

Reinhard Larsen
Alexander Mathes

Beatmung

Indikationen - Techniken - Krankheitsbilder

7. Auflage

 Springer

Beatmung

Reinhard Larsen • Alexander Mathes

Beatmung

Indikationen - Techniken - Krankheitsbilder

7. Auflage

 Springer

Reinhard Larsen
Homburg, Deutschland

Alexander Mathes
Köln, Deutschland

ISBN 978-3-662-64535-2 ISBN 978-3-662-64536-9 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64536-9>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 1997, 1999, 2004, 2009, 2013, 2018, 2023

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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.

Planung/Lektorat: Ulrike Hartmann

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort zur 7. Auflage

Nach 25 Jahren und 6 erfolgreichen Auflagen hat sich Herr Dr. Thomas Ziegenfuß, einer der beiden Begründer des Buches, in den Ruhestand verabschiedet. Wir danken ihm sehr herzlich für die ungetrübte Zusammenarbeit und erinnern ihn an eine nach wie vor gültige Erkenntnis: „Nihil agere delectat.“

Für die Neuauflage hat Herr Professor A. Mathes alle beatmungstechnischen und klinischen Kapitel gründlich überarbeitet, teilweise umstrukturiert, gestrafft und vollständig aktualisiert. Neu aufgenommen wurden das ► Kap. 27 über respiratorische Viruserkrankungen, einschließlich COVID-19, sowie das ► Kap. 33 zur Beatmung bei Kapazitätsengpässen, ergänzt durch neue Leitlinien oder deren Aktualisierungen und neue technische Verfahren wie die herzdruckmassagen-synchronisierte Beatmung.

Unser Dank gilt den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Springer Verlags, ganz besonders Frau Ulrike Hartmann, die das Buchprojekt seit vielen Jahren engagiert begleitet und unterstützt.

Reinhard Larsen

Homburg und Köln

Alexander Mathes

Homburg und Köln

im Januar 2023

Übersicht: Beatmungsformen

■ Tab. 1 Übersicht über verschiedene Beatmungsformen

| Name | Abkürzungen | Merkmale |
|---|--------------------------------------|---|
| Kontrollierte Beatmung | | |
| Volumenkontrollierte Beatmung | VCV, VC-CMV | Volumen- und zeitgesteuerter Atemhub |
| Druckkontrollierte Beatmung | PCV, PC-CMV | Druck- und zeitgesteuerter Atemhub |
| Hybridbeatmung | PCV-VG, PRVC, Dual-control, Autoflow | Druckkontrollierte Beatmung mit Zielvolumenkontrolle |
| Augmentierende Beatmung | | |
| Kontinuierlich positiver Atemwegsdruck | CPAP | Spontanatmung auf kontinuierlich erhöhtem Druckniveau |
| Volumenunterstützte Spontanatmung | VC-A/C | Patientengetriggerte, mandatorische, volumenkontrollierter Atemhub |
| Druckunterstützte Spontanatmung | PSV, ASB, IPS, IFA, HIS, IA, PS | Patientengetriggerte, druckgeregelte, flussgesteuerte Unterstützung |
| Proportional druckunterstützte Spontanatmung | PAV, PPS | Adaptive Druckunterstützung in Abhängigkeit der Einatembemühung |
| Variabel druckunterstützte Spontanatmung | VPS, noisy PSV | Zufallsgesteuerte, variabel druckunterstützte Spontanatmung |
| Biphasische positive Atemdruckformen | BIPAP | Biphasische druckkontrollierte Beatmung mit Möglichkeit der Spontanatmung auf beiden Druckniveaus |
| Biphasische Beatmung mit Expirationsunterstützung | APRV | Biphasische druckregulierte Beatmung mit Spontanatemmöglichkeit |
| Intermittierend mandatorische Beatmung | IMV, SIMV | Druck- oder volumenkontrollierte Beatmung mit Mindestfrequenz und Möglichkeit der (synchronisierten) Spontanatmung im Intervall |
| Mandatorische volumenunterstützende Beatmung | MMV, AMV | Spontanatmung mit Mindest-Atemminutenvolumen und volumenkontrollierter Unterstützung |

| Name | Abkürzungen | Merkmale |
|---|------------------------|---|
| Spezielle Beatmungsformen | | |
| Adaptive Beatmungsunterstützung | ASV | In Abhängigkeit der Lungenmechanik variable Druckunterstützung |
| Neural adaptive Beatmung | NAVA | Zwerchfellregulierte, druckunterstützte Spontanatmung |
| Beatmung mit umgekehrtem Atemzeitverhältnis | IRV | Kombinationsverfahren mit verlängerter Inspirationszeit |
| Hochfrequenzbeatmung | HFV, HFPPV, HFJV, HFOV | Beatmung mit extrem hohen Atemfrequenzen und geringen Atemhüben |
| <p>Misch- und Kombinationsverfahren sind geräteabhängig möglich (z. B. CPAP/ASB oder BIPAP/PSV). Cave: Die terminologische Vielfalt an Herstellerbezeichnungen und technischen Ähnlichkeiten kann zu Verwechslungen führen (z. B. bei BIPAP und APRV)</p> | | |

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----|---|-----|
| 1 | Anatomie der Atmungsorgane | 1 |
| 2 | Physiologie der Atmung | 25 |
| 3 | Blutgase | 71 |
| 4 | Säure-Basen-Haushalt | 91 |
| 5 | Respiratorische Insuffizienz | 111 |
| 6 | Endotracheale Intubation | 129 |
| 7 | Tracheotomie | 163 |
| 8 | Fiberoptische Bronchoskopie | 183 |
| 9 | Supportive Therapie und Lagerungstherapie | 191 |
| 10 | Analgosedierung, Muskelrelaxierung und Delirprävention | 211 |
| 11 | Thoraxdrainagen, Pleuradrainagen | 227 |
| 12 | Maschinelle Beatmung: Grundlagen, Klassifikation und Verbreitung | 241 |
| 13 | Beginn und Ziele der Beatmung | 261 |
| 14 | Einstellgrößen am Beatmungsgerät | 275 |
| 15 | Nichtinvasive Atemhilfen: NIV, HFNC und CPAP | 301 |
| 16 | Kontrollierte Beatmungsverfahren | 315 |
| 17 | Unterstützende Beatmungsverfahren | 325 |
| 18 | Spezielle Beatmungsverfahren | 345 |
| 19 | Extrakorporale Lungenunterstützung | 365 |
| 20 | Überwachung der Beatmung | 379 |
| 21 | Auswirkungen und Komplikationen der Beatmung | 411 |
| 22 | Entwöhnung von der Beatmung – Weaning | 437 |

| | | |
|----|--|-----|
| 23 | Intra- und postoperative Beatmung | 451 |
| 24 | Intraoperative Beatmung von Kindern | 471 |
| 25 | Transport des beatmeten Patienten | 479 |
| 26 | Akutes Lungenversagen (ARDS) | 487 |
| 27 | Beatmung bei respiratorischen Viruserkrankungen | 513 |
| 28 | Akute respiratorische Insuffizienz bei chronisch obstruktiver Lungenerkrankung (COPD) | 525 |
| 29 | Asthmaanfall und Status asthmaticus | 549 |
| 30 | Beatmung bei Thorax- und Polytrauma | 565 |
| 31 | Beatmung bei Schädel-Hirn-Trauma und erhöhtem intrakraniellm Druck | 577 |
| 32 | Palliative Beatmung | 585 |
| 33 | Beatmung bei Kapazitätsengpässen | 591 |
| | Serviceteil | |
| | Stichwortverzeichnis | 603 |

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.



Prof. Dr. Alexander Mathes

Prof. 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.

Wichtige Abkürzungen

| | | | |
|---------------------|--|-------|--|
| A/C | Assist/control ventilation | ECMO | Extracorporeal membrane oxygenation |
| AMV | Atemminutenvolumen | EIP | End-inspiratory pressure |
| AO | Apnoische Oxygenierung | EIT | Elektrische Impedanztomografie |
| APRV | Airway pressure release ventilation | EVLW | Extravaskuläres Lungengewasser |
| APV | Adaptive pressure ventilation | FEV | Forced expiratory flow |
| ARDS | Acute respiratory distress syndrome | FRC | Functional residual capacity |
| ARF | Acute respiratory failure | HAP | Hospital acquired pneumonia |
| ARI | Acute respiratory insufficiency | HFJV | High frequency jet ventilation |
| ASB | Assisted spontaneous breathing | HFNC | High flow nasal cannula |
| ASV | Adaptive support ventilation | HFOV | High frequency oscillation ventilation |
| ATC | Automatic tube compensation | HFPPV | High frequency positive pressure ventilation |
| BIPAP | Biphasic positive airway pressure | HFV | High frequency ventilation |
| CFT | Constant flow techniques | HME | Heat and moisture exchanger |
| CFV | Constant flow ventilation | ICP | Intracranial pressure |
| CMV | Continuous mandatory ventilation | ILA | Interventional lung assist |
| COPD | Chronic obstructive pulmonary disease | ILV | Independent lung ventilation |
| CPAP | Continuous positive airway pressure | IMV | Intermittent mandatory ventilation |
| CPP | Cerebral perfusion pressure | IPPV | Intermittent positive pressure ventilation |
| CPPV | Continuous positive pressure ventilation | IPS | Inspiratory pressure support |
| CSV | Continuous spontaneous ventilation | IRV | Inverse ratio ventilation |
| CT | Computertomografie | IVAC | Infection-related ventilator associated complication |
| DIRD | Drug induced lung disease | IVOX | Intravascular oxygenation |
| ECCO ₂ R | Extracorporeal CO ₂ removal | LAD | Lung assist device |
| ECLS | Extracorporeal life support | LIP | Lower inflection point |

| | | | |
|------|--|--------|---|
| MIP | Maximal inspiratory pressure | RASS | Richmond Agitation and Sedation Scale |
| MMV | Mandatory minute ventilation | RSBI | Rapid shallow breathing index |
| NAVA | Neurally adjusted ventilatory assist | SBT | Spontaneous breathing trial |
| NIV | Non-invasive ventilation | SHT | Schädel-Hirn-Trauma |
| NO | Stickstoffmonoxid | SIMV | Synchronized intermittent mandatory ventilation |
| OSAS | Obstructive sleep apnea syndrome | SIRS | Systemic inflammatory response syndrome |
| PAV | Proportional assist ventilation | TACO | Transfusion-associated circulatory overload |
| PAWP | Peak airway pressure | TRALI | Transfusion-related acute lung injury |
| PCA | Patient controlled analgesia | TRIO | Tracheal insufflation of oxygen |
| PHC | Permissive hypercapnia | TTI | Tension time index |
| PCV | Pressure-controlled ventilation | VAC | Ventilator-associated condition |
| PEEP | Positive end-expiratory pressure | VAE | Ventilator-associated event |
| PEF | Peak expiratory flow | VALI | Ventilator-associated lung injury |
| PEP | Positive expiratory pressure | VAP | Ventilator-associated pneumonia |
| PLV | Partial liquid ventilation | VAPS | Volume-assured pressure support |
| PONV | Postoperative nausea and vomiting | VC-A/C | Volume-controlled assist/control ventilation |
| PPS | Proportional pressure support | VCV | Volume-controlled ventilation |
| PRVC | Pressure-regulated volume-controlled ventilation | VG | Volumengarantie |
| PSV | Pressure support ventilation | VS | Volumensupport |



Anatomie der Atmungsorgane

Inhaltsverzeichnis

- 1.1 Topografische und funktionelle Einteilung – 2**
- 1.2 Obere Atemwege – 2**
 - 1.2.1 Nase – 3
 - 1.2.2 Mundhöhle und Unterkiefer – 4
 - 1.2.3 Pharynx – 4
 - 1.2.4 Larynx – 5
 - 1.2.5 Larynx von Kindern – 7
- 1.3 Untere Atemwege – 7**
 - 1.3.1 Trachea – 7
 - 1.3.2 Extrapulmonale Hauptbronchen – 8
- 1.4 Lungen – 9**
 - 1.4.1 Lungenlappen – 9
 - 1.4.2 Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia – 11
 - 1.4.3 Lungenläppchen, Lobuli pulmonales – 12
 - 1.4.4 Azinus – 12
 - 1.4.5 Bronchialbaum der Lunge – 13
 - 1.4.6 Alveolen, der Ort des Gasaustauschs – 16
 - 1.4.7 Blutgefäßsystem der Lunge – 18
 - 1.4.8 Innervation der Lunge – 20
- 1.5 Pleura und Pleurahöhlen – 20**
 - 1.5.1 Atemverschieblichkeit der Lunge – 21
 - 1.5.2 Lungen- und Pleuragrenzen – 21
- 1.6 Thoraxskelett – 22**
- 1.7 Atemmuskulatur – 23**
- Weiterführende Literatur – 24**

? Fragen zum Einstieg

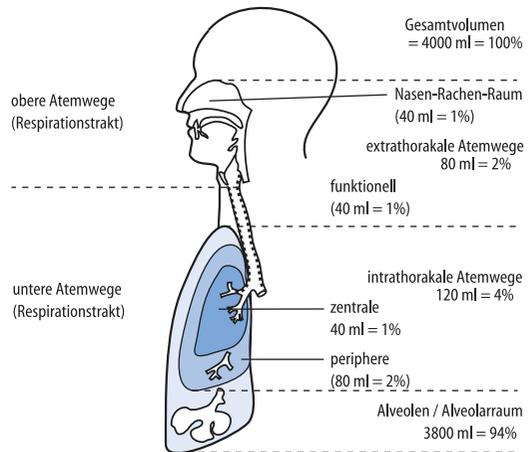
1. Was bezeichnen die drei Begriffe äußere Atmung, innere Atmung und Ventilation?
2. Wie lang ist der rechte Hauptbronchus, wie lang der linke?
3. Aus welchen Lappen besteht die rechte Lunge, aus welchen die linke?
4. Welche Bronchen können ihren Innendurchmesser durch Kontraktion der Wandmuskulatur 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 Topografische und funktionelle Einteilung

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



■ **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

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

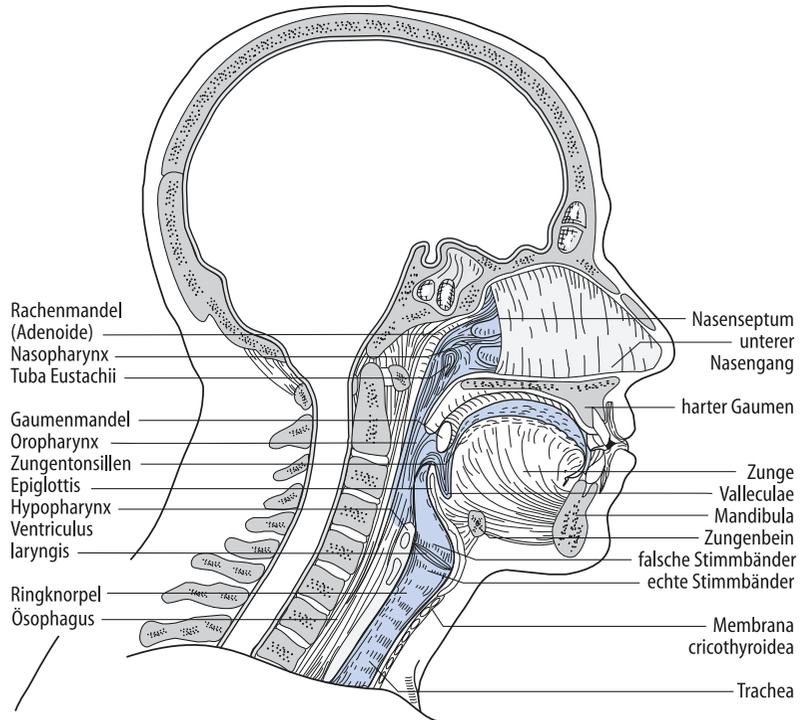
Die Atemwege beginnen mit den beiden Nasenlöchern und enden in den Alveolen. Zwischen Nase und Alveolen sind die luftleitenden Abschnitte geschaltet. Sie leiten die Atemluft, am Gasaustausch sind sie dagegen nicht beteiligt.

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.

1.2 Obere Atemwege

Insbesondere für das Atemwegsmanagement (vgl. ► Kap. 6) sind Grundkenntnisse der Anatomie des oberen Respirationstrakts von entscheidender Bedeutung (■ Abb. 1.2).

■ **Abb. 1.2** Anatomie des oberen Respirationstrakts



1.2.1 Nase

Die Nasenhöhle wird durch das Nasenseptum in 2 Hälften geteilt. Das Septum besteht aus Knorpel und Knochen und ist von Schleimhaut überzogen. Normalerweise sollte sich das Septum in der Mittellinie befinden, jedoch besteht häufig eine seitliche Deviation, die das Einführen von Sonden oder Tuben durch die Nase erschweren oder verhindern kann.

Klinischer Tipp

Septumdeviationen müssen beim nasalen Atemwegsmanagement sorgfältig beachtet werden. Vor einer Passage sollte die Durchgängigkeit jedes Nasenlochs überprüft und das größere bzw. vermutlich besser durchgängige ausgewählt werden.

Jede Nasenhälfte wird durch die seitlich entspringenden Konchen in einen oberen, mittleren und unteren Nasengang geteilt (■ Abb. 1.2); die

Konchen sind an der Anfeuchtung und Erwärmung der Atemluft beteiligt und können durch Sonden, Tuben und Optiken leicht verletzt werden. Unter jeder Koncha befindet sich eine Öffnung zu den Nasennebenhöhlen. Eine Verlegung dieser Öffnung kann zur Ansammlung von Sekreten mit Gefahr der Infektion führen.

Nach hinten öffnet sich jeder Nasengang in den Nasopharynx; der Nasenboden befindet sich in der gleichen Ebene wie die Nasenlöcher, daher muss ein Tubus oder Katheter durch die Nase direkt nach hinten, nicht nach oben geschoben werden.

Zu den wichtigsten Funktionen der Nase gehört, neben dem Riechvorgang, die Leitung der Atemgase sowie deren Anfeuchtung und Erwärmung. Entsprechend ist die Nasenschleimhaut reich mit Blutgefäßen versorgt, die durch Manipulation leicht verletzt werden und zu massiven, sichtbehindernden Blutungen führen können. Die Blutversorgung der Nasenhöhle erfolgt über hintere und vordere Äste der A. ophthalmica und Äste der Aa. maxillaris und facialis.

Klinischer Tipp

Vorsicht bei der Manipulation in der Nase: Selbst kleine Blutungsquellen können die Sicht, z. B. durch eine Fiberoptik, nahezu unmöglich machen.

1.2.2 Mundhöhle und Unterkiefer

Mundhöhle Die Mundhöhle wird außen von den Lippen und den Wangen begrenzt, innen vom Gaumen und von den Zähnen, oben vom weichen und harten Gaumen, unten von der mit der Zunge verbundenen Schleimhaut. Anomalitäten des Mundes können zu erheblichen Schwierigkeiten bei der Intubation mit entsprechender Gefährdung des Patienten führen. Daher sollte der Mund vor jeder Maßnahme sorgfältig inspiziert werden.

Kiefergelenk Im Kiefergelenk artikuliert der Unterkiefer beiderseits mit den temporalen Schädelknochen. Die Beweglichkeit im Kiefergelenk kann durch verschiedene angeborene oder erworbene Störungen so stark eingeschränkt sein, dass bei der Intubation mit erheblichen Schwierigkeiten gerechnet werden muss. Gelegentlich ist es nicht möglich, einen Patienten auf konventionellem Weg, d. h. ohne fiberoptisches Instrument, zu intubieren.

Zunge Die Zunge besteht aus Bündeln von Muskelfasern, die von Schleimhaut überzogen sind. Normalerweise ist die Zunge leicht beweglich und kann mit einer supraglottischen Atemhilfe oder einem Laryngoskop problemlos verschoben werden.

Zähne Die Zähne sind beim Atemwegsmanagement von besonderer Bedeutung, nicht nur, weil sie vom Ungeübten leicht beschädigt werden können, sondern weil sie bei Vorschäden oder Fehlstellungen die Intubation erheblich erschweren können. Gefährdet sind v. a. die oberen Schneidezähne, denn sie stecken nur mit einer Wurzel im Kiefer und können durch fehlerhaftes Hebeln ab- oder herausgebrochen werden.

Klinischer Tipp

it Vorsicht geboten bei der Intubation von Kindern mit Milchzähnen, älteren Patienten, schlechter Mundhygiene, bei beschädigten oder ersetzten Zähnen, Erkrankungen des Zahnfleischs, geringer Mundöffnung sowie bei vorstehenden oberen Schneidezähnen.

1.2.3 Pharynx

Der Rachen (Pharynx) reicht von der Schädelbasis bis zum Ösophagusmund. Er besteht aus Nasopharynx, Oropharynx und Hypopharynx. Die Wände des Pharynx sind eher weich und dehnbar und können leicht durch Trauma oder Infektion anschwellen.

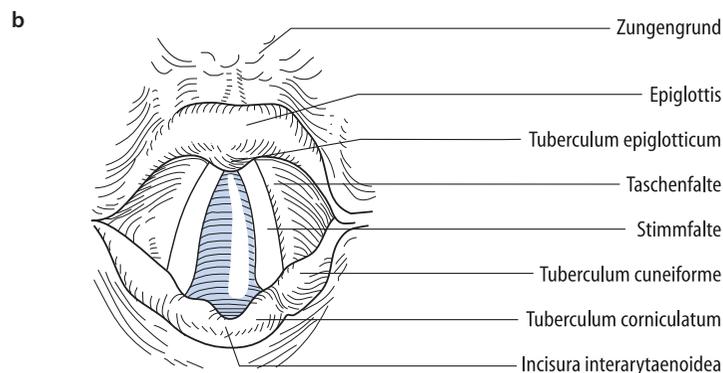
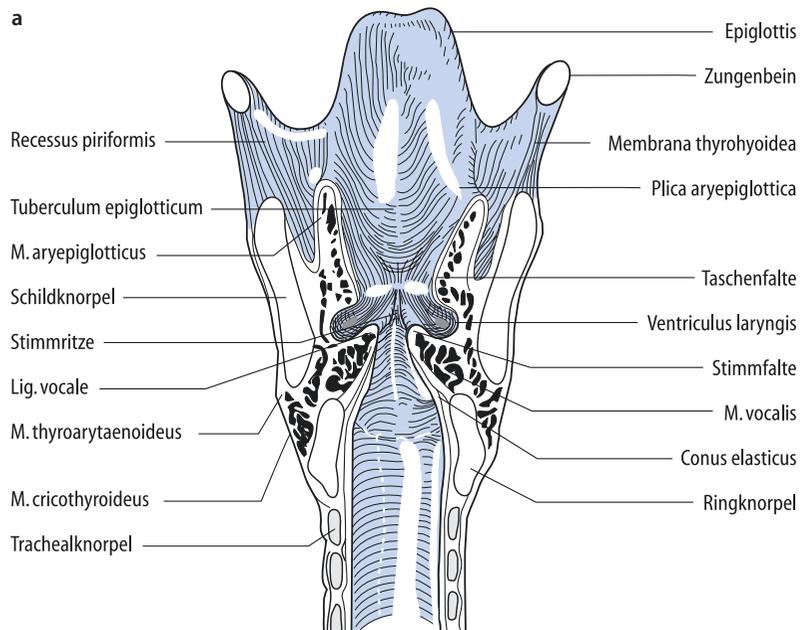
Nasopharynx Der Nasopharynx reicht vom Rachendach bis zum Gaumensegel; sein Dach wird von der Schädelbasis gebildet. Am weichen Gaumen geht der Nasopharynx in den Oropharynx über. An Dach und Hinterwand des Nasopharynx befinden sich die Rachenmandeln, die bei Kindern nicht selten vergrößert sind und die Nasenatmung behindern. Gelegentlich können vergrößerte Adenoide bei Kindern ein Intubationshindernis sein.

In die Seitenwände des Nasopharynx mündet die Tuba auditiva (Eustachi-Röhre), die den Nasopharynx mit dem Mittelohr verbindet und – wie die Eingänge in die Nasennebenhöhlen – durch einen Tubus verlegt werden kann.

Oropharynx Der Oropharynx erstreckt sich vom weichen Gaumen bis zur Epiglottis bzw. der Plica pharyngoepiglottica. Die vordere Wand wird vom Zungengrund gebildet. An den Seiten befinden sich die Gaumenmandeln; sie können bei Kindern so stark hypertrophieren, dass sie sich in der Mittellinie berühren und die Intubation erschweren. Unten und hinter den Gaumenmandeln liegt der hintere Teil der Zunge über dem Eingang zum Larynx. Dieser Teil der Zunge ist mit der Epiglottis über 3 Falten verbunden. Im Oropharynx kreuzen sich Atem- und Speiseweg.

Hypopharynx Dieser Abschnitt erstreckt sich vom Rand der Epiglottis bis zum Eingang in den Kehlkopf und Ösophagus. Vorn liegen im Hypopharynx die Epiglottis, der Kehlkopfeingang und die mit Schleimhaut überzogenen Knorpel des Kehlkopfs. Zu beiden Seiten des Kehlkopfs verläuft im Hypopharynx der Recessus piriformis. Der Raum vor der Epiglottis wird als Vallecula bezeichnet; diese Fossa ist für die Intubation von besonderer Bedeutung, weil die Spitze eines gebogenen Laryngoskopspatels hier eingeführt wird.

▣ **Abb. 1.3** Kehlkopf; **a** im Medianschnitt, **b** bei Laryngoskopie



1.2.4 Larynx

Die Passage des Kehlkopfs (Larynx) ist der entscheidende, aber meist auch der schwierigste Teil bei der endotrachealen Intubation oder einer fiberoptischen Bronchoskopie.

Knorpel des Kehlkopfs

Der Kehlkopf (▣ Abb. 1.3) ist mit der Luftröhre verbunden und liegt gegenüber dem 4.–6. Halswirbelkörper. Das Skelett des Kehlkopfs wird durch verschiedene Knorpel gebildet, die teilweise von außen am Hals getastet werden können:

- Schildknorpel
- Ringknorpel
- Aryknorpel
- Epiglottis

Schildknorpel (Cartilago thyroidea) Der Schildknorpel bildet den sog. Adamsapfel; er besteht aus zwei großen Knorpelplatten, die vorn miteinander verbunden, nach hinten dagegen offen sind. Kranial ist der Schildknorpel durch die Membrana thyrohyoidea am Zungenbein befestigt und kaudal durch die Membrana cricothyroidea mit dem Ringknorpel verbunden.

Ringknorpel (Cartilago cricoidea) Nach kaudal ist der Kehlkopf über den Ringknorpel mit der Trachea verbunden. Dieser Knorpel weist etwa die Form eines Siegelrings auf, mit einem engen vorderen und seitlichen Bogen und einem erweiterten hinteren Anteil. Nach unten ist der Ringknorpel über ein Band mit dem 1. Trachealring verbunden.

Epiglottis Der Kehldeckel ist wie ein Fahrradsattel geformt und innen am Schildknorpelbug mit dem Lig. thyroepiglotticum verbunden, mit dem Zungenbein durch das Lig. hyoepiglotticum; der Oberrand dagegen ist frei beweglich. Die aryepiglottischen Falten ziehen zu den seitlichen unteren Anteilen der Epiglottis und verbinden sie mit den Aryknorpeln.

Aryknorpel (Cartilago arytaenoidea) Die pyramidenförmigen Aryknorpel (Stellknorpel, Gießbeckenknorpel) sind mit den hinteren Anteilen des Krikoids gelenkig verbunden. Die Spitze der Pyramide ist nach hinten und medial gebogen; auf ihr befindet sich der kleine Spitzenknorpel, Cartilago corniculata. Der Spitzenknorpel liegt in der Plica aryepiglottica und bildet das Tuberculum corniculatum. Am vorderen Fortsatz des Aryknorpels ist das Stimmband befestigt, am seitlichen die Stimmbandmuskeln.

Klinischer Tipp

Die Aryknorpel sind wichtige Orientierungspunkte während der Intubation von Patienten, bei denen die Stimmritze aus anatomischen Gründen nicht eingestellt werden kann.

Glottis

Die Stimmbänder und der Raum zwischen den Stimmbändern, die Stimmritze, werden als Glottis (■ Abb. 1.3) bezeichnet. Die **Stimmbänder**, Ligg. vocalia, bestehen aus Muskeln, Bändern, weicher Submukosa und einem Schleimhautüberzug. Sie sind vorn an der Innenseite der Schildknorpel befestigt, hinten am Processus vocalis des Stellknorpels. Die Länge der Stimmbänder beträgt beim Mann 1,7–2,3 cm, bei der Frau 1,3–1,7 cm; die Stimmbänder sind ca. 3 mm dick und 2 mm breit.

Klinischer Tipp

Die Stimmritze ist beim Erwachsenen die engste Stelle der oberen Atemwege.

Oberhalb der Stimmbänder befindet sich jeweils ein Recessus, der Ventriculus laryngis, der zahlreiche Schleimdrüsen enthält, die den Larynx anfeuchten. Über den Recessus verlaufen die Taschenbänder oder „**falschen Stimmbänder**“; sie sind weiter geöffnet als die Stimmbänder und können sich, parallel zu ihnen, weitgehend einander nähern und als Schutz vor Aspiration wirken.

Innervation des Kehlkopfs

Der Kehlkopf wird durch den N. vagus über den N. laryngeus superior und den N. laryngeus recurrens innerviert. Die sensible Innervation löst Schutzreflexe für den Eingang in die unteren Atemwege aus; hierzu gehören der Glottisverschluss und der Hustenstoß zum Entfernen von Fremdkörpern.

Klinischer Tipp

Wird diese Region während der Intubation oder einer Endoskopie ohne ausreichende lokale oder systemische Anästhesie stimuliert, kann ein **Laryngospasmus** auftreten.

Der **N. laryngeus recurrens** versorgt sensibel die Schleimhaut des Kehlkopfs unterhalb der

Stimmbänder; außerdem ist er der wichtigste motorische Nerv des Kehlkopfs: Er versorgt mit Ausnahme des M. cricothyroideus sämtliche Kehlkopfmuskeln. Eine Schädigung des Rekurrennsnervs führt zur **Stimmbandlähmung**, die einseitige Rekurrensschädigung zu einseitiger Stimmbandlähmung und Heiserkeit, die beidseitige Schädigung zu beidseitiger Stimmbandlähmung mit völligem Stimmverlust und Atemstörungen, da die Stimmbänder nicht weit genug geöffnet werden können.

Der N. laryngeus superior versorgt die gesamte Schleimhaut oberhalb des Kehlkopfs einschließlich der Epiglottis sensibel, außerdem vorne die Schleimhaut unterhalb der Stimmbänder und schließlich motorisch den M. cricothyroideus.

Funktionen des Kehlkopfs

- Leitung der Atemgase
- Verschluss der Trachea beim Schlucken durch die aryepiglottischen Falten und die falschen und richtigen Stimmbänder
- Stimm- und Sprachbildung
- Beteiligung am Hustenstoß und an der Bauchpresse
- Reflexaktivität, z. B. Husten

1.2.5 Larynx von Kindern

Der Larynx von Kindern unterscheidet sich in Aussehen, Struktur und Lokalisation von dem des Erwachsenen. Er steht insgesamt höher im Hals als beim Erwachsenen, die Lichtung des Kehlkopfs ist trichterförmig, die engste Stelle befindet sich, etwa 1 cm unterhalb der Stimmbänder, im subglottischen Raum, also im Bereich des Ringknorpels.

- Bei Kindern ist der **subglottische Raum** die engste Stelle der oberen Atemwege und nicht – wie beim Erwachsenen – die Stimmritze.

Die **Epiglottis** ist bei Kindern relativ schmaler und länger als beim Erwachsenen. Hierdurch wird der gesamte Kehlkopfeingang enger und kann bei bestimmten Erkrankungen sehr leicht und rasch lebensbedrohlich anschwellen.

Die Kehlkopfknorpel des Kindes sind weicher und nachgiebiger, die Schleimhäute lockerer und anfälliger gegenüber Trauma und Infektion. So kann bereits das Einführen von Laryngoskop, Absaugkatheter und Bronchoskop bei grobem Vorgehen leicht zum verschließenden Ödem führen, besonders in der subglottischen Region.

1.3 Untere Atemwege

Zu den unteren Atemwegen gehört die Luftröhre (Trachea) sowie das Bronchialsystem der Lunge.

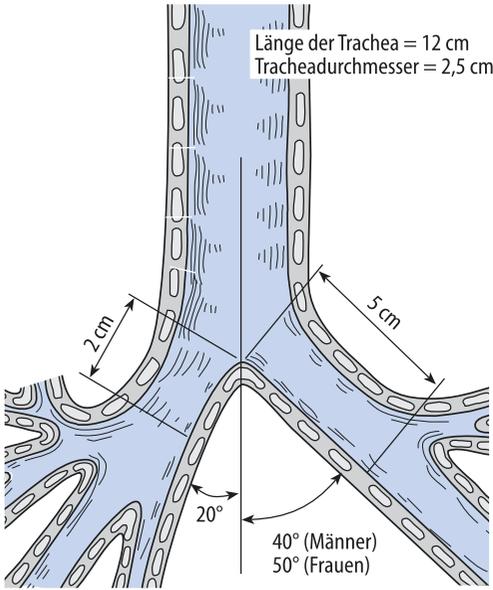
1.3.1 Trachea

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. Brustwirbel, beim älteren Kind: 7. Brustwirbel; ■ Abb. 1.4).

Klinischer Tipp

Lage und Öffnungsfläche der Trachea sowie die prätrachealen Gefäße können sehr gut mit der Sonografie beurteilt werden.

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 Knorpelspannen bleibt das Lumen der Trachea ständig geöffnet. Allerdings genügen bereits Drücke von



■ **Abb. 1.4** Bifurkation der Trachea

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 Knorpelspannen 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.

1.3.2 Extrapulmonale Hauptbronchen

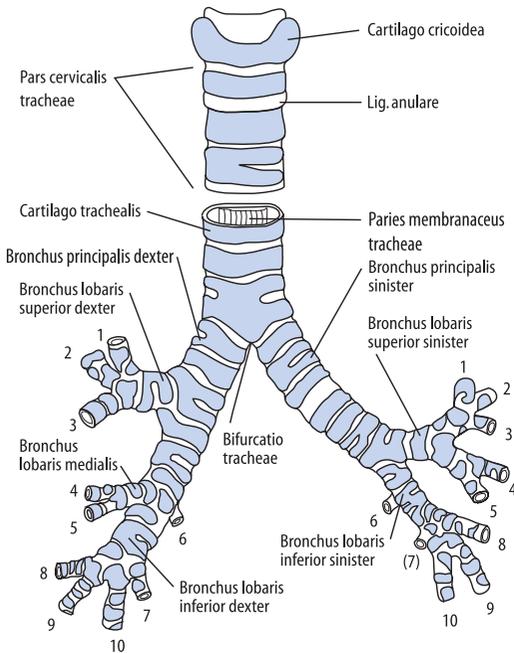
An der Bifurkation der Trachea springt vom letzten Trachealknorpel ein halbmondförmiger Sporn, die Carina, in die Lichtung vor. Hier beginnt die gabelförmige Aufteilung in den rechten und linken Hauptbronchus, die beide am jeweiligen Lungenhilus in ihre Lunge eintreten und sich unmittelbar danach weiter aufzweigen, beginnend mit dem Oberlappenbronchus (■ Abb. 1.5).

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 als in den linken.

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



■ **Abb. 1.5** Trachea, Haupt-, Lappen- und Segmentbronchien. Der mittlere Trachealabschnitt wurde weggelassen, um die Paries membranaceus tracheae darzustellen. (Aus: Schiebler 2005)

Wandaufbau und Schleimhaut Der Aufbau von Wand und Schleimhaut der Hauptbronchien 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 (► Abschn. 1.3.1); die Gefäßversorgung der Hauptbronchien erfolgt überwiegend aus den Rr. bronchiales.

1.4 Lungen

Die beiden Lungen, Pulmo dexter und Pulmo sinister, gliedern sich in Lappen, Segmente, Läppchen und Azini (■ Abb. 1.6). Jede Lunge füllt eine der beiden Pleura-

höhlen 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 drei Lappen, die linke hingegen nur aus zwei.

1.4.1 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

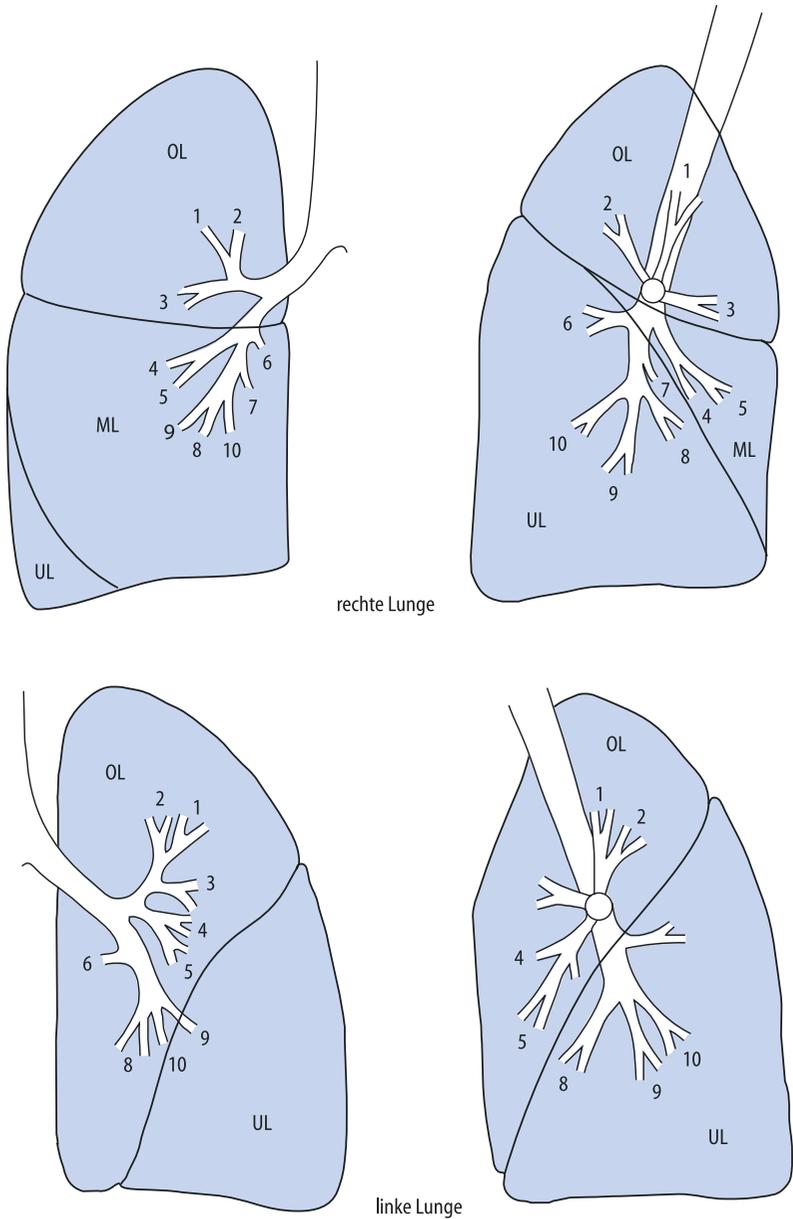
Der Unterlappen wird von den beiden anderen Lappen durch die Fissura obliqua getrennt, Mittel- und Oberlappen durch die Fissura horizontalis.

Linke Lunge Im Gegensatz zur rechten besteht die linke Lunge nur aus zwei 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.

Abb. 1.6 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



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 zwei

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.

1.4.2 Lungensegmente, Segmenta bronchopulmonalia

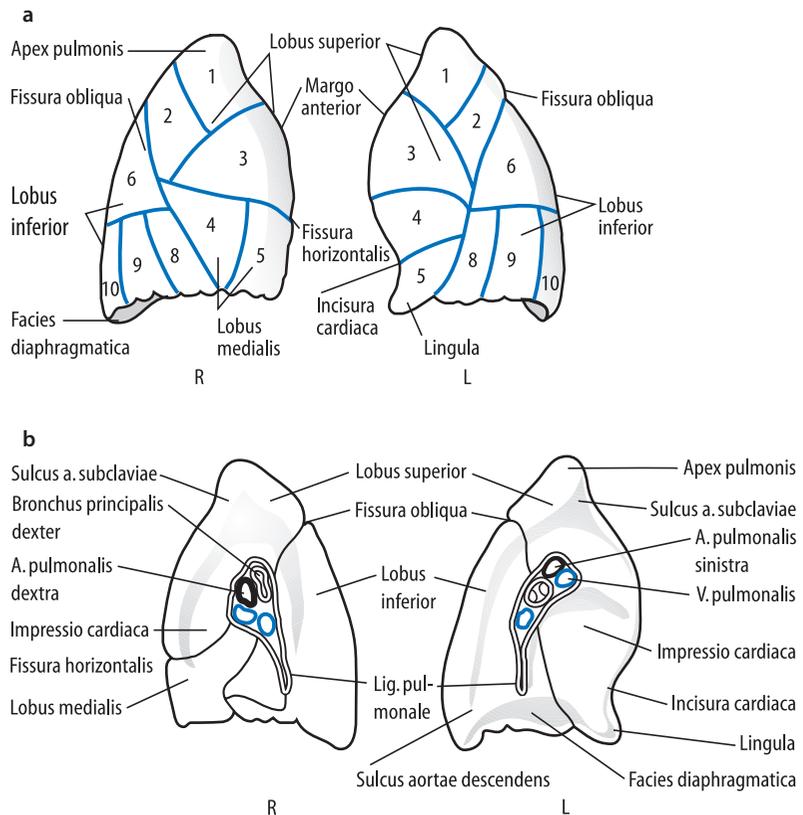
Segmente sind pyramiden- bis kegelförmige Einheiten der Lunge, deren Spitze zur Hilusregion gerichtet ist (■ Abb. 1.7). Die Segmente werden von einem Segmentbronchus, seinen Ästen und einem stets begleitenden Ast der A. pulmonalis gebildet und sind voneinander – allerdings unvollständig – durch Bindegewebssepten abgegrenzt. An der äußeren 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.

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

■ **Abb. 1.7** **a** Seitenansicht (Facies costalis) der rechten und linken Lunge; Segmentgrenzen blau, Lungensegmente durch Ziffern gekennzeichnet; Forderung 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)



Tab. 1.1 Lungensegmente und zugeordnete Bronchen der rechten Lunge

| Rechte Lungen-segmente | 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 Lungen-segmente | 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 7 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 |

1.4.3 Lungenläppchen, Lobuli pulmonales

Die Lungenläppchen (Abb. 1.8) 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.

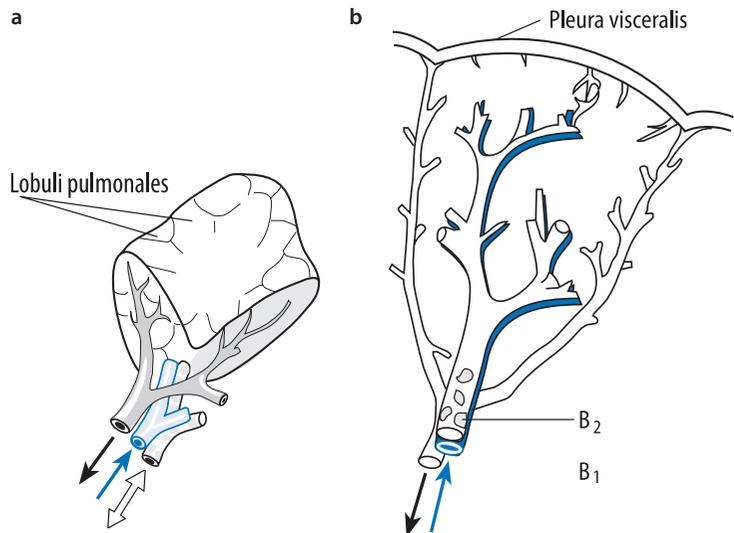
Ein Lämpchen wird von Bronchiolen der 1. Generation versorgt, die sich im Lämpchen 3- bis 4-mal aufteilen. Die letzte Generation

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

1.4.4 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

Abb. 1.8 **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. B_1 kleiner Bronchus, B_2 Bronchiolus. (Aus: Schiebler 2005)



1500–4000 Alveolen, der Durchmesser beträgt 2,5–5 mm, maximal 8 mm.

— Respiratorische Bronchiolen: Generation 17–19

1.4.5 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. 1.9).

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

- Rechter und linker Hauptbronchus (► Abschn. 1.3.2)
- Lappenbronchen
- Segmentbronchen
- Bronchiolen
- Terminale Bronchiolen

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 Bronchen: Generation 5–11
- Bronchiolen: Generation 12–16

Lappenbronchen

Die Lappenbronchen, Bronchi lobares, entspringen aus dem Hauptbronchus. Den Lungenlappen entsprechend gibt es rechts drei und links zwei. Ihr Durchmesser beträgt 8–12 mm. Der rechte Oberlappenbronchus entspringt aus dem rechten Hauptbronchus direkt im Hilus, also extrapulmonal, der Mittel- und der 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 den 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.

Varianten: Bei nicht wenigen Menschen entspringt ein sog. Trachealbronchus direkt aus der Trachea (rechts: 0,1–2 %, links: 0,3–1 %). Er zweigt oft noch oberhalb des rechten Hauptbronchus ab („Trifurkation“). Bei diesen Varianten handelt es sich in der Regel um den korrespondierenden Oberlappenbronchus, seltener um einen segmentalen oder zusätzlichen Bronchus.

Abb. 1.9 Durchmesser der verschiedenen Anteile des Bronchialbaums; Gesamtquerschnitt $S(z)$ bezogen auf die jeweiligen Teilungsgenerationen. *AD* Ductus alveolares, *AS* Alveolarsäckchen, *Br* mittlere und kleine Bronchen, *Brl* Bronchiolen, *Hbr* Hauptbronchus, *RBrI* Bronchioli respiratorii, *TBrI* Bronchioli terminales. (Aus: Matthys und Seeger 2008)

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

Klinischer Tipp

Die Abgänge der Lappenbronchien, besonders die des rechten Oberlappenbronchus, sind eine wichtige Orientierungshilfe bei der Bronchoskopie und bei der Platzierung von Doppellumentuben oder Bronchusblockern für die Ein-Lungen-Ventilation.

Segmentbronchen

Die Segmentbronchen, Bronchi segmentales, entstehen aus den Lappenbronchien. 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 haben 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 4-mal 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, die 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 haben die Lappen- und die Segmentbronchen keine hufeisenförmigen Knorpelspannen, 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 spiralig 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 weder Knorpel noch 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; 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 haben 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 zur 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.

1.4.6 Alveolen, der Ort des Gasaustauschs

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 haben. Dies gilt auch für die aneinandergrenzenden Alveolen der benachbarten Ductus und Sacculi.

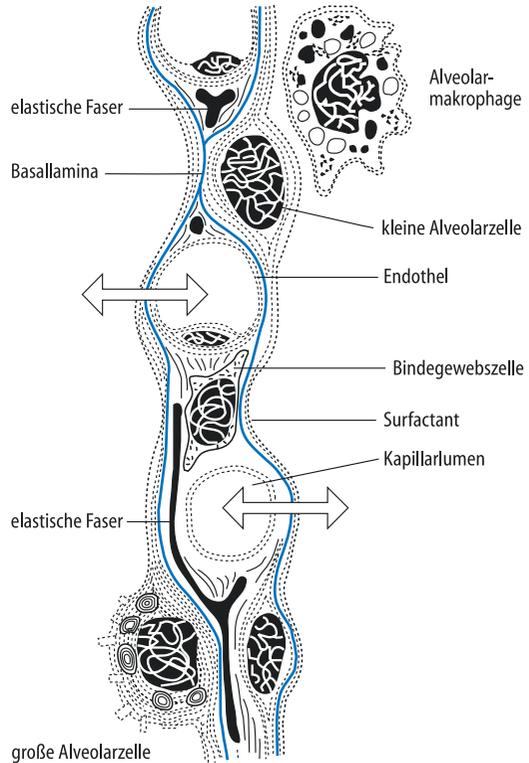
Die Gesamtzahl der Alveolen jeder Lunge wird auf durchschnittlich 300 Mio. geschätzt, beträgt jedoch in Abhängigkeit von der Größe 200–600 Mio. Die Größe der Alveolen hängt vom Lungenvolumen ab. Bei voller Entfaltung sind alle Alveolen von der Basis bis zur Spitze gleich groß, ansonsten aber im oberen 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.

Interalveolarsepten

Die Interalveolarsepten, die Wände der Alveolen, bestehen aus folgenden Strukturen (■ Abb. 1.10):

- Bindegewebsseptum
- Alveoläres Kapillarnetz
- Alveolarepithel

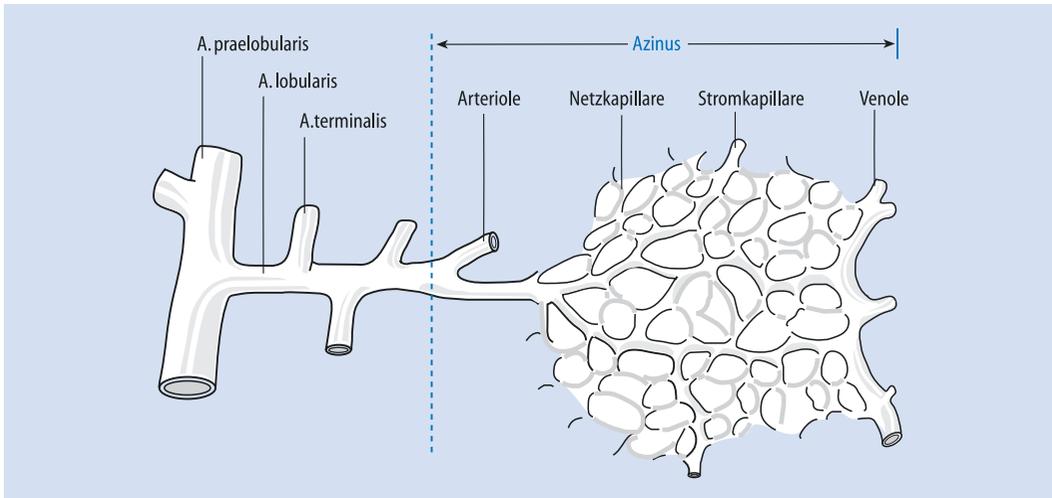
Bindegewebsseptum Das Bindegewebe der Interalveolarsepten besteht aus kollagenen und retikulären Bindegewebsfasern und einem dichten elastischen Fasernetz, der Fortsetzung des elastischen Fasersystems der Wände der Bronchiolen und des peribronchiolären Gewebes. Hierdurch sind die Interalveolarsepten zwischen dem Bronchialbaum und der Lungenoberfläche elastisch angespannt.



■ **Abb. 1.10** Interalveolarseptum. Drei Kapillarquerschnitte im Bindegewebe. Die Basalmembran (blau) der Kapillaren und Alveolarepithelzellen sind an der Kontaktstelle zu einer gemeinsamen Membran verschmolzen. Pfeile: Weg des Gasaustauschs

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 verloren ginge. Dieses Verhalten ist für die Interalveolarsepten von Bedeutung, denn die elastischen Fasern 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 die kollagenen Fasern der Interalveolarsepten sind in eine dünne Schicht interstitieller Grundsubstanz eingebettet, in der sich Fibroblasten, Makrophagen, Mastzellen und Leukozyten befinden.



■ **Abb. 1.11** Endstrombahn der Lunge mit Netz- und Stromkapillaren

An der Grenze zum Alveolarepithel verdichtet sich das Bindegewebe an beiden Seiten zu einer **Basalmembran**.

Insgesamt bildet das Bindegewebe der Interalveolarepten keine geschlossene Schicht, sondern eine Platte mit zahlreichen großen Löchern und einem Netzwerk aus weitmaschigen Faserbündeln.

Alveoläres Kapillarnetz Das flächenhafte, einschichtige Kapillarnetz der Alveolen wird von der Bindegewebsplatte getragen (■ Abb. 1.11). 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 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 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 s. ► Abschn. 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 aufweist. 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-alveolar-septen, 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. der Aufrechterhaltung bestimmter Lungen-erkrankungen, z. B. dem akuten Lungenver-sagen (ARDS), zugeschrieben wird (► Kap. 26).

Blut-Luft-Schranke

In den Inter-alveolar-septen 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 Alveolar-epithel 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 Alveolar-epithel
- 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 Sep-tum mit seinen Fasern und Zellfortsätzen sowie die Endothelzellkerne überwunden werden; entsprechend ist auch das Ausmaß des Gas-austauschs in diesem Bereich geringer.

1.4.7 Blutgefäßsystem der Lunge

Das Blutgefäßsystem der Lunge besteht aus den Vasa publica und den Vasa privata. Die Vasa publica führen das Körperblut zum Gas-austausch 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 Lungen-arterien sowie des peribronchialen Gewebes. Dagegen werden die Bronchioli respiratorii, die Ductus alveolares und die Bindegewebs-septen und das subpleurale Gewebe von den Vasa publica versorgt.

Blutgefäßsystem der Lunge

- Die **Vasa publica** umfassen
 - Pulmonalarterien mit ihren Ästen,
 - das alveoläre Kapillarnetz,
 - Vv. pulmonales.
- Zu den **Vasa privata** gehören
 - Rr. bronchiales (Aa. bronchiales) des Körperkreislaufs,
 - Vv. bronchiales des Körperkreislaufs,
 - Anastomosen zwischen A. pulmo-nalis und Rr. bronchiales sowie zwischen Rr. bronchiales und Vv. bronchiales.