung der Lungen- und Pleuragrenzen sind folgende Hilfslinien wichtig (Abb. 1.9):

- Linea sternalis,
- Linea medioclavicularis,
- Linea axillaris media,
- Linea scapularis,
- Linea paravertebralis.

1.3.1 Lungen- und Pleuragrenzen

In Atemmittellage ergeben sich folgende Lungengrenzen (Abb. 1.9):



■ **Abb. 1.9.** Lungen- und Pleuragrenzen (blau). Links: Ansicht von vorn, rechts: Ansicht von hinten. Pfeile: Verschiebung der Lungengrenzen bei forcierter Atmung. Parallel zur 4. Rippe

verläuft die Fissura horizontalis. Zwischen Lungen- und Pleuragrenzen befinden sich die Komplementäräume. (Schiebler 2005)

Rechte Lunge. Die Lungenspitze liegt in Höhe des 1. Brustwirbels 3–5 cm oberhalb der Klavikula. Von hier aus verläuft die Lungengrenze hinter Manubrium und Corpus sterni abwärts, schneidet in der Sternallinie die 6. Rippe und folgt ihr bis zur Linea medioclavicularis. In der mittleren Axillarlinie wird die 8., in der Skapularlinie die 10. und in der Paravertebrallinie die 11. Rippe gekreuzt.

Linke Lunge. Der Verlauf entspricht, bis auf die Incisura cardiaca, dem der rechten Lunge: Links von der Sternallinie folgt die Lungengrenze der 4. Rippe, zieht dann bogenförmig nach unten, erreicht in der Medioklavikularlinie die 6. Rippe und verläuft dann wie die rechte Lunge.

Pleuragrenzen. Der Verlauf entspricht im Wesentlichen dem der Lungengrenzen; wesentliche Abweichungen ergeben sich nur im Bereich der Reserveräume; am stärksten ist der Unterschied in der Axillarlinie (■ Abb. 1.9).

1.4 Thoraxskelett

Der knöcherne Thorax besteht aus den 12 Brustwirbeln, Sternum und Rippen. Die Rippen sind hinten mit den Wirbeln durch Gelenke verbunden, vorn mit dem Brustbein durch hyalinen Knorpel, die 8.–10. Rippe allerdings nur indirekt, da sie sich vorher mit der 7. Rippe vereinigt. Insgesamt verlaufen die Rippen von hinten oben nach vorne unten, d. h. schräg. Durch Kontraktion der äußeren Interkostalmuskeln werden die Rippen bei der Inspiration angehoben, und der Thorax erweitert sich in Quer- und Tiefendurchmesser (■ Abb. 1.9 und 1.10).

■ **Abb. 1.10.** Topographische Lage des Zwerchfells bei Inspiration (---) und bei Expiration (—)

1.5 Atemmuskulatur

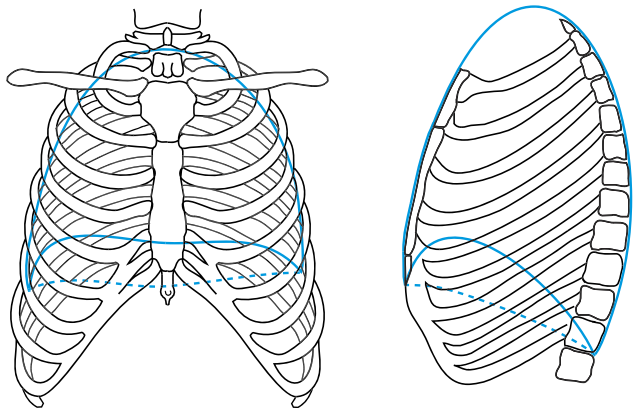
Zwerchfell und Interkostalmuskulatur sind die Hauptmuskeln der Atmung. Daneben gibt es noch die Atemhilfsmuskulatur.

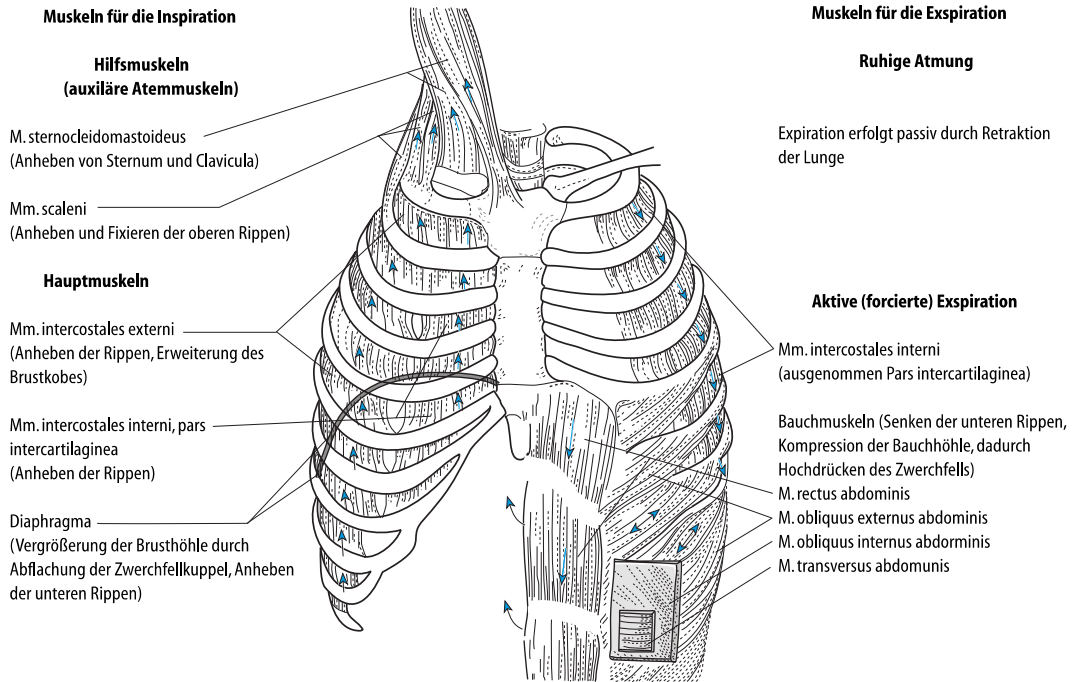
Zwerchfell. Das Zwerchfell, der wichtigste Atemmuskel, ist eine 3–5 mm dünne Muskelplatte, die den Thorax von der Bauchhöhle trennt. Der Muskel ragt kupelförmig in den Thorax hinein und ist an Sternum, Rippen und lumbaler Wirbelsäule befestigt. Die Mitte des Zwerchfells besteht aus einer V-förmig gelappten Sehnenplatte, dem Centrum tendineum, in das die Muskelfasern konvergierend einstrahlen. Das Centrum tendineum ist oben mit dem Perikard, unten mit der Area nuda der Leber verwachsen.

Im Zwerchfell befinden sich 3 große Öffnungen, durch die jeweils der Ösophagus, die V. cava und die Aorta ziehen. An der Oberseite wird das Zwerchfell von der Fascia phrenicopleuralis überzogen, die wiederum von der Pleura diaphragmatica bedeckt wird. An der Unterseite befindet sich, bis auf die Anheftung an der Leber, das Peritoneum parietale.

Die **Innervation** des Zwerchfells erfolgt durch den N. phrenicus (C 3–C 4) und die Nebenphrenici, die arterielle Gefäßversorgung aus der A. thoracica interna über die A. pericardiophrenica und A. musculophrenica sowie kleine Äste aus der Aorta.

➤ Das Zwerchfell ist der wichtigste Atemmuskel. Seine Kontraktion führt zur Abflachung der Kuppel und Zunahme des Thoraxraums in Längsrichtung (■ Abb. 1.10). Die hierdurch hervorgerufene Volumenzunahme entspricht etwa $\frac{2}{3}$ des Ruheatemzugvolumens.





■ **Abb. 1.11.** Haupt- und Hilfsmuskeln der Atmung

Interkostalmuskulatur (■ Abb. 1.11). Sie besteht aus einer äußeren und einer inneren Schicht, die sich überkreuzen und in entgegengesetzte Richtung verlaufen. Die äußeren Interkostalmuskeln verlaufen schräg von oben, dem Unterrand der Rippe, nach unten zum Oberrand der nächsten Rippe. Demgegenüber verlaufen die inneren Interkostalmuskeln vom Seitenrand des Sternums zum Angulus costae, also nach hinten unten. Die Innervation der Interkostalmuskeln erfolgt durch die entsprechenden Interkostalnerven.

➤ Die äußeren Interkostalmuskeln heben die Rippen und wirken inspiratorisch, die inneren Interkostalmuskeln verengen den Thorax und wirken expiratorisch.

Atemhilfsmuskulatur (■ Abb. 1.11). Hierzu gehören die Bauchmuskeln, Erector spinae, Scaleni, Sternocleidomastoidei und Serrati. Diese Muskeln treten bei gesteigerter Atmung oder erschwelter Inspiration, z. B. bei COPD, in Funktion.

Literatur

- Beachey W (2007) Respiratory care anatomy and physiology. Mosby, St. Louis
- Ferlinz R (1994) Pneumologie in der Praxis. Thieme, Stuttgart
- Matthys H, Seeger W (Hrsg) (2008) Klinische Pneumologie. Springer, Berlin Heidelberg New York
- Rohen JW, Lütjen-Drecoll E (2005) Funktionelle Anatomie des Menschen, 11. Aufl. Schattauer, Stuttgart
- Schiebler TH (Hrsg) (2005) Anatomie, 9. Aufl. Springer, Berlin Heidelberg New York

Physiologie der Atmung

2.1 Lungenvolumina – 20

- 2.1.1 Totkapazität der Lunge – 20
- 2.1.2 Sollwerte und Bedeutung der Lungenvolumina – 21

2.2 Ventilation der Lunge – 23

- 2.2.1 Atemfrequenz – 23
- 2.2.2 Atemzugvolumen – 24
- 2.2.3 Anatomischer Totraum – 24
- 2.2.4 Physiologischer Totraum – 24
- 2.2.5 Atemminutenvolumen – 24
- 2.2.6 Alveoläre Ventilation – 25

2.3 Atemmechanik – 25

- 2.3.1 Atemmuskulatur – 25
- 2.3.2 Warum strömt die Atemluft? – 26
- 2.3.3 Welche Faktoren bestimmen das Füllvolumen der Lunge? – 26
- 2.3.4 Elastizität der Lunge – 28
- 2.3.5 Elastizität des Thorax – 29
- 2.3.6 Compliance des Atemapparats – 29
- 2.3.7 Atemwegwiderstand – 31
- 2.3.8 Gewebewiderstand und Atembewegungswiderstand – 33
- 2.3.9 Atemarbeit – 34

2.4 Lungenkreislauf – 34

- 2.4.1 Drücke im Lungenkreislauf – 35
- 2.4.2 Pulmonaler Gefäßwiderstand – 36
- 2.4.3 Lungendurchblutung – 38

2.5 Ungleichmäßige Verteilung der alveolären Ventilation – 39

2.6 Verhältnis von Ventilation und Perfusion – 39

- 2.6.1 Alveolärer Totraum – 40
- 2.6.2 Shuntdurchblutung – 40

2.7 Pulmonaler Gasaustausch – 41

- 2.7.1 Zusammensetzung der Inspirationsluft – 41
- 2.7.2 Partialdrücke der Atemgase – 41
- 2.7.3 Alveoläre Ventilation – 42
- 2.7.4 CO₂-Abgabe, O₂-Aufnahme und alveoläre Atemgasfraktionen – 42
- 2.7.5 Alveoläre Partialdrücke – 43

2.8 Regulation der Atmung – 48

- 2.8.1 Zentrale Rhythmogenese – 48
- 2.8.2 Chemische Regulation der Atmung – 49
- 2.8.3 Beeinflussung der Atmung durch zentrale und reflektorische Faktoren – 51
- 2.8.4 Atemanhalten – 52

2.9 Nichtrespiratorische Funktionen der Lunge – 52

- 2.9.1 Schutzfunktionen und Infektionsabwehr – 52
- 2.9.2 Metabolische und Speicherfunktionen der Lunge – 53

Literatur – 53

Wesentliche Aufgabe der Atmung ist die Versorgung der Körperzellen mit Sauerstoff und die Entfernung des im Stoffwechsel gebildeten Kohlendioxids aus dem Körper. An der Atmung sind 2 Funktionssysteme beteiligt: die Lunge und das Herz-Kreislauf-System. Die Lunge dient dem Austausch der Atemgase, das Herz-Kreislauf-System ihrem Transport. 4 Teilprozesse der Atmung können unterschieden werden:

- **Ventilation:** die Belüftung der Alveolen mit Frischgas aus der Umgebung während der Inspiration und ihre Entlüftung während der Expiration. Sie geschieht durch Konvektion.
- **Pulmonaler Gasaustausch:** die Diffusion von Sauerstoff aus den Alveolen in das Lungenkapillarblut und von Kohlendioxid aus dem Lungenkapillarblut in die Alveolen.
- **Transport von Sauerstoff zu den Geweben und von Kohlendioxid aus den Geweben zur Lunge mit dem zirkulierenden Blut.**
- **Regulation der Atmung.**

Ventilation und Gasaustausch in der Lunge werden auch als **äußere Atmung** bezeichnet, der Verbrauch von Sauerstoff und die Bildung von Kohlendioxid im Stoffwechsel als **innere Atmung**. Beide Vorgänge sind durch den Blutkreislauf als Transportsystem miteinander verknüpft.

Im vorliegenden Kapitel wird die Physiologie der äußeren Atmung, also die Lungenfunktion beschrieben. Sie besteht aus folgenden Teilprozessen:

- Ventilation der Alveolen,
- Diffusion der Atemgase in den Alveolen,
- Perfusion der Lunge,
- Abstimmung von Belüftung und Durchblutung.

Verwendete Abkürzungen

V	Gasvolumen
$\dot{V}$	Gasmenge pro Zeiteinheit
Q	Blutvolumen
$\dot{Q}$	Blutmenge pro Zeiteinheit
p	Druck
F	fraktionelle Konzentration
A	Alveolarraum
I	Inspirationsluft
E	Expirationsluft
D	Totraum (»deadspace«)
a	arterielles Blut
v	venöses Blut
$\bar{V}$	gemischtvenöses Blut
c	Gehalt
S	Sättigung

2.1 Lungenvolumina

Lungenvolumen ist das in der Lunge befindliche Gas, Atemvolumen das ein- und ausgeatmete Gasvolumen (■ Abb. 2.1). Bei den Lungenvolumina kann zwischen statischen und dynamischen Volumina sowie zwischen mobilisierbaren und nicht mobilisierbaren Volumina unterschieden werden.

- **Dynamische Lungenvolumina:** Volumina, deren Größe vom zeitlichen Verlauf bzw. der Atemstromstärke abhängig ist.
- **Statische Lungenvolumina:** Volumina, deren Größe nicht von der Atemstromstärke abhängig ist.
- **Mobilisierbare Lungenvolumina:** Volumina, die durch die Aktivität der Atemmuskulatur ein- und ausgeatmet werden können.
- **Nichtmobilisierbares Lungenvolumen:** das auch nach maximaler Ausatmung in der Lunge verbleibende Residualvolumen.
- **Kapazität:** Lungenvolumina, die aus mehreren spirometrisch abgrenzbaren Teilvolumina zusammengesetzt sind.

Die mobilisierbaren Lungenvolumina können direkt mit einem Spirometer gemessen werden, das Residualvolumen hingegen nur indirekt, da es nicht ausgeatmet werden kann.

2.1.1 Totalkapazität der Lunge

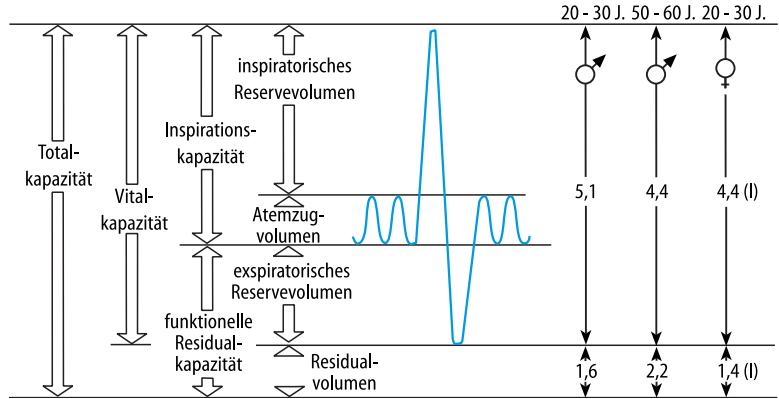
Als Totalkapazität (»total lung capacity«, TLC) wird das nach einer maximalen Inspiration in der Lunge befindliche Volumen bezeichnet. Die Totalkapazität ist aus 2 großen Teilvolumina zusammengesetzt: der Vitalkapazität und dem Residualvolumen (■ Abb. 2.1).

Vitalkapazität

Die Vitalkapazität (VC) ist die Volumendifferenz zwischen maximaler Ein- und Ausatmung, d. h. die Luftmenge, die nach einer maximalen Inspiration maximal ausgeatmet werden kann, also die Summe aus Atemzugvolumen, inspiratorischem Reservevolumen und expiratorischem Reservevolumen. Die Vitalkapazität wird spirometrisch bestimmt und kann weiter unterteilt werden in:

- **Inspiratorische Vitalkapazität (VC_I):** Volumen, das nach einer maximalen Ausatmung maximal eingeatmet werden kann.
- **Expiratorische Vitalkapazität (VC_E):** Volumen, das nach maximaler Inspiration maximal ausgeatmet werden kann.

Abb. 2.1. Lungenvolumina und Lungenkapazitäten. Die Größen hängen vom Alter und vom Geschlecht ab. (Nach Schmidt u. Lang 2007)



- **Atemzugvolumen:** Volumen, das bei jedem Atemzug ein- und ausgeatmet wird. Es beträgt beim Erwachsenen ca. 500 ml bzw. 7 ml/kg KG.
- **Inspiratorisches Reservevolumen (IRV):** Luftvolumen, das nach einer normalen Inspiration noch zusätzlich eingeatmet werden kann. Normalwert ca. 3 l.
- **Expiratorisches Reservevolumen (ERV):** Volumen, das nach einer normalen Expiration noch zusätzlich ausgeatmet werden kann. Normalwert ca. 1 l.

Der Anteil der Vitalkapazität an der Totalkapazität der Lunge beträgt etwa 74%.

Residualvolumen

Das Residualvolumen (RV) ist die Luftmenge, die nach maximaler Expiration in der Lunge verbleibt und daher spirometrisch nicht erfasst werden kann. Der Anteil des Residualvolumens an der Totalkapazität der Lunge beträgt ca. 26%. Das Residualvolumen kann mit Körperplethysmographie oder mit Fremdgasverdünnungsmethoden bestimmt werden.

Funktionelle Residualkapazität (FRC). Dies ist die Summe aus Residualvolumen und expiratorischem Reservevolumen, also das endexpiratorische Lungenvolumen: $RV + IRV$. Bei Lungengesunden entspricht das intrathorakale Gasvolumen (IGV) der FRC.

2.1.2 Sollwerte und Bedeutung der Lungenvolumina

Totalkapazität, Vitalkapazität und Residualvolumen hängen von Körpergröße, Geschlecht, Alter und Trainingszustand ab, während der Anteil der Vitalkapazität

und des Reservevolumens an der Totalkapazität weitgehend unabhängig von Geschlecht und Größe ist. Bei Frauen sind alle angeführten Volumina und Kapazitäten um 20–25% niedriger als bei Männern. Insgesamt ist die Schwankungsbreite der Messwerte selbst bei vergleichbaren Gruppen relativ groß; auch ändern sich selbst bei einigen schweren Lungenerkrankungen die Messwerte nicht wesentlich; außerdem können größere Abweichungen von den Normwerten auch durch extrapulmonale Störungen hervorgerufen werden.

Klinisch ist daher Folgendes wichtig:

Lungenvolumina sind anatomische Messgrößen; sie ermöglichen keine Aussagen über den pulmonalen Gasaustausch. Nur ausgeprägte Veränderungen können diagnostisch verwertet werden. Für die Lungenfunktion sind Veränderungen der Ventilation und Perfusion von größerer Bedeutung als Veränderungen der Lungenvolumina.

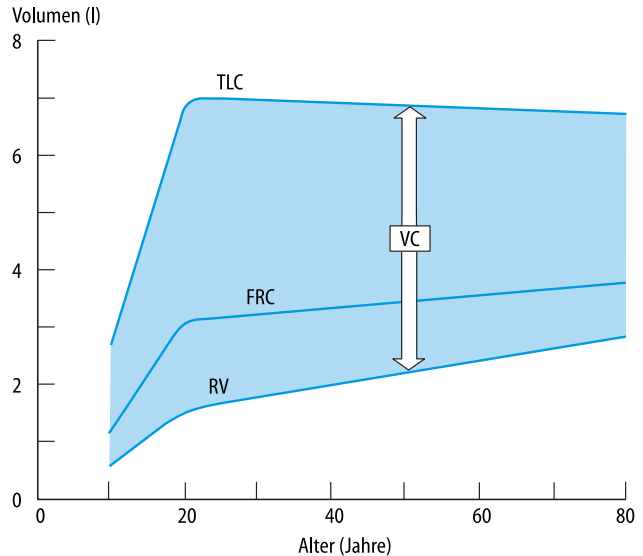
In **Tab. 2.1** sind die Normwerte der Lungenvolumina zusammengestellt.

Die Lungenvolumina werden von der Temperatur und vom Atmosphärendruck beeinflusst; daher sollten die gemessenen Werte auf BTSP-Bedingungen umgerechnet werden.

Tab. 2.1. Lungenvolumina bei gesunden jungen Männern und Frauen (Maßeinheit: l)

Parameter	Männer	Frauen
Totalkapazität, TLC	7,0	6,2
Vitalkapazität, VC	5,6	5,0
Residualvolumen, RV	1,4	1,2
Funktionelle Residualkapazität, FRC	3,2	2,8

Abb. 2.2. Altersabhängigkeit der Vitalkapazität (VC), Totalkapazität (TLC), funktionellen Residualkapazität (FRC) und des Residualvolumens (RV) beim Mann. (Nach Schmidt u. Lang 2007)



Klinische Bedeutung der Vitalkapazität

Wie bereits dargelegt, hängt die Vitalkapazität sehr stark vom Lebensalter und der Körpergröße ab. Daneben sind aber noch andere Faktoren zu berücksichtigen. Hierzu gehören:

- tageszeitliche Schwankungen,
- Körperlage,
- extrapulmonale Einflüsse,
- pulmonale Erkrankungen.

Tageszeitliche Schwankungen. Die Vitalkapazität und die Reservevolumina schwanken im Tagesverlauf um etwa 3–5% des Absolutwerts.

Körperlage. Im Liegen sind die Reservevolumina um ca. 20% niedriger als im Sitzen. Sie werden daher für klinische Zwecke nur selten bestimmt.

Extrapulmonale Einflüsse. Bestimmte außerpulmonale Faktoren können die Vitalkapazität vermindern. Hierzu gehören:

- Behinderungen der Thoraxbeweglichkeit durch Deformitäten,
- Störungen der Ventilation durch Paresen der Atemmuskulatur,
- Einschränkung der Zwerchfellbeweglichkeit, z. B. durch Aszites,
- Schmerzen im Bereich von Pleura oder Abdomen,
- Pleuraerguss, Pleuraverwachsungen.

Pulmonale Erkrankungen. Von Bedeutung sind v. a. Erkrankungen, die zum Verlust der Lungendehnbarkeit führen. So geht die Lungenfibrose mit einer Abnahme der Vitalkapazität einher, diagnostisch verwertbar allerdings erst in fortgeschrittenen Stadien. Atemwegobstruktionen können ebenfalls die Vitalkapazität einschränken, jedoch sind die Veränderungen diagnostisch nicht verwertbar.

➔ Erst eine reproduzierbare Abnahme der Vitalkapazität um >25% des Sollwerts weist auf eine wesentliche Funktionsstörung hin, ohne dass hieraus auf die Ursache geschlossen werden könnte.

Bedeutung der funktionellen Residualkapazität

Das Residualvolumen, also das nach maximaler Expiration in der Lunge verbleibende Volumen, hängt vom Alter ab (Abb. 2.2). So nimmt im höheren Lebensalter der prozentuale Anteil des Residualvolumens an der Totalkapazität auf 23–35% zu. Die funktionelle Residualkapazität, Residualvolumen + expiratorisches Reservevolumen, verändert sich hingegen weniger mit dem Alter, kann aber im Einzelfall erheblich zunehmen. Große Menschen haben eine größere FRC als kleine; Adipositas und Schwangerschaft vermindern die FRC erheblich; im Liegen ist die FRC kleiner als im Stehen, bedingt durch den Druck der Eingeweide auf das Zwerchfell. Insgesamt wirken also zahlreiche Faktoren auf die Größe der FRC ein, sodass entsprechend starke Schwankungen zu erwarten sind.

Die funktionelle Residualkapazität wirkt normalerweise als Puffer gegen zu starke Schwankungen der al-

veolären und arteriellen O_2 - und CO_2 -Partialdrücke im Verlauf des Atemzyklus. Außerdem verhindert das Residualvolumen einen Kollaps der Alveolen während der Expiration.

Verkleinerung der funktionellen Residualkapazität.

Bei einer Abnahme der FRC schwankt der alveoläre O_2 -Partialdruck in größerem Maße: Während der Expiration nähert er sich dem pO_2 des venösen Mischbluts an, während der Inspiration dem der Inspirationsluft. Dieser Effekt entspricht dem einer ungleichmäßigen Ventilation, und es entwickelt sich eine leichte Hypoxie.

Vergrößerung der funktionellen Residualkapazität.

Zwischen Residualvolumen und Belüftung der Alveolen besteht keine direkte Beziehung. Daher hat eine Zunahme des Residualvolumens und der FRC über die Normwerte hinaus keinen wesentlichen Einfluss auf den pulmonalen Gasaustausch. Allerdings wirkt eine große FRC als **Puffer** gegen starke Schwankungen der alveolären O_2 - und CO_2 -Partialdrücke. Insgesamt kann jedoch eine Zunahme der FRC mit folgenden **Nachteilen** einhergehen:

- Eine Erhöhung der inspiratorischen O_2 -Konzentration führt nicht so rasch zu einem Anstieg des alveolären pO_2 wie bei normaler FRC, denn der Sauerstoff wird in dem vergrößerten Raum zunächst stärker verdünnt.
- Bei einer vergrößerten funktionellen Residualkapazität sind die Lungen bei ruhiger Atmung überbläht.
- Ist das Residualvolumen erhöht, so sind die Lungen auch nach einer maximalen Expiration noch überbläht.
- Eine Überblähung der Lungen erhöht den anatomischen Totraum (► s. unten), eine stärkere Zunahme der FRC führt zur Weitstellung des Thorax mit Behinderung der Atemmechanik.
- Eine erhebliche Zunahme der FRC verkleinert die Inspirationskapazität, wenn nicht gleichzeitig die Totalkapazität der Lunge vergrößert ist. Hierdurch kann der Patient sein Inspirationsvolumen nicht nach Bedarf steigern; d. h. die Ventilationsreserve ist vermindert.

Klinisch ist Folgendes wichtig:

- **Obstruktive Lungenerkrankungen erhöhen, restriktive Lungenerkrankungen verkleinern das Residualvolumen. Eine genaue Beurteilung der Befunde ist allerdings nur zusammen mit anderen Ventilationsparametern möglich. Daher ist die alleinige Messung von Residualvolumen und FRC diagnostisch nicht sinnvoll.**

2.2 Ventilation der Lunge

Als Ventilation oder Belüftung der Lunge wird der zyklische Vorgang der Ein- und Ausatmung der Atemluft bezeichnet. Wichtigste Aufgabe der Ventilation ist die Aufrechterhaltung physiologischer O_2 - und CO_2 -Partialdrücke in der Alveolarluft und im arteriellen Blut. Da aus der Alveolarluft ständig Sauerstoff in das gemischtvenöse Blut aufgenommen und Kohlendioxid aus diesem Blut in die Alveolarluft abgegeben wird, muss die Alveolarluft ständig erneuert werden, und zwar durch die Einatmung von Frischluft und die Ausatmung von Alveolarluft.

- **Die Ventilation wird so gesteuert, dass in der Alveolarluft ein pO_2 von ca. 100 mm Hg und ein pCO_2 von ca. 40 mm Hg herrschen.**

Bei der Ventilation muss zwischen Atemzugvolumen und alveolärer Ventilation unterschieden werden. Das Atemzugvolumen umfasst das gesamte mit jedem Atemzug eingeatmete Gasvolumen im Respirationstrakt, die alveoläre Ventilation hingegen nur den Anteil des Atemzugvolumens, der bis in die Alveolen gelangt. Nur dieses Volumen nimmt am Gasaustausch zwischen Alveolen und Blut teil. Die alveoläre Ventilation ist daher immer geringer als die Gesamtventilation.

Die alveoläre Ventilation kann durch folgende Parameter beschrieben werden:

- Atemfrequenz,
- Atemzugvolumen,
- Totraumvolumen,
- Atemminutenvolumen.

2.2.1 Atemfrequenz

Die Atemfrequenz des Erwachsenen beträgt in Ruhe etwa 7–20 Atemzüge/min, unterliegt also großen individuellen Schwankungen. Kinder atmen schneller als Erwachsene: Je jünger das Kind, desto höher die Atemfrequenz; am höchsten liegt die Atemfrequenz bei Neugeborenen. Unter körperlicher Belastung nimmt die Atemfrequenz ebenfalls zu. Bei Lungenerkrankungen oder auch nicht pulmonal bedingten Störungen der Atmung kann die Atemfrequenz erhöht oder erniedrigt sein. Eine gesteigerte Atemfrequenz wird als **Tachypnoe** bezeichnet, eine verminderte Atemfrequenz als **Bradypnoe**.

Aus der Atemfrequenz allein kann die Qualität der Ventilation meist nicht hinreichend beurteilt werden; so kann bei langsamer oder schneller Atmung eine ungenügende oder zu hohe Ventilation, also eine Hypo- oder Hyperventilation vorliegen.