



Reinhard Larsen · Thomas Ziegenfuß
Alexander Mathes

Beatmung

Indikationen – Techniken –
Krankheitsbilder

6. Auflage

EBOOK INSIDE

 Springer

Beatmung

EBOOK INSIDE

Die Zugangsinformationen zum eBook inside finden Sie am Ende des Buchs.

Reinhard Larsen
Thomas Ziegenfuß
Alexander Mathes

Beatmung

Indikationen – Techniken – Krankheitsbilder

6., vollständig überarbeitete und aktualisierte Auflage

Mit 125 Abbildungen

Reinhard Larsen
Homburg, Germany

Thomas Ziegenfuß
St. Josef Krankenhaus, Moers, Germany

Alexander Mathes
Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin, Uniklinik Köln, Germany

ISBN 978-3-662-54852-3 978-3-662-54853-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-54853-0>

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

Springer

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 1997, 1999, 2004, 2009, 2013, 2018

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Umschlaggestaltung: deblik Berlin
Fotonachweis Umschlag: © K.-H. Krauskopf

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH, DE
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Für die Neuauflage wurden v. a. die beatmungstechnischen und die klinischen Kapitel grundlegend bearbeitet, erweitert und aktualisiert. Neu aufgenommen wurden zudem Kapitel zur postoperativen Beatmung, zur Transportbeatmung des Intensivpatienten und zur Beatmung am Lebensende. Das Kapitel zur Beatmung von Kindern wurde wegen der vorgeschriebenen Intensivbehandlung von Kindern durch spezifisch weitergebildete Pädiater auf die intraoperative Phase beschränkt.

Wir (Reinhard Larsen und Thomas Ziegenfuß) freuen uns, dass wir Herrn Priv.-Doz. Dr. Alexander Mathes, Oberarzt der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin der Uniklinik Köln, als engagierten Koautoren für diese Neuauflage gewinnen konnten. Mit ihm und seinem frischen, unverstellten Blick auf scheinbar Unentbehrliches und Bewährtes sind neue Impulse, Ideen und Vorstellungen in den Text eingeflossen. Ihm sind auch zahlreiche Umstrukturierungen zu verdanken, die dem Intensivmediziner das praktische Vorgehen bei den unterschiedlichen Beatmungsproblemen erleichtern werden.

Wie immer gilt unser Dank den Mitarbeitern des Springer Verlages, Frau Ulrike Hartmann und Frau Dr. Esther Dür, für ihre unermüdliche Unterstützung des Projektes sowie Frau Dipl.-Biol. Stefanie Teichert für ihr hervorragendes Lektorat.

Weiterhin danken wir allen Lesern für ihre kritischen Anmerkungen und Verbesserungsvorschläge.

Reinhard Larsen
Thomas Ziegenfuß
Alexander Mathes

Homburg, im Oktober 2017

Über die Autoren



Prof. Dr. Reinhard Larsen

Ehemaliger Direktor der Klinik für Anästhesiologie, Intensivmedizin und Schmerztherapie am Universitätsklinikum des Saarlandes sowie Autor zahlreicher Bücher im Bereich der Anästhesie und Intensivmedizin.



Dr. Thomas Ziegenfuß

Dr. Thomas Ziegenfuß ist Chefarzt der Abteilung für Anästhesie und Intensivmedizin des St. Josef-Krankenhauses in Moers. An der Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin der Universitätskliniken des Saarlandes war er Oberarzt, langjähriger Einsatzleiter für den Notarztdienst und Leitender Notarzt.



Dr. Alexander Mathes

Priv.-Doz. Dr. Alexander Mathes, LL. M., ist Oberarzt der Klinik für Anästhesiologie und Operative Intensivmedizin der Universitätsklinik Köln. Er war langjährig tätig als Oberarzt im Bereich der interdisziplinären operativen Intensivmedizin an der Klinik für Anästhesiologie und Intensivmedizin der Universitätskliniken des Saarlandes sowie der Klinik für Anästhesiologie der Universitätsklinik Düsseldorf.

Inhaltsverzeichnis

I Repetitorium der Grundlagen

1	Anatomie der Atmungsorgane	3
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
2	Physiologie der Atmung	21
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
3	Blutgase	63
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
4	Säure-Basen-Haushalt	81
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
5	Respiratorische Insuffizienz – Allgemeine Pathophysiologie	99
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	

II Basistechniken

6	Endotracheale Intubation	117
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
7	Tracheotomie	157
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
8	Fiberoptische Bronchoskopie	175
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
9	Atemgaskonditionierung, endotracheale Absaugung, physikalische Therapie	183
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
10	Analgesie, Sedierung und Muskelrelaxierung	201
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
11	Thoraxdrainagen	215
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	

III Praxis der Beatmung

12	Beginn der Beatmung	229
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	

13	Nichtinvasive Atemhilfen und nichtinvasive Beatmung (NIV)	241
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
14	Beatmungsformen: Übersicht	249
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
15	Einstellgrößen am Beatmungsgerät	263
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
16	Klassische Beatmungsverfahren	285
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
17	Spezielle Beatmungsverfahren	301
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
18	Extrakorporale Lungenunterstützung	339
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
19	Überwachung der Beatmung	349
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
20	Auswirkungen und Komplikationen der Beatmung	375
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
21	Entwöhnung von der Beatmung (Weaning)	399
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
22	Intra- und postoperative Beatmung	409
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
23	Intraoperative Beatmung von Kindern	423
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß, Alexander Mathes</i>	
24	Transport des beatmeten Patienten	431
	<i>Alexander Mathes, Reinhard Larsen</i>	
IV	Krankheitsbilder und besondere Situationen	
25	Akutes Lungenversagen (ARDS)	439
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
26	Akute respiratorische Insuffizienz bei chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung (AECOPD)	461
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
27	Status asthmaticus	481
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	

28	Beatmung beim Thoraxtrauma	493
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
29	Beatmung bei Schädel-Hirn-Trauma und erhöhtem intrakraniellm Druck	503
	<i>Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß</i>	
30	Beatmung am Lebensende	509
	<i>Alexander Mathes, Reinhard Larsen</i>	
	 Serviceteil	515
	Stichwortverzeichnis	516

Repetitorium der Grundlagen

Kapitel 1 **Anatomie der Atmungsorgane** – 3
Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

Kapitel 2 **Physiologie der Atmung** – 21
Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

Kapitel 3 **Blutgase** – 63
Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

Kapitel 4 **Säure-Basen-Haushalt** – 81
Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

Kapitel 5 **Respiratorische Insuffizienz –
Allgemeine Pathophysiologie** – 99
Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

Anatomie der Atmungsorgane

Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

1.1 Atemwege – 4

1.1.1 Trachea – 5

1.1.2 Extrapulmonale Hauptbronchen – 5

1.2 Lungen – 6

1.2.1 Lungenlappen – 6

1.2.2 Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia – 8

1.2.3 Lungenläppchen, Lobuli pulmonalis – 9

1.2.4 Azinus – 10

1.2.5 Bronchialbaum der Lunge – 10

1.2.6 Alveolen, der Ort des Gasaustausches – 13

1.2.7 Blutgefäßsystem der Lunge – 15

1.2.8 Innervation der Lunge – 17

1.3 Pleura und Pleurahöhlen – 17

1.3.1 Lungen- und Pleuragrenzen – 18

1.4 Thoraxskelett – 19

1.5 Atemmuskulatur – 19

Weiterführende Literatur – 20

1 ? Fragen zum Einstieg

1. Was bezeichnen die drei Begriffe **äußere Atmung**, **innere Atmung** und **Ventilation**?
2. Wie lang ist der rechte Hauptbronchus, wie lang der linke?
3. Aus welchen Lappen besteht die rechte Lunge, aus welchen die linke?
4. Welche Bronchen können ihren Innendurchmesser durch Kontraktion der Wandmuskulatur stark verkleinern und vergrößern?
5. Wie viel ml Blut befinden sich im Lungenkreislauf?
6. Wie groß in cm ist die Atemverschieblichkeit der Lungen an der vorderen Thoraxwand und wie groß an der Axillar- und der Skapularlinie?
7. Welcher ist der Hauptmuskel der Atmung?
8. Welche Interkostalmuskeln wirken inspiratorisch, welche expiratorisch?
9. Welche Muskeln gehören zu den Atemhilfsmuskeln, und wann treten sie in Funktion?

Die Atmungsorgane bestehen aus den Atemwegen und den Lungen. Wichtigste Funktion der Atmungsorgane ist die **äußere Atmung**, d. h. 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. Die Belüftung der Lungen wird als **Ventilation** bezeichnet.

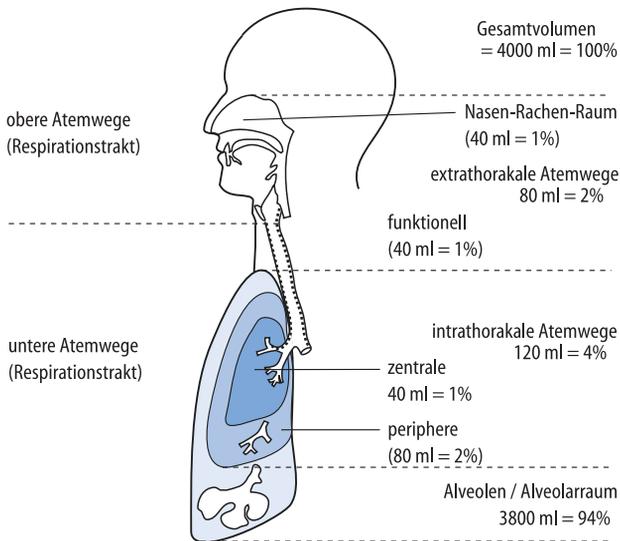
1.1 Atemwege

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

- **Obere Atemwege:** Nasenhöhle (10–14 cm lang), Pharynx (12–15 cm lang), Kehlkopf
- **Untere Atemwege:** Trachea, Bronchialsystem der Lunge

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

- **Luftleitende Abschnitte:** Nasenhöhle, Pharynx, Kehlkopf, Trachea, Bronchen, Bronchiolen, Bronchioli terminales
- **Gasaustauschende Abschnitte:** Bronchioli respiratorii, Alveolen



■ **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

Die Atemwege beginnen mit den beiden Nasenlöchern und enden in den Alveolen. Zwischen Nase und Alveolen sind die luftleitenden Abschnitte geschaltet. Sie leiten die Atemluft, am Gasaustausch sind sie dagegen 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 Kind: 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 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 und anderen Operationen im Halsbereich. 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 Knorpelspangen verbunden, über der Pars membranacea dagegen 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.

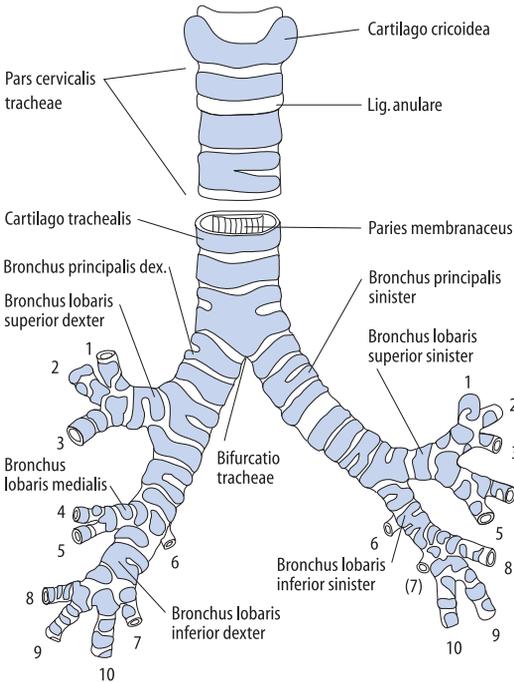
Die Blutversorgung der Trachea erfolgt überwiegend aus der A. thyroidea inferior.

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 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°



▣ **Abb. 1.2** Trachea, Haupt-, Lappen- und Segmentbronchien. Der mittlere Trachealabschnitt wurde weggelassen, um den Paries membranaceus darzustellen. (Aus: Schiebeler 2005)

- 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 als in den linken.

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 Knorpelspannen 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.

Beide Lungen sind grundsätzlich ähnlich gestaltet und gegliedert, allerdings 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.

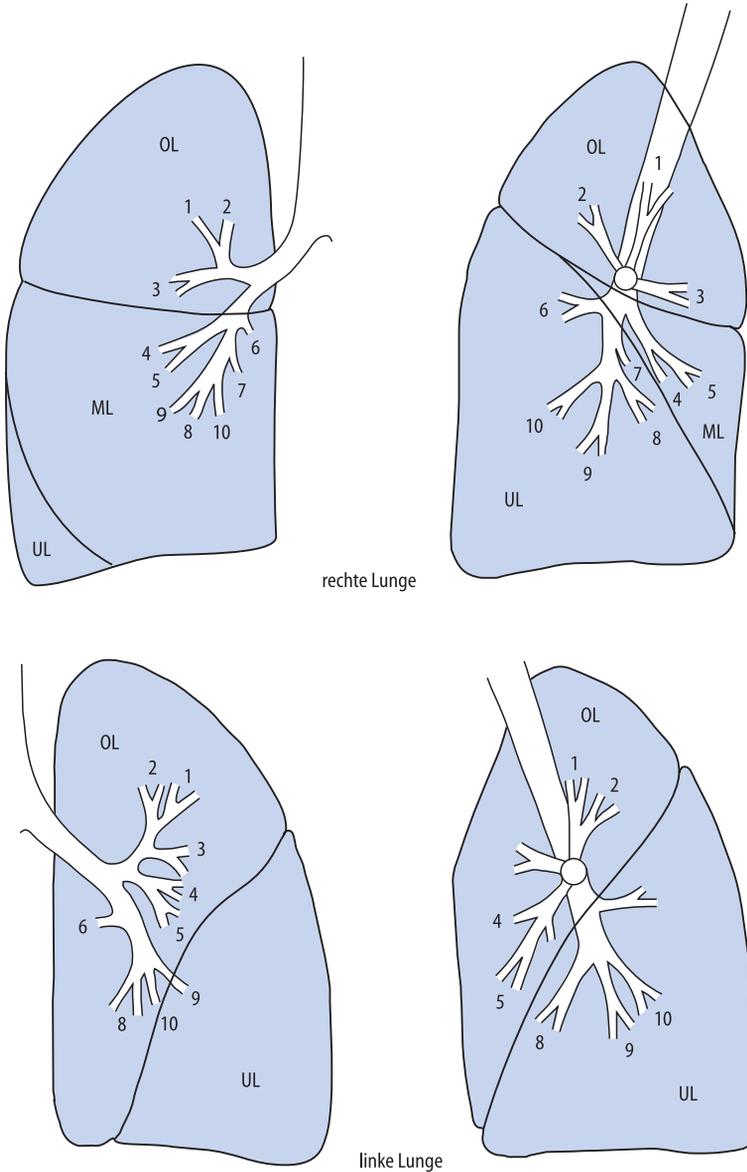
Rechte Lunge Die rechte Lunge besteht aus 3 Lappen:

- 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



■ **Abb. 1.3** Topografie 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

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

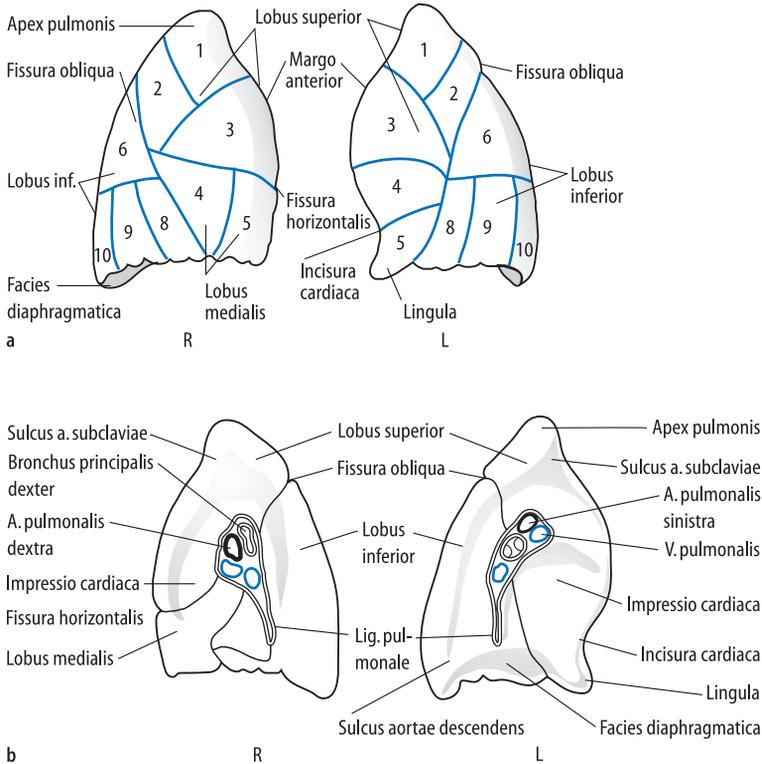


Abb. 1.4 Seitenansicht (Facies costalis) der rechten und linken Lunge; Segmentgrenzen rot, Lungensegmente durch Ziffern gekennzeichnet; Felerdung der Lungenoberfläche entsprechend den Lobuli. **b** Mediale Ansicht der rechten und linken Lunge; Lungenhilus mit Arterien (schwarz), Venen (blau) und Bronchen (linker Hauptbronchus nicht bezeichnet). (Aus: Schiebler 2005)

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.

Oberfläche der Lunge können die Segmente nicht erkannt werden. Die rechte Lunge besteht in der Regel aus 10 Segmenten (Tab. 1.1), die linke hingegen aus 9 (Tab. 1.2).

Die Segmentbronchen treten am Hilus ein und verlaufen in der Segmentachse; sie verzweigen sich im Segment mit 6–12 dichotomen Aufteilungen in die mittleren und kleinen Bronchen, auf die schließlich die Bronchiolen folgen.

1.2.2 Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia

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

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

■ **Tab. 1.1** Lungensegmente und zugeordnete Bronchen der rechten Lunge

Rechte Lungensegmente	Rechte Bronchen
Lobus superior	Bronchus lobaris superior dexter
Segmentum apicale (1)	Bronchus segmentalis apicalis
Segmentum posterius (2)	Bronchus segmentalis posterior
Segmentum anterius (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 anterius (8)	Bronchus segmentalis basalis anterior
Segmentum basale laterale (9)	Bronchus segmentalis basalis lateralis
Segmentum basale posterius (10)	Bronchus segmentalis basalis posterior

■ **Tab. 1.2** Lungensegmente und zugeordnete Bronchen der linken Lunge

Linke Lungensegmente	Linke Bronchen
Lobus superior	Bronchus lobaris superior sinister
Segmentum apicoposterius (1+2)	Bronchus segmentalis apicoposterior
Segmentum anterius (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 anterius (8)	Bronchus segmentalis basalis anterior
Segmentum basale laterale (9)	Bronchus segmentalis basalis lateralis
Segmentum basale posterius (10)	Bronchus segmentalis basalis posterior

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 er-

kennen. 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 4-mal aufteilen. Die letzte Generation sind die Bronchioli

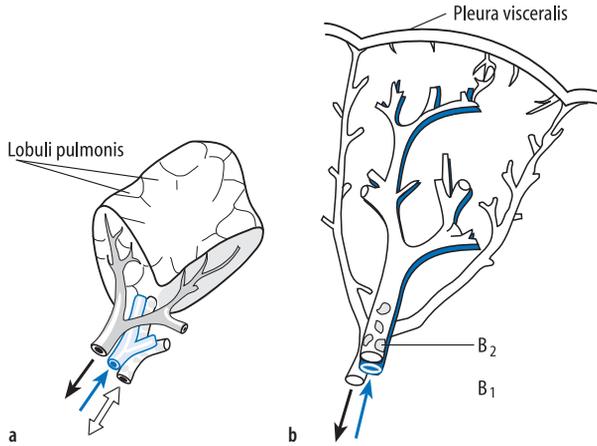


Abb. 1.5 a Bronchopulmonales Segment. Die Segmentarterie und der Bronchus segmentalis treten an der Kante in das keilförmige Segment ein, die Vene (blau) verläuft intersegmental. Lobuli durch eingelagerten Kohlenstaub scharf abgegrenzt. b Schematische Darstellung eines Lobulus. B1 kleiner Bronchus, B2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

terminales. Aus ihnen gehen die Endaufzweigungen des Bronchialbaums hervor, auf denen sich die Alveolen befinden.

- Segmentbronchen
- Bronchiolen
- Terminale Bronchiolen

1.2.4 Azinus

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

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

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 (▶ Abschn. 1.1.2)
- Lappenbronchen

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, der 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 Lap-

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

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

penbronchen 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 Knorpelspannen, 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, also 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 aneinander liegenden 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.

1 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 spiralg 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 verspannt. Bei Erschlaffung der Muskulatur hält der elastische Zug das Lumen der Bronchiolen offen; die 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 gemischt seromuköses 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.

1.2.6 Alveolen, der 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 Interalveolarsepten gebildet, wobei benachbarte 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 Lungenteilungen ist für den pulmonalen Gasaustausch von Bedeutung. Die von den Alveolarwänden gebildete Gasaustauschoberfläche beträgt 70–140 m², abhängig von Geschlecht, Körpergröße, Alter und Trainingszustand.

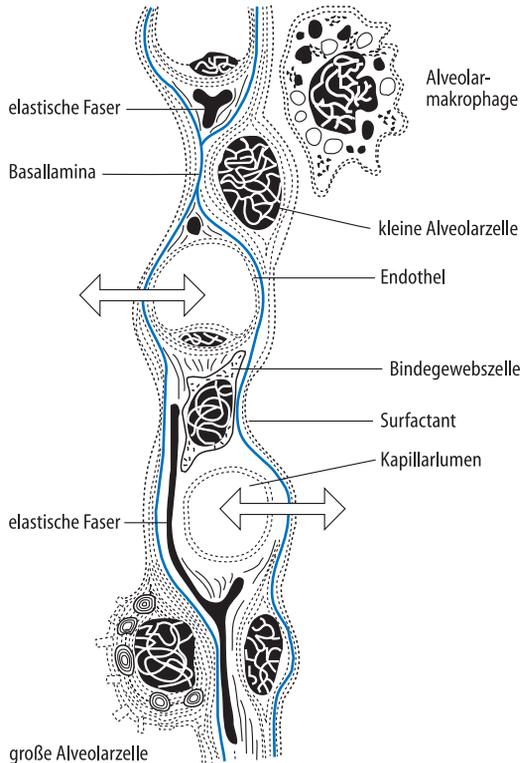
Interalveolarsepten

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

- Bindegewebsseptum
- Alveoläres Kapillarnetz
- Alveolarepithel

Bindegewebsseptum Das Bindegewebe der Interalveolarsepten besteht aus kollagenen und retikulären Bindegewebsfasern und einem dichten elastischen Fasernetz, der Fortsetzung des elastischen Fasernetzes der Wände der Bronchiolen und des peribronchiolären Gewebe. Hierdurch sind die Interalveolarsepten 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

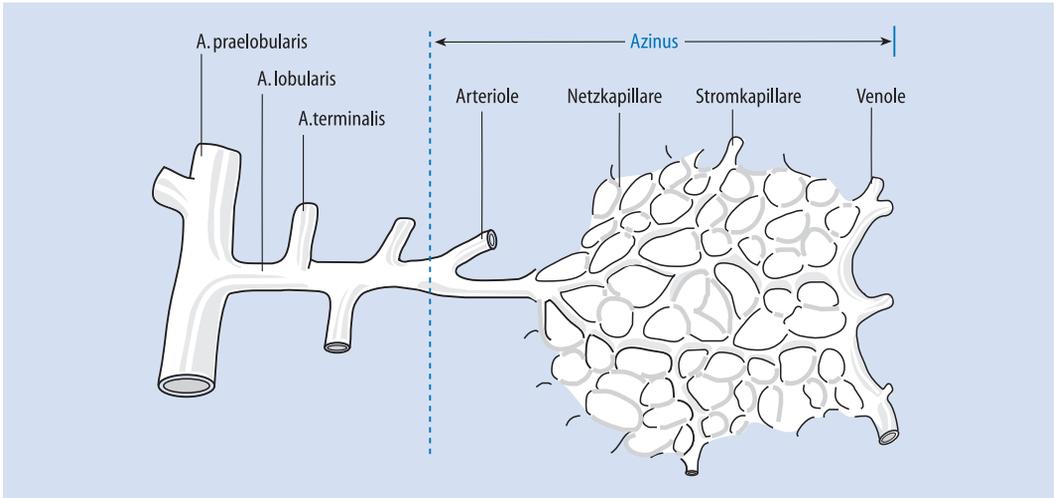


■ **Abb. 1.7** Interalveolarseptum. 3 Kapillarquerschnitte im Bindegewebe. Die Basalmembran (blau) der Kapillaren und Alveolarepithelzellen sind an der Kontaktstelle zu einer gemeinsamen Membran verschmolzen. Pfeile: Weg des Gasaustausches

werden, ohne dass hierdurch der gestreckte Verlauf verloren ginge. Dieses Verhalten ist für die Interalveolarsepten 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 Interalveolarsepten 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 Interalveolarsepten keine geschlossene Schicht, sondern eine Platte mit zahlreichen großen Löchern und einem Netzwerk aus weitmaschigen Faserbündeln.



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

Alveoläres Kapillarnetz Das flächenhafte, einschichtige Kapillarnetz der Alveolen wird von der Bindegewebsplatte getragen (▣ Abb. 1.8). 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 kontinuierliche Zelllage und werden daher auch als **Deckzellen** der Interalveolarsepten bezeichnet. Obwohl gering an Zahl, bedecken diese Zellen mehr als 90 % der Oberfläche der Interalveolarsepten. 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 Auflage-

stelle 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 Interalveolarsepten 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 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 ausbreiten. 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. Da-

neben 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 Interalveolarsepten, 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. dem ARDS zugeschrieben wird.

Blut-Luft-Schranke

In den Interalveolarsepten 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 nur etwa $\frac{1}{10}$ des Widerstands der Körpergefäße. Lungenkreislauf, Körpervenen 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 Bron-

chen 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-alveolaresepten 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 spiralige Muskelzellbündel, die durch muskelfreie Streifen unterbrochen werden und verlaufen bereits in den Inter-alveolaresepten. 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-alveolaresepten 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 Muskelschicht, 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 kau-

dal 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 Kapillarbett. Bei körperlicher Anstrengung kann die Blutmenge im Kapillarbett 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 zwei 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. pulmbronchiales, 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 parasymphatischen 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 seit-

lich 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 **Pleurgrenzen** 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.

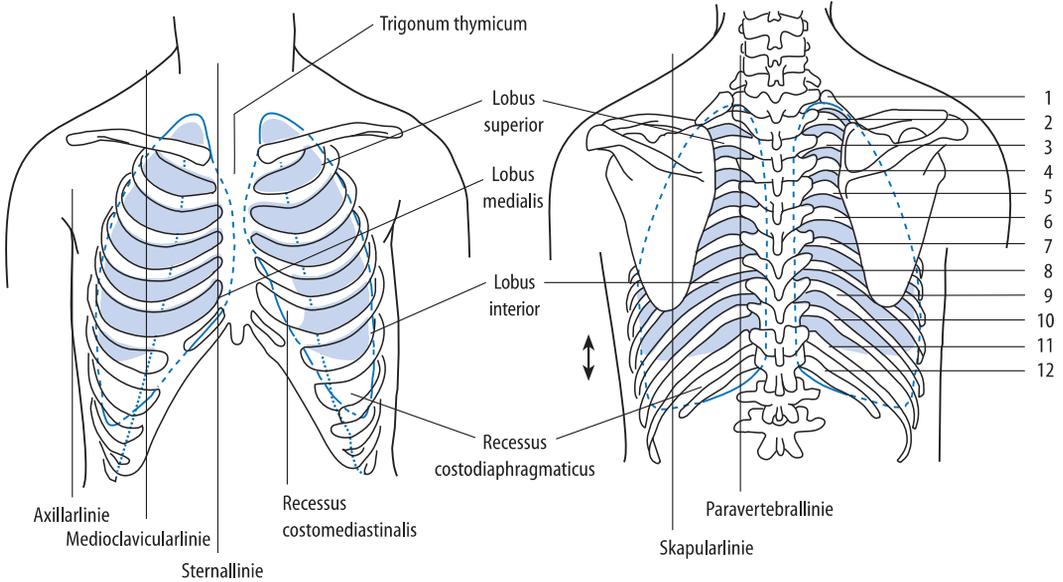
Zwischen Pleura parietalis und Pleura visceralis besteht ein kapillärer Spalt, der mit geringer Menge, ca. 5 ml, seröser Flüssigkeit gefüllt ist. Diese Flüssigkeit wird vom Mesothel beider Pleuren gebildet und auch resorbiert.

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



▣ **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. (Aus: Schiebler 2005)

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 Dies ist der tiefe 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 der 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 topografischer Beziehung, wobei die Grenzen der Pleura parietalis fixiert sind, während sich die Lungengrenzen unter der Atmung verschieben. Für die Bestimmung der

Lungen- und Pleuragrenzen sind folgende Hilfslinien wichtig (▣ Abb. 1.9):

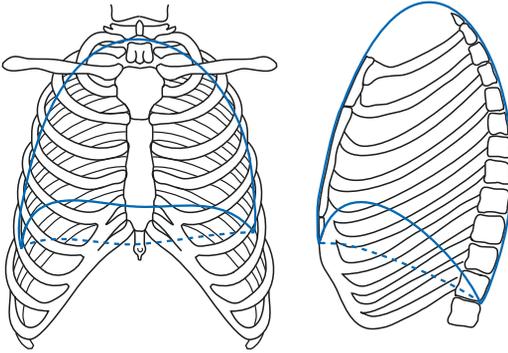
- ▣ Linea sternalis
- ▣ Linea medioclavicularis
- ▣ Linea axillaris media
- ▣ Linea scapularis
- ▣ Linea paravertebralis

1.3.1 Lungen- und Pleuragrenzen

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

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



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

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; größere 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 vereinigen. 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 im Quer- und Tiefendurchmesser (■ Abb. 1.9 und ■ Abb. 1.10).

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 kuppelförmig 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.

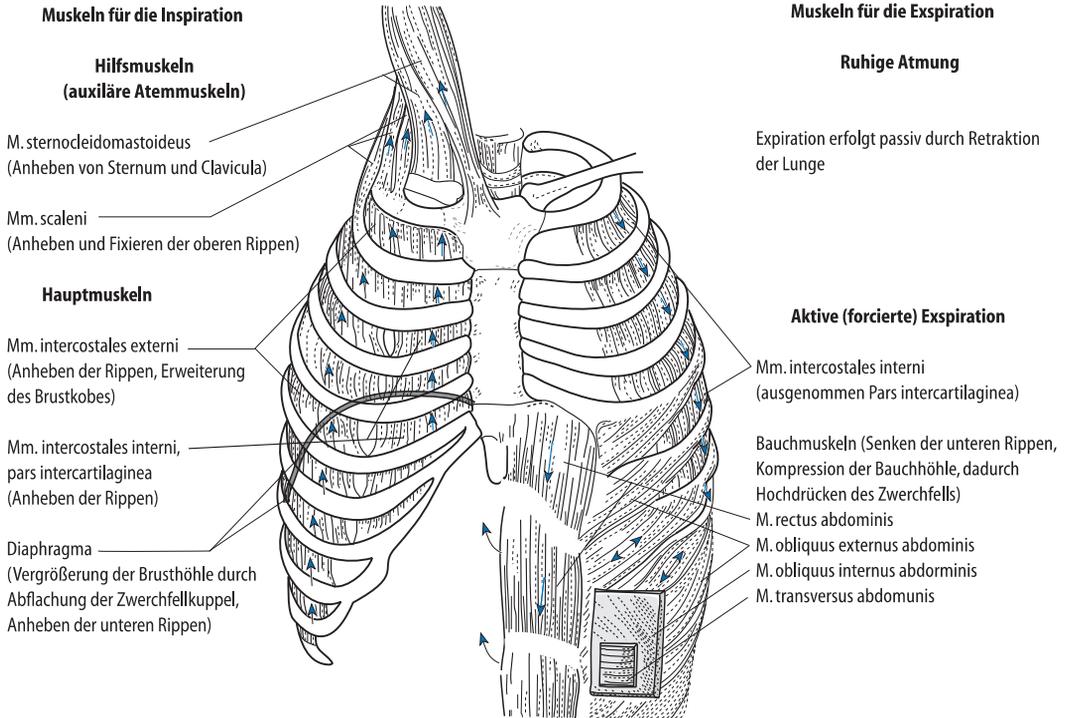
Im Zwerchfell befinden sich 3 große Öffnungen, durch die jeweils der Ösophagus, die V. cava und die Aorta ziehen. An der Oberseite wird das Zwerchfell von der Fascia phrenicopleuralis überzogen, die wiederum von der Pleura diaphragmatica bedeckt wird. An der Unterseite befindet sich, bis auf die Anheftung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

Die **Innervation** des Zwerchfells erfolgt durch den N. phrenicus (C3–C4) und die Nebenphrenici (Nn. phrenici accessorii), 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.**

Interkostalmuskulatur Sie besteht aus einer äußeren und einer inneren Schicht, die sich überkreuzen und in entgegengesetzte Richtung verlaufen (■ Abb. 1.11). 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 Interkostalmuskeln werden durch die entsprechenden Interkostalnerven innerviert.

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



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

Atemhilfsmuskulatur Hierzu gehören die Bauchmuskeln, Mm. erector spinae, scaleni, sternocleidomastoidei und serrati (■ Abb. 1.11). Diese Muskeln treten bei gesteigerter Atmung oder erschwelter Inspiration, z. B. bei chronisch-obstruktiver Lungenerkrankung (COPD), in Funktion.

Weiterführende Literatur

Beachey W (2007) Respiratory care anatomy and physiology. Mosby, St. Louis
 Bösch D (2014) Lunge und Atemwege. Springer, Berlin Heidelberg New York
 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

Reinhard Larsen, Thomas Ziegenfuß

2.1 Lungenvolumina – 24

2.1.1 Totalkapazität der Lunge – 24

2.1.2 Sollwerte und Bedeutung der Lungenvolumina – 25

2.2 Ventilation der Lunge – 27

2.2.1 Atemfrequenz – 27

2.2.2 Atemzugvolumen – 27

2.2.3 Anatomischer Totraum – 27

2.2.4 Physiologischer Totraum – 28

2.2.5 Atemminutenvolumen – 28

2.2.6 Alveoläre Ventilation – 28

2.3 Atemmechanik – 29

2.3.1 Atemmuskulatur – 29

2.3.2 Warum strömt die Atemluft? – 30

2.3.3 Welche Faktoren bestimmen das Füllvolumen der Lunge? – 30

2.3.4 Elastizität der Lunge – 32

2.3.5 Elastizität des Thorax – 33

2.3.6 Compliance des Atemapparats – 33

2.3.7 Atemwegwiderstand – 35

2.3.8 Gewebewiderstand und Atembewegungswiderstand – 38

2.3.9 Atemarbeit – 38

2.4 Lungenkreislauf – 39

2.4.1 Drücke im Lungenkreislauf – 40

2.4.2 Pulmonaler Gefäßwiderstand – 42

2.4.3 Lungendurchblutung – 43

2.5 Ungleichmäßige Verteilung der alveolären Ventilation – 45

2.6 Verhältnis von Ventilation und Perfusion – 45

2.6.1 Alveolärer Totraum – 46

2.6.2 Shuntdurchblutung – 46

2.7 Pulmonaler Gasaustausch – 46

2.7.1 Zusammensetzung der Inspirationsluft – 46

2.7.2 Partialdrücke der Atemgase – 47

2.7.3 Alveoläre Ventilation – 47

2.7.4 CO₂-Abgabe, O₂-Aufnahme und alveoläre Atemgasfraktionen – 48

2.7.5 Alveoläre Partialdrücke – 50

2.8 Regulation der Atmung – 55

2.8.1 Zentrale Rhythmogenese – 55

2.8.2 Chemische Regulation der Atmung – 56

2.8.3 Beeinflussung der Atmung durch zentrale
und reflektorische Faktoren – 58

2.8.4 Atemanhalten – 59

2.9 Nichtrespiratorische Funktionen der Lunge – 59

2.9.1 Schutzfunktionen und Infektionsabwehr – 60

2.9.2 Metabolische und Speicherfunktionen der Lunge – 60

Weiterführende Literatur – 61