



Hartmut Lang

Beatmung für Einsteiger

Theorie und Praxis für die
Gesundheits- und Krankenpflege

3. Auflage

 Springer

Beatmung für Einsteiger

Hartmut Lang

Beatmung für Einsteiger

Theorie und Praxis für die Gesundheits- und Krankenpflege

3., aktualisierte und erweiterte Auflage

Hartmut Lang
Hamburg, Deutschland

ISBN 978-3-662-59293-9 ISBN 978-3-662-59294-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59294-6>

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, ein Teil von Springer Nature 2007, 2016, 2020

1. Auflage erschienen bei Verlag Hartmut Lang, Hamburg, 2007

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.

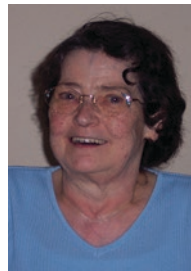
Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des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

Fotonachweis Umschlag: © iStock/sudok1

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

Dieses Buch widme ich meiner lieben Mutter Regina Sodemann, die selbst Krankenschwester war. Sie hatte selbst schon vor der Einrichtung von Intensivstationen beatmete intensivpflichtige Patienten auf Ihrer Station betreut. Sie lebte von 1999 bis zu Ihrem Versterben 2008 als beatmete Patientin. Bei ihren Klinikaufenthalten hatte sie alle Etappen einer Intensivstation und der Beatmung durchgemacht. Intubation, Tracheotomie, Dekanülierung, Einleitung einer NIV, Fortführung als Heimbeatmung. Als betroffene Angehörige durften meine Frau und ich Sie bis zum Ende Ihres Lebens begleiten.



Regina Sodemann † Dezember 2008

Vorwort zur 3. Auflage

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

die 3. Auflage Beatmung für Einsteiger – Theorie und Praxis für die Gesundheits- und Krankenpflege ist für Sie bestimmt. Mein Wunsch ist, dass Sie mit der überarbeiteten und erweiterten Auflage Sicherheit im Umgang mit beatmeten Intensivpatienten erlangen.

Didaktisch bleibt es bei der Aufteilung in die sog. Sektionen, jedoch ist die eine weitere Sektion Sekretmanagement hinzugekommen.

- Sektion 1 – Grundlagen der Atmung und des respiratorischen Versagens
- Sektion 2 – Möglichkeiten der Beatmung
- Sektion 3 – Beatmungsformen und Muster
- Sektion 4 – Sekretmanagement
- Sektion 5 – Überwachung des Patienten und der Beatmung

Sektion 1 behandelt nach wie vor die Grundlagen Anatomie und Physiologie, die respiratorische Insuffizienz und die daraus resultierenden Indikationen zur Beatmung.

Sektion 2, Möglichkeiten der Beatmung, ist um das ► Kap. 6 nasale High-Flow-Sauerstofftherapie erweitert und von meiner Kollegin Frau Claudia Hajabatsch geschrieben worden. In ► Kap. 3, Grundlagen der Intubation, wird die Videolaryngoskopie vorgestellt und das ► Kap. 4, Tracheotomie, ist um die konventionell chirurgische Tracheotomie erweitert.

Sektion 3, Beatmungsformen und Muster, wurde um das ► Kap. 21. AVAPS erweitert. Dieser Modus soll an einem Fallbeispiel erläutert werden. ► Kap. 20 enthält nun auch das Intellivent-ASV.

Sektion 4 ist die neue Sektion Sekretmanagement. Diese enthält die Kapitel Atemgaskonditionierung, Lagerungstherapie, Hustenunterstützung, Absaugung inkl. subglottische Absaugung und Inhalationstherapie.

Auch die Sektion 5, Überwachung des Patienten, hat etliche Erweiterungen erfahren. So die Dar-

stellung des PV-Loop im ► Kap. 27, Restistance und Compliance und die Erläuterung der Begriffe „Stress und Strain“ im ► Kap. 33, in der bedeutende Risiken der Beatmung beschrieben werden. Die Schmerzskaalen im ► Kap. 35 wurden um BESD und ZOPA erweitert, da damit Skalen zur Verfügung stehen, um Schmerzen bei Demenz und bei neurologischen Erkrankungen besser beurteilt werden können. Das ► Kap. 36, Pharmakologie, ist um die inhalative Sedierung erweitert worden mit dem Beispiel der AnaConDA.

Der Serviceteil stellt den Versuch dar, die verschiedenen Respiratoren mit deren eigener Nomenklatur vergleichend aufzulisten. Diese wird durch weitere und neuere Respiratoren ergänzt, die in der 2. Auflage noch keine Berücksichtigung fanden.

Unerfahrene Kolleginnen und Kollegen, die direkt nach Ihrer Grundausbildung der beruflichen Pflege auf Intensivstationen eingesetzt werden, sollen mit der 3. Auflage ein umfassendes und nachvollziehbares Werk gereicht bekommen. Erfahrene Kolleginnen und Kollegen dient die 3. Auflage zur Auffrischung im besten Fall zur Erweiterung ihres Fachwissens. Somit richtet sich „Beatmung für Einsteiger“ zuerst an berufliche Pflegenden auf Intensivstationen soll aber allen auf Intensivstationen Tätigen, dem gesamten therapeutischen Team, Mediziner, Physiotherapeuten, Logopäden, eine Hilfe im Verständnis der Beatmung sein.

Die Versorgung intensivpflichtiger und beatmungspflichtiger Patienten ist und bleibt eine hohe berufliche und komplexe Herausforderung. Dieser Herausforderung versucht die 3. Auflage gerecht zu werden, indem neue Kapitel und wichtige Ergänzungen und Erweiterungen aufgenommen wurden.

Ihnen sehr geehrte Leserinnen und Leser wünsche ich eine lehrreiche und gewinnbringende Lektüre.

Hartmut Lang
Hamburg

April 2019

Auszug-Vorwort aus der 2. Auflage 2015

Beatmung für Einsteiger soll die wesentlichen Grundlagen der Beatmungstherapie und die pflegerische Betreuung von beatmeten Patienten verdeutlichen. Das Buch richtet sich daher an alle Kolleginnen und Kollegen, die sich bei der Betreuung dieser Patienten nicht sicher fühlen – unabhängig von der Berufszugehörigkeit.

Mein Anliegen ist es, eine nachvollziehbare Orientierung zum Thema „künstliche Beatmung“ im Rahmen der stationären Pflege zu geben. Anregungen, Hinweise und Fragen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer finden sich von Beginn meiner Dozententätigkeit bis heute in aktualisierter Form im vorliegenden Werk wieder.

Ich wünsche allen Lesern eine spannende Lektüre in einem nicht immer leicht verständlichen Stoffgebiet. Ich wünsche mir, dass all Diejenigen, die an und mit Beatmungspatienten arbeiten, eine gemeinsame Arbeitsgrundlage und Arbeitssprache finden, in der die fachlichen und sachlichen Unklarheiten beseitigt werden.

Hartmut Lang

Hamburg

Juni 2015

Danksagung

Ohne die Hilfe von vielen Menschen und Firmen wäre das Buch nicht so entstanden, wie es nun vor Ihnen liegt.

Zuallererst möchte ich meiner Frau Petra für ihre unentwegte Unterstützung und Aufmunterung danken. Sie hat mich immer zum Schreiben motiviert.

Bei meinen Kollegen, die die 1. und 2. Auflage begleitet hatten, Martin Effenhauser, Franziska Hummel, Uwe Lorenz, Jana Cremers und Judith Eggers bedanke ich mich für deren unermüdliches Gegenlesen und deren fachliche Korrektur. Dieser Dank gilt auch Herrn Dr. Peter Ahrens, Chefarzt der Abteilung Anästhesie und Intensivmedizin der Aller-Weser-Klinik in Verden, der schon mein erstes Buch mitbegleitet hat und Herrn Uwe Brinkmann, pflegerische Leitung der Intensiv- und Notfallmedizin der Kliniken Lippe. Ohne sie wäre die Grundlage der 3. Auflage nicht zustande gekommen.

Für die 3. Auflage möchte ich erneut meinem Kollegen Martin Effenhauser danken, der sicherlich am kritischsten das Manuskript begleitet hat. Neue Kolleginnen und Kollegen durfte ich hinzugewinnen, denen gilt mein Dank für die 3. Auflage. Frau Marie-Luise Prange (Bildungszentrum Lippe, Detmold), Herr Michael Pusch (Klinikum Detmold), Frau Marie Fischer und Herr Dimitri Usarov (beide Klinik Lemgo), Frau Annette Reiß-Spiet (Uniklinik Kiel), und zu guter Letzt meinen UKE Kolleginnen, Frau Lena Prehn, Frau Mia Gulfan, Frau Morwenna Hupe und Frau Emily Pfister.

Meine Kollegin Frau Claudia Hajabatsch hat das ► Kap. 6 HFOT ganz neu geschrieben und das gesamte Manuskript begleitet. Ihr gilt daher mein besonderer Dank.

Ein besonderer Dank gilt unserer Freundin Frau Brigitte Poggemeier, die unentwegt nach überflüssigen Füllwörtern, Satzstellungen, Orthographie und Ausdruck Ausschau gehalten hat.

Einige Kollegen waren bereit, ihr Bild mit Veröffentlichlichen zu lassen, daher mein Dank an meine ehemalige Kollegin Frau Yvonne Theesen und Herrn Dr. Axel Niehaus, Oberarzt der Klinik In-

tensivmedizin am UKE-Hamburg. Frau Christiane Rokus, Atmungstherapeutin am UKE-Hamburg hat etliche Bilder fotografiert.

Ein riesengroßer Dank geht an meine Mitarbeiterin und Illustratorin Frau Isabel Schlütter, die sehr viele Abbildungen erstellt und alle meine Zeichnungen bearbeitet hat.

Für die Erlaubnis Abbildungen, Bilder und auch Texte des Uniklinikums Hamburg Eppendorf zu nutzen möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Stefan Kluge, Chefarzt der Klinik Intensivmedizin am UKE-Hamburg bedanken.

Herrn Ullrich Hellmich gilt mein großer Dank für die Erlaubnis, seine Abbildungen und Texte zur Synapse und Aktionspotential wiederholt nutzen zu dürfen.

Viele Firmen waren bereit, Bildmaterial für das Buch zur Verfügung zu stellen. Den Firmen iddiag (Fehraltorf, Schweiz), Fahl Medizintechnik (Köln), Hamilton Medical (Bonaduz, Schweiz), VBM Medizintechnik GmbH (Sulz a.N.), Fa. Medisize (Siegburg), P.J. Dahlhausen & Co. GmbH (Köln), INSPIRATION Medical GmbH (Bochum), Medtronic (Meerbusch), Karl Storz SE&CoKG (Tuttlingen), Fisher & Paykel Healthcare GmbH (Schorndorf), Philips GmbH Respironics (Hamburg), Intersurgical Beatmungsprodukte GmbH (Sankt Augustin), Fa. Sedana Medical (Danderyd, Schweden) ein ganz herzliches Danke für Ihre Unterstützung.

Herausgehoben müssen bei der Fa. Hamilton Medical Herr Matthias Himmelstoß und bei der Fa. Sedana Medical Herr Hannes Neubert, die beide für die jeweiligen Kapitel ihre ganze Expertise und ihren Beistand mit eingebracht haben.

Zu guter Letzt gilt mein Dank Frau Sarah Busch vom Springer Verlag für ihr Vertrauen in meine Arbeit. Frau Busch hat meine Arbeit immer anregend begleitet. Sie hat wesentlich zum didaktischen Aufbau beigetragen. Meiner Lektorin Frau Sirka Nitschmann möchte ich ebenfalls einen großen Dank für ihre Korrekturen, Anregungen und der neugestalteten Gliederung aussprechen.

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen der Atmung und des respiratorischen Versagens

1	Anatomie und Physiologie der Atmung	3
1.1	Obere Atemwege	4
1.1.1	Nase	4
1.1.2	Kehlkopf und Stimmbänder	4
1.2	Untere Atemwege	6
1.2.1	Lufttröhre (Trachea)	6
1.2.2	Carina	6
1.2.3	Bronchialbaum/Bronchialsystem	7
1.2.4	Mukoziliäre Clearance	8
1.2.5	Lage der Lungen im Körper	9
1.2.6	Lungenflügel, Lungenlappen und Lungensegmente	10
1.2.7	Alveolen und Surfactant	11
1.2.8	Lungengefäße	13
1.3	Atemhilfsmuskulatur	13
1.3.1	Inspiration	13
1.3.2	Expiration	14
1.4	Physiologie	15
1.4.1	Atemluft	15
1.4.2	Diffusionszeit/Diffusionsstrecke	15
1.4.3	Atemregulation	15
1.4.4	Physiologisches Shuntvolumen	16
1.4.5	Atemmechanik	16
1.4.6	Lungenvolumina (■ Abb. 1.17)	16
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	17
2	Indikationen und Ziele der Beatmung	19
2.1	Respiratorische Insuffizienz	20
2.1.1	Versagen der Atempumpe	20
2.1.2	Versagen des pulmonalen Gasaustausches	22
2.1.3	In Kürze	24
2.2	Beatmungs- bzw. Intubationsindikationen	24
2.2.1	Extrapulmonale Ursachen	24
2.2.2	Pulmonale Ursachen	25
2.2.3	Äußere Ursachen	25
2.3	Ziele der Beatmung	25
2.4	Komplikation der invasiven Beatmung	25
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	25

II Möglichkeiten der Beatmung

3	Grundlagen der Intubation	29
3.1	Beurteilung der Intubationsfähigkeit	30
3.1.1	Klassifikation nach Cormack und Lehane	30
3.1.2	Klassifikation nach Mallampati	30
3.1.3	Test nach Patil	30
3.2	Vorbereitung für die Intubation	31
3.2.1	Notwendige Materialien	32
3.2.2	Patientenvorbereitung	36
3.3	Durchführung der Intubation	36

3.3.1	Sichere und unsichere Intubationszeichen	38
3.3.2	Videolaryngoskopie	38
3.4	Pflegerische Maßnahmen nach der Intubation	39
3.5	Komplikationen der Intubation	39
3.5.1	Mediastinalemphysem	40
3.6	Extubation	40
3.6.1	Vorbereitung der Patienten	40
3.6.2	Gefahren und Komplikationen	41
3.6.3	Vorbereitung Material	41
3.6.4	Durchführung	41
3.6.5	Betreuung und Beobachtung des Patienten kurz nach der Extubation	41
3.6.6	Maßnahmen bei weiterer Ateminsuffizienz	42
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	42
4	Tracheotomie	43
4.1	Begrifflichkeit	44
4.1.1	Indikation für eine Tracheotomie	44
4.1.2	Vorteile und Nachteile einer Tracheotomie	44
4.1.3	Orte der Tracheotomie	44
4.2	Tracheotomieverfahren	45
4.2.1	Dilatationstracheotomie	45
4.2.2	Chirurgisches Tracheostoma	49
4.3	Verschiedene Trachealkanülen	51
4.3.1	Trachealkanülen mit Cuff	51
4.3.2	Aufbau und Beschreibung einer Trachealkanüle	51
4.3.3	Trachealkanülen ohne Cuff	56
4.3.4	Gefensterter Kanülen	56
4.4	Verbandswechsel bei Trachealkanülen	56
4.5	Wechsel der Trachealkanüle	57
4.5.1	Vorbereitung	57
4.5.2	Durchführung	57
4.6	Verschluss des Tracheotomas	58
4.6.1	Cuff-Leak-Test	58
4.6.2	Platzhalter	58
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	59
5	NIV – nichtinvasive Ventilation, nichtinvasive Beatmung	61
5.1	Indikationen und Kontraindikationen der NIV	62
5.1.1	Indikationen	62
5.1.2	Kontraindikationen	62
5.2	Möglichkeiten durch NIV	62
5.3	Vergleich zwischen invasiver Beatmung und NIV	63
5.4	Erfolgskriterien für NIV	63
5.4.1	Misserfolg der NIV	64
5.5	Typische Einsatzmöglichkeiten	65
5.5.1	NIV bei hyperkapnischer ARI	65
5.5.2	ARI bei kardialem Lungenödem	67
5.5.3	NIV bei hypoxämischer ARI	67
5.5.4	NIV bei immunsupprimierten Patienten	67
5.5.5	NIV bei ambulant erworbener Pneumonie	67
5.5.6	NIV bei Trauma oder Verbrennung	68
5.5.7	NIV bei anderer hypoxämischer ARI	68
5.5.8	NIV in der Postextubationsphase (PeP)	68
5.6	NIV-Systeme	68
5.6.1	Verschiedene Maskensysteme bzw. Interfaces	68
5.6.2	Moderne NIV-Masken	70
5.7	Praktisches Vorgehen	71

5.7.1	Vorbereitung	71
5.7.2	Einleitung der Beatmung	73
5.8	Beatmungseinstellung der NIV	74
5.8.1	Beatmungsparameter	75
5.9	CPAP-ASB bei Evita-Beatmungsgeräten	75
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	76
6	Nasale High-Flow-Sauerstofftherapie (HFOT)	77
6.1	Grundlagen	78
6.2	Ziele der HFOT	78
6.3	Vorteile der HFOT gegenüber der NIV	79
6.4	Gerätemodelle	79
6.4.1	Optiflow 850TM	79
6.4.2	F&P Airvo 2 TM	79
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	80

III Beatmungsformen und Muster

7	Respiratormodelle	83
7.1	Modell der Luftpumpe oder Kolbenpumpe	84
7.2	Modell Ambubeutel (Beatmungsbeutel)	84
7.3	Modell eines offenen bzw. halboffenen Systems	84
7.4	Modell eines Wasserschlosses	84
7.5	Respiratormodell	85
7.6	Intensivbeatmungsgeräte und turbinengesteuerte Beatmungsgeräte	85
7.7	Beatmungsschlauchsysteme	86
7.7.1	Leckagesystem	86
7.7.2	Einschlauchsystem mit integriertem Ausatemventil	86
7.7.3	Zweischlauchsystem	86
7.7.4	Tülle und Funktionscheck	87
7.8	Atemgaskonditionierung – Atemgasbefeuchtung	87
7.8.1	Passive Befeuchter	87
7.8.2	Aktive Befeuchter	87
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	88
8	Spontanatmung und Überdruckbeatmung	89
8.1	Das Atemmuster eines Menschen am Respirator	90
8.1.1	Weitere Merkmale der spontanen Ruheatmung	90
8.2	Überdruckbeatmung	91
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	91
9	Beatmungsformen	93
9.1	Unterscheidungsmerkmale der Beatmungsformen	94
9.2	Beatmungskurven	94
9.2.1	Druckkurve	94
9.2.2	Flowkurve	95
9.2.3	Volumenkurve	95
9.2.4	CO ₂ -Kurve	96
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	96
10	Druckkontrollierte Beatmung	97
10.1	Nomenklatur	98
10.2	Parametereinstellung	98
10.2.1	Sauerstoff	98
10.2.2	PEEP (Positive End Expiratory Pressure)	99

10.2.3	Inspirationsdruck	100
10.2.4	Frequenz	103
10.2.5	Inspirationszeit	103
10.2.6	Rampe, Druckrampe, Anstiegszeit	104
10.2.7	Trigger	105
10.2.8	Basisflow, Biasflow, Flow-By	107
10.2.9	Maximale Luftdruckgrenze	107
10.3	Ablauf der druckkontrollierten Beatmung	108
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	108
11	Volumenkontrollierte Beatmung	109
11.1	Nomenklatur	110
11.2	Parametereinstellung	110
11.2.1	Atemzugvolumen	111
11.2.2	Flow	111
11.3	Ablauf einer volumenkontrollierten Beatmung	112
11.4	Probleme der volumenkontrollierten Beatmung	113
11.4.1	Risiko der unbekannten Luftdrücke	113
11.4.2	Pendelluft	113
11.4.3	Scherkräfte	113
11.4.4	Atelektasen- und Emphysembildung	113
11.4.5	Unbekannte Luftdrücke	114
11.4.6	Keine Unterstützung der Spontanatmung	114
11.5	Anwendung der volumenkontrollierten Beatmung	115
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	115
12	Druckregulierte-volumenkontrollierte Beatmung	117
12.1	Nomenklatur	118
12.2	Parametereinstellung	118
12.3	Selbstständige Beatmungsdruckniveaueinstellung des Respirators	119
12.3.1	Dehnungsfähigkeit der Lunge (Compliance)	119
12.3.2	Atemwegswiderstände (Resistance)	119
12.4	Anwendung der druckregulierten-volumenkontrollierten Beatmung	119
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	120
13	Druckunterstützende Beatmung	121
13.1	Nomenklatur	122
13.2	Parametereinstellung	123
13.2.1	<i>Druckunterstützung der Atmung</i>	123
13.2.2	Trigger	124
13.2.3	Back-up	126
13.3	Ablauf der ASB-/PSV-Atmung	126
13.3.1	Optimale Höhe der Druckunterstützung	127
13.4	Vor- und Nachteile	127
13.5	Tubuskompensation	127
13.5.1	Probleme der Tubuskompensation	128
13.6	ST-Modus	129
13.6.1	Beschreibung des Beatmungsmodus ST	129
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	131
14	CPAP (Continuous Positive Airway Pressure)	133
14.1	Der Sinn der CPAP-Atmung	134
14.1.1	Vorbeugung und Therapie von Atelektasen	134
14.1.2	Verminderung der Atemarbeit	134
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	135

15	SIMV (Synchronized Intermittent Mechanical Ventilation)	137
15.1	Volumenkontrolliertes SIMV – VC-SIMV	138
15.1.1	Parameter – Einstellung (■ Tab. 15.1)	139
15.1.2	Einstellung bei Evita 2 (Fa. Dräger)	139
15.2	Druckkontrolliertes SIMV – PC-SIMV	140
15.2.1	Parametereinstellung	140
15.3	Vorteile und Nachteile von SIMV	141
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	141
16	BIPAP (Biphasic Positive Airway Pressure/BiLevel/DuoPAP/BiVent)	143
16.1	Nomenklatur	144
16.2	Parametereinstellungen	144
16.3	Was passiert beim BIPAP/Bi-Level?	144
16.3.1	Möglichkeit zur Spontanatmung	145
16.3.2	Synchronisation mit der Spontanatmung	145
16.4	BIPAP-ASB	146
16.4.1	Höhe der Druckunterstützung	147
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	150
17	APRV (Airway Pressure Release Ventilation)	151
17.1	Intrinsic PEEP	152
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	152
18	MMV (Mandatorische Minutenvolumen-Ventilation)	153
18.1	Mindestatemminutenvolumen	154
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	155
19	PPS (Proportional Pressure Support), PAV (Proportional Assist Ventilation)	157
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	158
20	Intelligent Ventilation – ASV (Hamilton Respiratoren)	159
20.1	Funktionsprinzipien	160
20.1.1	Optimales Atemminutenvolumen	160
20.1.2	Festlegung eines optimalen Beatmungsbereiches	160
20.2	Anpassung weiterer Beatmungsparameter	161
20.2.1	Beatmungsdruck	161
20.2.2	Inspirationszeit und I:E-Verhältnis	161
20.2.3	ASV-Beatmungseinstellung	162
20.3	INTELLiVENT-ASV	163
20.3.1	Regulation der CO ₂ -Elimination	163
20.3.2	Regulation der Oxygenierung	163
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	164
21	AVAPS (Average Volume Assured Pressure Support)	165
21.1	Merkmale druckkontrollierter Beatmung und AVAPS-Ansatz	166
21.2	Parametereinstellung	166
21.3	Fallbeispiel an der Trilogy 100, Fa. Phillips Respironics	166
21.4	Anwendung von AVAPS	167
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	167

IV Sekretmanagement

22	Atemgaskonditionierung	171
22.1	Absolute und relative Feuchte	172
22.2	Aktive Atemgasbefeuchtung	173

22.2.1	Pass-Over-Verdampfer	173
22.2.2	Gegenstromverfahren	173
22.3	Beatmungsfilter	174
22.3.1	Mechanische Filter	174
22.3.2	Elektrostatische Filter	175
22.4	Passive Atemgasbefeuchtung	175
22.4.1	HME-Filter	175
22.4.2	HMEF	175
22.5	Aktive Befeuchtung versus passive Befeuchtung	175
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	178
23	Lagerungstherapie zur Sekret drainage	179
23.1	Lagerungsmaßnahmen	180
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	183
24	Sekretelimination durch Hustenunterstützung	185
24.1	Hustenfähigkeit	186
24.1.1	Hustenvorgang	186
24.1.2	Probleme und Komplikationen bei vermindertem Husten	186
24.2	Unterstützung beim Husten	187
24.2.1	Maßnahmen zur Vergrößerung des intrathorakalen Volumens	187
24.2.2	Maßnahmen zum intensivierten expiratorischen Luftfluss	189
24.3	Physikalische Therapie	190
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	191
25	Die endobronchiale/endotracheale Absaugung	193
25.1	Grundsätzliches zur Absaugung	194
25.2	Geschlossene versus offene Absaugung	195
25.3	Subglottische Absaugung	197
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	198
26	Inhalationstherapie	199
26.1	Grundlagen der Inhalationstherapie	200
26.2	Deposition	200
26.2.1	Depositionsarten	200
26.3	Inhalative Therapie	201
26.3.1	Dosieraerosole	201
26.3.2	Verneblersysteme	202
26.3.3	Positionierung der Vernebler	203
26.4	Medikamentöse Sekretolyse	207
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	207

V Überwachung des Patienten und der Beatmung

27	Resistance und Compliance	211
27.1	R = Resistance	212
27.1.1	Normwerte der Resistance	212
27.2	C = Compliance	215
27.2.1	Normwerte der Compliance	216
27.2.2	Auswirkung der Compliance C	216
27.2.3	PV-Loop bzw. Druck-Volumen-Schleife	218
27.3	Resistance und Compliance	220
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	220

28	Kontrollmechanismen und Steuerungsarten	221
28.1	Kontrollmechanismen der Beatmung	222
28.2	Steuerungsarten der Beatmung	222
28.3	Praxisrelevante Beatmungsformen	222
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	222
29	Flow und Flowkurven	223
29.1	Sinusflow, konstanter Flow, dezelerierender Flow	224
29.1.1	Aussagen von Flowkurven	225
29.1.2	Vorteile des dezelerierenden Flows	225
29.2	Flow bei volumenkontrollierter Beatmungsform	226
29.2.1	Spitzendrücke und Plateauphasen mit unterschiedlich hohem Flow	226
29.3	Flow bei druckkontrollierter Beatmungsform	226
29.3.1	Flowverhalten bei unterschiedlich steiler Rampe	226
29.3.2	Flowverhalten bei unterschiedlich hohem P_{insp}	226
29.3.3	Flowkurve bei zu kurzer Expirationszeit	226
29.3.4	Flowkurve bei zu kurzer Inspirationszeit	228
29.3.5	Flowtrigger	228
29.3.6	Drucktrigger	229
29.4	Flowkurve im ASB/PSV	230
29.4.1	Flowtrigger	230
29.4.2	Anstieg bzw. Rampe	230
29.4.3	Expirationstrigger	230
29.5	Weitere Flowinterpretationen	233
29.5.1	Flow bei Sekretstau	233
29.5.2	Flow bei Wasser im Schlauchsystem oder bei Sekretverlegung	233
29.5.3	Flow bei Obstruktion	234
29.5.4	Flow bei expiratorischer Flussstörung	234
29.5.5	Flow bei druckregulierter-volumenkontrollierter Ventilation	235
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	236
30	Volumenkurve	237
30.1	Beobachtung der Volumenkurve	238
30.1.1	Volumenkurve bei Spontanatmung und Druckunterstützung	238
30.1.2	Volumenkurve bei druck- und volumenkontrollierter Beatmung	239
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	240
31	Alarmer und Alarmerinstellungen am Respiator	241
31.1	Stufen der Alarmmitteilung	242
31.2	Spezielle Alarmer	242
31.2.1	Atemwegsdruck	242
31.2.2	Atemminutenvolumen	243
31.2.3	Atemzugvolumen	243
31.2.4	Atemfrequenz	244
31.2.5	Expiratorisch gemessenes CO_2	244
31.2.6	Apnoezeit	245
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	246
32	Messwerte der Beatmung	247
32.1	Messwerte im Einzelnen	248
32.1.1	Druckwerte	248
32.1.2	Volumina	248
32.1.3	Frequenzwerte	249
32.1.4	Weitere Messparameter	250
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	250

33	Risiken und Nebenwirkungen der invasiven Beatmung	251
33.1	Warum und welche Risiken und Nebenwirkungen gibt es?	252
33.2	Kardiovaskuläre Risiken und Nebenwirkungen	252
33.3	Renale Risiken	254
33.4	Zerebrovaskuläre Risiken	254
33.5	Gastrointestinale Risiken	255
33.6	Pulmonale Risiken	255
33.6.1	Unzureichende Anfeuchtung und Erwärmung der „Beatmungsluft“	255
33.6.2	Ungleichmäßige Verteilung der Beatmungsluft	256
33.6.3	Tiefe Analgesie	256
33.6.4	Barotrauma	256
33.6.5	Volutrauma	256
33.6.6	PEEP zu niedrig, Scherkräfte	256
33.6.7	„Stress“ und „Strain“	257
33.7	Risiken aus der Einstellung verschiedener Beatmungsparameter	261
33.7.1	Rampe	261
33.7.2	PEEP	262
33.7.3	Sauerstoffkonzentration	262
33.7.4	Trigger	262
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	262
34	BGA-Blutgasanalyse	263
34.1	Beurteilung einer BGA	264
34.2	Sauerstoff und Kohlendioxid	264
34.2.1	Sauerstoff (O_2)	264
34.2.2	Kohlendioxid (CO_2)	266
34.2.3	Sauerstoffpartialdruck (pO_2) und Kohlendioxidpartialdruck (pCO_2)	267
34.2.4	Sauerstoffsättigung	270
34.2.5	Sauerstoffbindungskurve	270
34.2.6	Zentralvenöse Sauerstoffsättigung (SvO_2)	273
34.2.7	Horowitz-Quotient	273
34.3	Säure-Basen-Haushalt	274
34.3.1	pH-Wert	274
34.3.2	Puffer und Puffersysteme	275
34.3.3	Regulation des Säure-Basen-Haushaltes	275
34.3.4	Störungen des Säure-Basen-Gleichgewichts	277
34.4	Auswirkungen von Azidose und Alkalose	282
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	284
35	Analosedierung und Delir	285
35.1	Analosedierung	286
35.1.1	Indikationen	286
35.1.2	Instrumente zur Beurteilung von Schmerzen	287
35.1.3	Instrumente zur Beurteilung der Sedierung	288
35.2	Delir	290
35.2.1	Unterscheidung des Delirs	292
35.2.2	Prävention und Behandlung des Delirs	292
35.2.3	Instrumente zur Beurteilung des Delirs	292
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	294
36	Pharmakologie	295
36.1	Pharmakotherapie	296
36.2	Analosedierung	296
36.2.1	Narkotika	296
36.2.2	Opioide	297
36.2.3	Benzodiazepine	299

36.2.4	Ketamin	299
36.2.5	Neuroleptika	300
36.2.6	Barbiturate	301
36.2.7	α -Rezeptorantagonist	302
36.2.8	Inhalationsanästhetika	303
36.3	Katecholamine	306
36.3.1	Autonomes Nervensystem	306
36.3.2	Synapse und Neurotransmitter	308
36.3.3	Neurotransmitter und Rezeptoren	311
36.3.4	Katecholamine	312
36.4	Atropin	314
36.5	Muskelrelaxanzien	314
36.5.1	Nichtdepolarisierende Muskelrelaxanzien (NDMR)	314
36.5.2	Depolarisierende Muskelrelaxanzien (DMR)	315
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	315
37	Überwachung und Betreuung eines Intensiv- und Beatmungspatienten	317
37.1	Die Patientenbeobachtung	318
37.1.1	Bei Aufnahme noch ansprechbarer Patient	318
37.1.2	Bei Aufnahme intubierter und analgosedierter Patient	320
37.2	Monitoring	323
37.2.1	Basismonitoring	323
37.2.2	Erweitertes Monitoring	323
37.2.3	Einzelne Überwachungsparameter	324
	Zum Nachschlagen und Weiterlesen	325
38	Weaning	327
38.1	Weaningprozess	328
38.2	Weaningklassifikation	328
38.3	Voraussetzungen für eine erfolgreiche Entwöhnung	329
38.4	Pflegerische Maßnahmen zur Stärkung der Atemmuskulatur	330
38.5	Weaningstrategien	331
38.5.1	Diskontinuierliches Weaning	331
38.5.2	Kontinuierliches Weaning	332
38.6	Entwöhnungsindizes	332
38.6.1	Rapid Shallow Breathing Index	332
38.6.2	Atemwegsokklusionsdruck	333
38.6.3	Negative Inspiratory Force	334
38.7	Weaningprotokoll	334
38.8	Automatisierte/wissensbasierte Entwöhnungsverfahren	335
38.9	Sedierungspause	337
38.10	Entwöhnung von langzeitbeatmeten Patienten	338
38.10.1	Voraussetzungen	339
38.10.2	Entwöhnungsprozess	339
38.10.3	Durchführung des Spontanatemversuches	339
38.10.4	Entwöhnbarkeit	339
38.10.5	Verschluss der Tracheotomie	341
	Zum Weiterlesen und Nachschlagen	341
	Serviceteil	
	Anhang	344
	Stichwortverzeichnis	351

Grundlagen der Atmung und des respiratorischen Versagens

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Anatomie und Physiologie der Atmung – 3
Kapitel 2	Indikationen und Ziele der Beatmung – 19



Anatomie und Physiologie der Atmung

1.1 Obere Atemwege – 4

1.1.1 Nase – 4

1.1.2 Kehlkopf und Stimmbänder – 4

1.2 Untere Atemwege – 6

1.2.1 Luftröhre (Trachea) – 6

1.2.2 Carina – 6

1.2.3 Bronchialbaum/Bronchialsystem – 7

1.2.4 Mukoziliäre Clearance – 8

1.2.5 Lage der Lungen im Körper – 9

1.2.6 Lungenflügel, Lungenlappen und Lungensegmente – 10

1.2.7 Alveolen und Surfactant – 11

1.2.8 Lungengefäße – 13

1.3 Atemhilfsmuskulatur – 13

1.3.1 Inspiration – 13

1.3.2 Expiration – 14

1.4 Physiologie – 15

1.4.1 Atemluft – 15

1.4.2 Diffusionszeit/Diffusionsstrecke – 15

1.4.3 Atemregulation – 15

1.4.4 Physiologisches Shuntvolumen – 16

1.4.5 Atemmechanik – 16

1.4.6 Lungenvolumina (■ Abb. 1.17) – 16

Zum Weiterlesen und Nachschlagen – 17

Die Atmung hat den Zweck, Sauerstoff aufzunehmen und Kohlendioxid abzugeben. Sauerstoff wird für den Stoffwechsel benötigt. Kohlendioxid ist ein Endprodukt des Stoffwechsels und muss mit Hilfe der Atmung abgegeben werden.

Anatomisch lassen sich unsere Atemwege in die oberen und die unteren Atemwege unterteilen. Physiologisch erfüllen sie unterschiedliche Aufgaben, die im Folgenden erläutert werden sollen. Der normale Weg der Atemluft wird nachvollzogen. Dabei soll auch immer ein Blick auf die künstliche Beatmung fallen, d. h. es wird erläutert, welche Aufgaben die künstliche Beatmung erfüllen muss, falls die normale Atmung von den Menschen nicht mehr ausgeübt werden kann.

1.1 Obere Atemwege

Die oberen Atemwege bestehen aus (Abb. 1.1):

- Nase,
- Mund,
- Rachen (Pharynx),
- Kehlkopf (Larynx).

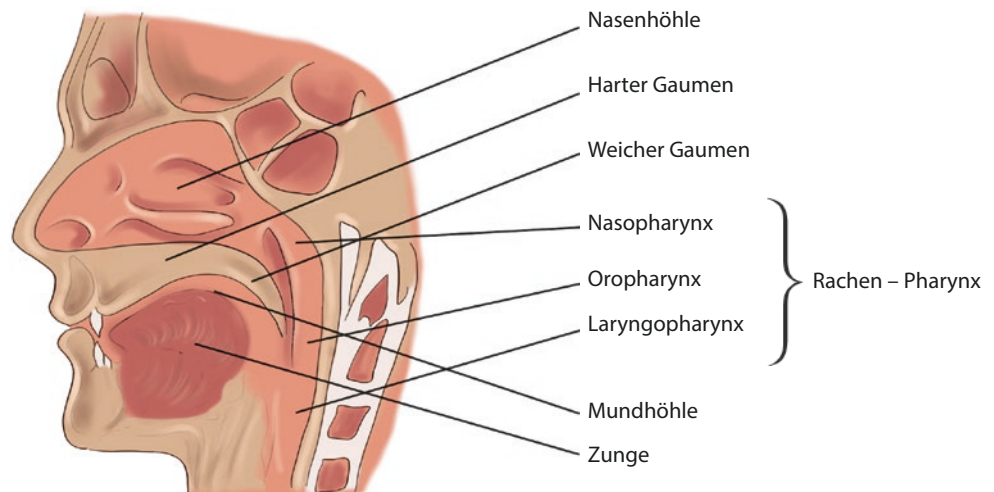
Aufgaben der oberen Atemwege

Bei normaler Atmung hat der obere Respirationstrakt 4 Aufgaben (Tab. 1.1).

Tab. 1.1 Aufgaben der oberen Atemwege

Erwärmung	Eingeatmete Luft wird erwärmt und kann so mehr Wasserdampf aufnehmen
Anfeuchtung	Mit wässrigem Sekret aus den Drüsen des oberen Respirationstraktes, Selbstreinigungsmechanismus wird so aufrechterhalten
Filterung	Abfangen größerer Partikel durch Nasenhaare und durch den Schleimüberzug der Nasen- und Tracheobronchialschleimhaut
Turbulenz	Bewirkt einen größtmöglichen Kontakt zwischen Luft und Schleimhaut

Abb. 1.1 Obere Atemwege. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)



Bezug zur künstlichen Beatmung

Die oberen Atemwege können diese Aufgaben nicht mehr erfüllen, wenn sie mittels Endotrachealtubus oder Trachealkanüle umgangen werden. Hier muss die künstliche Beatmung technische Hilfsmittel bereitstellen, um die o. g. Aufgaben zu übernehmen. Diese sind aktive oder passive Befeuchtungssysteme.

1.1.1 Nase

An der Seitenwand jeder Nasenhöhle befinden sich drei übereinander liegende Nasenmuscheln (Abb. 1.2). Die Nasenschleimhaut besteht aus einem Flimmerepithel mit vielen Schleimdrüsen. Das Flimmerepithel schlägt den Schleimfilm nach hinten. Im oberen Raum der Nasenhöhle befindet sich die Riechschleimhaut. Unter der Schleimhaut verläuft ein dichtes Kapillarnetz, teilweise als volumenreicher Venenplexus (Septumschwellkörper). Nasenbluten entsteht meist im vorderen Abschnitt der Nasenschleimhaut.

1.1.2 Kehlkopf und Stimmbänder

Der Kehlkopf (Larynx) trennt den Rachen von der Luftröhre. Er liegt vorne tastbar am Hals.

Der Kehlkopf (Abb. 1.3) hat drei Funktionen:

1. Schutz vor Aspiration beim Schlucken:
Aspiration bezeichnet den Vorgang, bei dem Nahrung in die Lunge gelangt. Bei dem Schlucken wird der Kehlkopf nach vorne und nach oben gezogen. Dadurch verschließt der Kehldeckel (Epiglottis) die Luftröhre. Speisen und Getränke werden dadurch in die Speiseröhre geleitet. Das schützt die unteren Atemwege vor Aspiration. Erwachsene Menschen können nicht gleichzeitig schlucken und atmen. Lediglich Säuglinge können während des Saugens gleichzeitig atmen.

Abb. 1.2 Nasenhöhle mit Nasenmuscheln. [Aus: Zilles K, Tillmann BN (2010) Anatomie. Springer, Heidelberg Berlin]

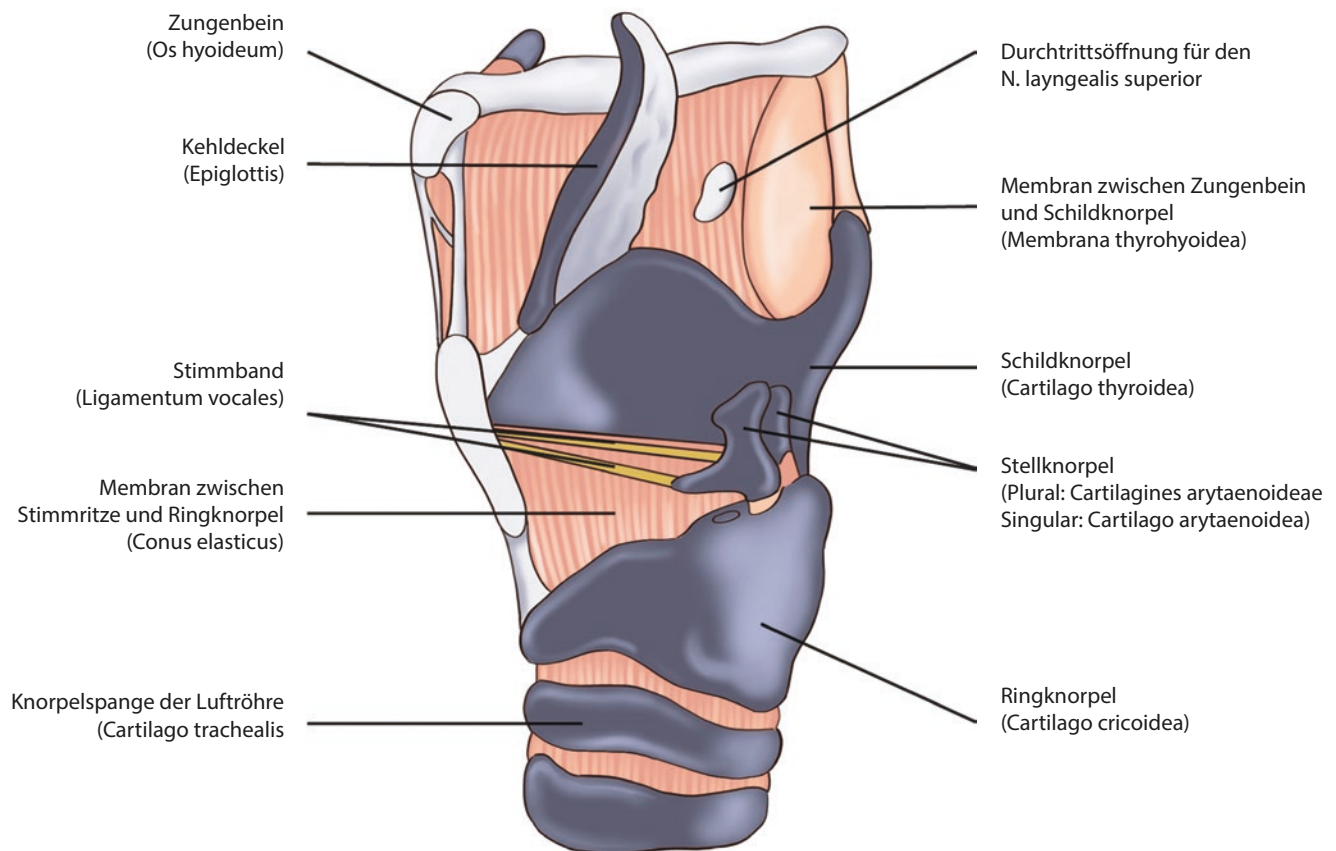
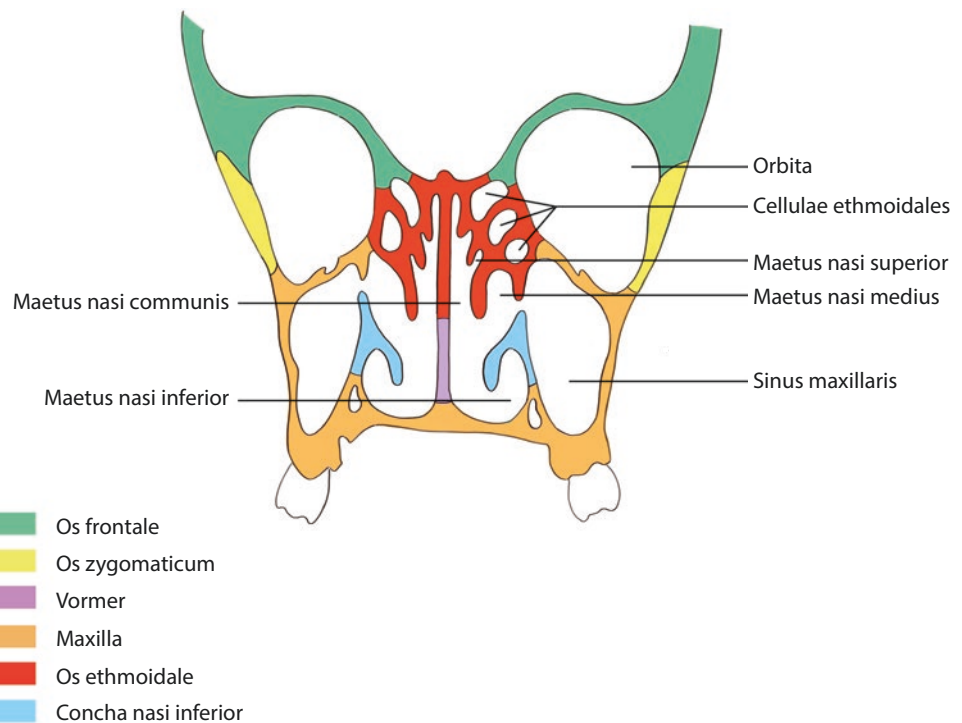


Abb. 1.3 Kehlkopf. [Aus: Spornitz (2010) Anatomie und Physiologie, Lehrbuch und Atlas für Pflege- und Gesundheitsberufe, 6. Aufl. Springer, Heidelberg Berlin]

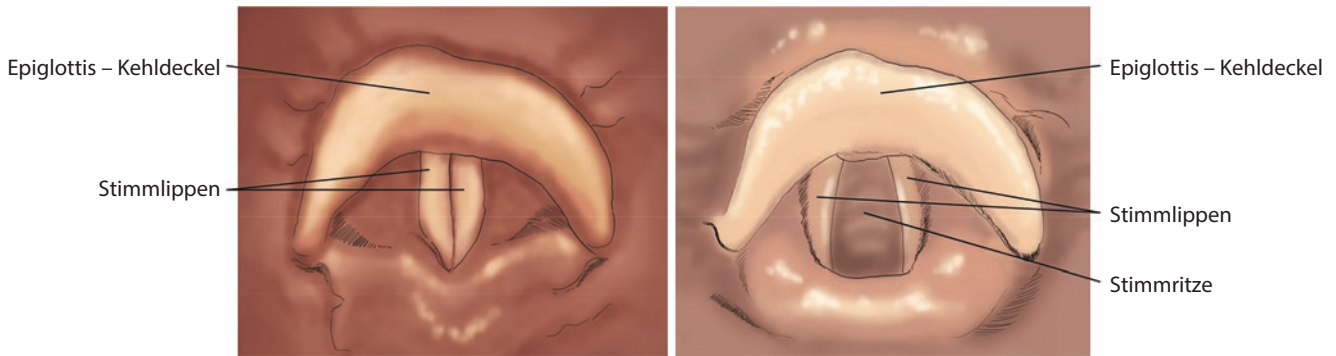


Abb. 1.4 Stimmritze beim Sprechen und Atmen. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)

2. Übergang von oberen und unteren Atemwegen:
Die Stimmritze ist bei erwachsenen Menschen die engste Stelle der Atemwege. Die Ein- und Ausatemluft muss jedes Mal durch die Stimmritze hindurch. Der Durchmesser ist jedoch groß genug, dass es uns Menschen ohne Anstrengung und respiratorischer Erschöpfung immer gelingt.
3. Stimm- und Sprachbildung:
Mit Hilfe der Stimmlippen wird der Strom der Atemluft reguliert. Die Stimmlippen werden so in Schwingung versetzt und dadurch wird die Stimme und Sprache gebildet. Stimme, Töne und Sprache werden i. d. R. während der Ausatmung erzeugt (Abb. 1.4).

Die Darstellung der Stimmlippen erfolgt mittels der Spiegelung des Kehlkopfes (Laryngoskopie). Bei ruhiger Atmung stehen die Stimmlippen in einem ausreichenden Abstand zueinander. Die Öffnung zwischen den Stimmlippen wird Stimmritze genannt. Diese ist ausreichend groß, sodass dem Menschen das dauerhafte Ein- und Ausatmen ohne Anstrengung möglich ist.

Die Stimmlippen liegen bei der Stimm- und Sprachbildung eng beieinander. Somit verengt sich die Stimmritze. Stimme und Sprache werden mit dem Ausatemluftstrom erzeugt, nicht während der Einatmung. Der Ausatemluftstrom wird reguliert, mal fließt die Luft rascher mal langsamer und bringt die Stimmlippen in Schwingung. Je nach Ton und Stimme verengt sich die Stimmritze, sodass eine sehr vielfältige Ton- und Stimmbildung möglich ist. Gleichzeitig wird der Ausatemluftstrom verzögert, dadurch ist der Menschen in der Lage, sehr lange Sätze zu bilden oder lange Liedstrophen zu singen. Die Ausatmung mit Stimm- und Sprachbildung kann somit durchaus 10–20 s betragen.

Bezug zur künstlichen Beatmung

Ein Endotrachealtubus wird durch die Stimmritze in die unteren Atemwege vorgeschoben. Somit ist eine Regulation des Ausatemluftstroms nicht mehr möglich. Ebenso ist eine Stimm- und Sprachbildung nicht möglich, da die

Luft innerhalb eines Tubus fließt und die Stimmbänder nicht in Schwingung versetzt werden können. Der Tubus reizt die Stimmlippen und nach Extubation entstehen sehr häufig Schmerzen und Heiserkeit.

Kurzes rasches Einatmen und durch Stimm- und Sprachbildung lange Ausatmung erzeugt ein Atemzeitverhältnis I:E von 1:10–1:30.

1.2 Untere Atemwege

Die unteren Atemwege bestehen aus:

- Trachea (Lufttröhre),
- Bronchien,
- Bronchiolen,
- Alveolen.

➤ Nur die Alveolen dienen dem Gasaustausch.

1.2.1 Lufttröhre (Trachea)

Die Trachea spannt sich als Rohr zwischen dem Kehlkopf und den Stammbronchien.

Sie ist ca. 10–12 cm lang, elastisch und besitzt zur Vorderseite hin 12–20 hufeisenförmige Knorpelspangen, die von außen tastbar sind. Sie verhindern ein Kollabieren der Trachea. Die Hinterwand ist elastisch und besteht aus Bindegewebe und Muskulatur (Pars membranacea). Daran grenzt die Speiseröhre.

Durch die Elastizität der Hinterwand kann der Innendurchmesser der Trachea auf ca. $\frac{1}{4}$ verengt werden, damit die Luft mit hohem Druck herausgepresst werden kann (rechter Teil der Abb. 1.5). Dadurch wird Husten und Niesen ermöglicht.

1.2.2 Carina

Die erste Aufzweigung von der Trachea zu den beiden Stammbronchien (Hauptbronchien) wird „Carina“ genannt.

Sie ist von einem dichten nervalen Netz durchzogen. Wird die Carina von aspirierten Fremdkörpern gereizt, entsteht ein Hustenreiz. Dieser kann auch durch die endobronchiale Absaugung ausgelöst werden.

1.2.3 Bronchialbaum/Bronchialsystem

Der **rechte**, etwas stärkere **Hauptbronchus** ist 1–2,5 cm lang. Er verläuft etwas gerader als der linke Stammbronchus und hat eine Abknickung von nur ca. 20 % gegenüber der Trachea.

Der **linke**, schwächere **Hauptbronchus** ist 4,5–5 cm lang. Bedingt durch den Aortenbogen beträgt die Abwinkelung mindestens 35 % gegenüber der Trachea.

Aspirierte Fremdkörper gelangen deshalb häufiger in den rechten als in den linken Hauptbronchus.

Trachea und Bronchien weiten sich bei der Einatmung leicht. Dadurch steigt der Innendurchmesser der Atemwege und die Einatmung erfolgt ohne Anstrengung. Während der Ausatmung verengen sich Trachea und Bronchien leicht. Dadurch sinkt der Innendurchmesser der Atemwege. Die Ausatmung dauert im Ruhezustand daher etwas länger als die Einatmung. Durch die Knorpelspangen und -platten bleiben die Atemwege gesichert offen.

Bezug zur künstlichen Beatmung

Meist ist die Ausatmung doppelt so lang wie die Einatmung. Daraus resultiert das normale Atemzeitverhältnis I:E von 1:2. Meist wird das bei der künstlichen Beatmung eingestellt.

Die Wände der Bronchien sind aus 3 Schichten aufgebaut (■ Tab. 1.2).

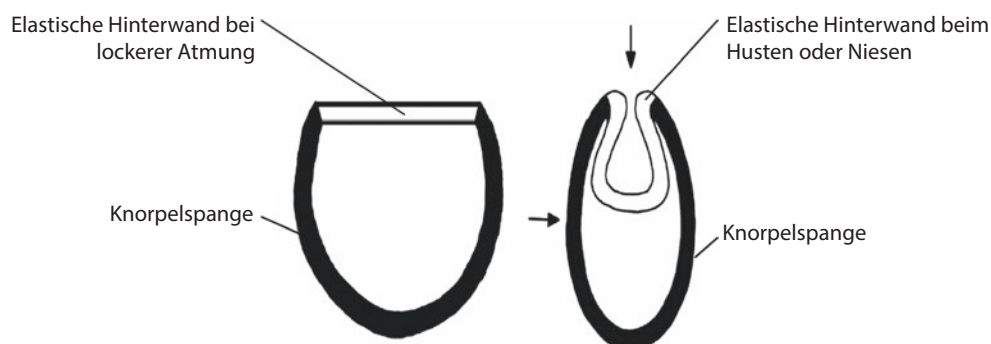
Der Bronchialbaum (das Bronchialsystem) dient dem Transport der eingeatmeten Luft und zweigt sich immer weiter auf, insgesamt 23-mal. Jede Verzweigung wird Generation genannt.

Bis zur 16. Generation dient der Bronchialbaum ausschließlich dem Lufttransport. Ab der 17. Generation beginnt der Bereich, in dem der Gasaustausch möglich ist. Dort beginnt der alveolare Bereich (■ Abb. 1.6 und 1.7).

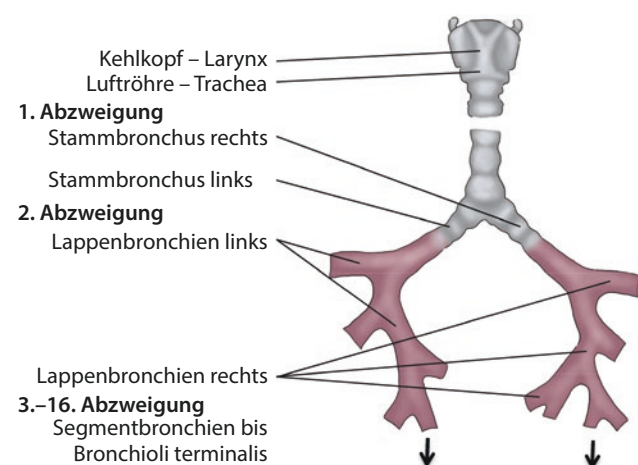
■ Tab. 1.2 Aufbau der Bronchialwände

Innen	Zylinderepithel und Flimmerhärchen
Mitte	Drüsen für Feuchtigkeit und Schleimbildung
Außen	Knorpel/Knorpelspangen zum Offenhalten und zur äußeren Schienung

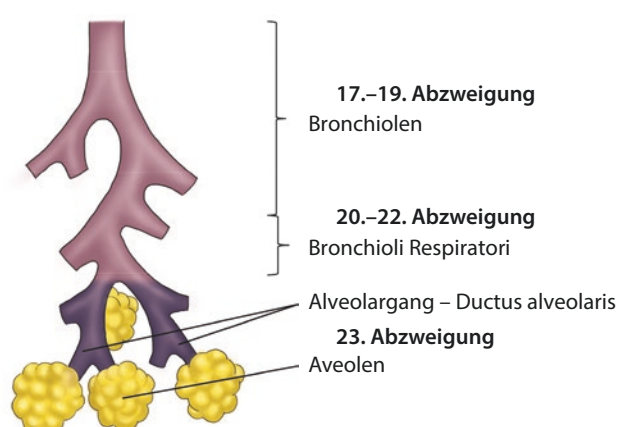
■ Abb. 1.5 Querschnitt Trachea. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)



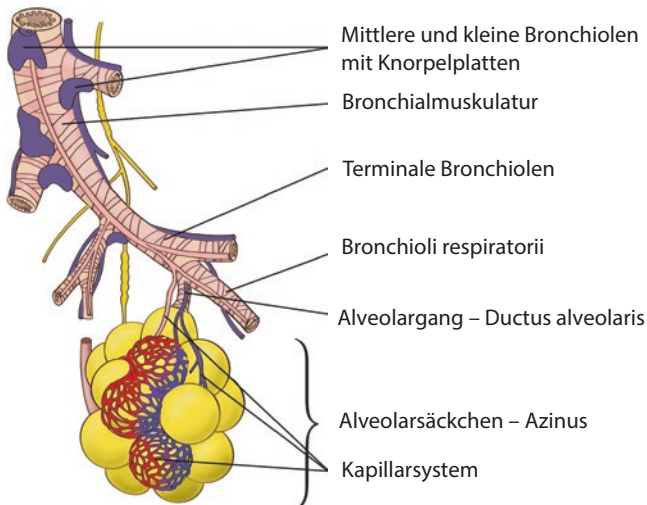
1.–16. Abzweigung (Generation)



17.–23. Abzweigung (Generation)



■ Abb. 1.6 Bronchialsystem links 1.–16. Generation und rechts 17.–23. Generation. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)



■ **Abb. 1.7** Bronchialsystem, mittlere Bronchien bis zu Alveolen. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)

Das Gesamtvolumen des Bronchialsystems ist recht klein und beträgt ca. 100 ml. Somit ist ein Eintritt von Flüssigkeiten für den Menschen auch gefährlich, da das Volumen rasch ausgefüllt werden kann.

Anatomische Einteilung des Bronchialsystem

- Hauptbronchus
- Lappenbronchien (rechts 3, links 2)
- Segmentbronchien (rechts 10, links 9)
- Mittlere und kleine Bronchien
- Bronchioli (alle Knorpel Elemente fehlen)
- Bronchioli terminales
- Bronchioli respiratorii (Beginn des respiratorischen Teils des Bronchialbaumes)
- Ductus alveolaris
- Azini (1 Acinus umfasst 1500–4000 Alveolen, Durchmesser 2,5–5 mm)

■ Totraum

Die Luft, die sich ab Nase/Mund bis zu den Bronchiolen der 16. Generation befindet, wird Totraum genannt. Es ist der Anteil des Atemsystems, der zwar belüftet wird jedoch nicht am Gasaustausch beteiligt ist. Der Totraum wird weiter unterteilt in:

■ Anatomischer Totraum

Zum anatomischen Totraum gehören die oberen Atemwege des Nasopharynx, Larynx, Trachea, Bronchien bis zur 16. Generation. Sie dienen dem Lufttransport, der Reinigung und Erwärmung der Atemluft. Der anatomische Totraum beträgt ca. 2 ml/kg Körpergewicht (kgKG). Für einen erwachsenen Menschen mit einem Gewicht von 75 kg beträgt der Totraum somit ca. 150 ml Luft.

Die Luft des anatomischen Totraumes ist die letzte Menge Luft, die eingeatmet wird. Und auch die erste, die wieder ausgeatmet wird.

■ Alveolärer Totraum

Ein Teil der Alveolen wird ausreichend belüftet, jedoch nur unzureichend durchblutet. Beim lungengesunden Menschen sind das ca. 2 % der Alveolen. Atemluft, die in diese Alveolen gelangt, nimmt somit nicht am Gasaustausch teil und wird alveolärer Totraum bezeichnet.

■ Funktioneller Totraum

Der funktionelle Totraum ist die Summe von anatomischen und alveolären Totraum und beträgt ca. 30 % des Tidalvolumens.

■ Alveoläre Ventilation

Die alveoläre Ventilation ist umgekehrt der Anteil der Atemluft, der in die Alveolen gelangt und somit am Gasaustausch teilnehmen kann und ist die Differenz aus Atemminutenvolumen minus Totraumvolumen.

Die alveoläre Ventilation beträgt beim Erwachsenen ca. 4500 ml/min bzw. 60 ml/kgKG/min. Beim Neugeborenen beträgt sie ca. 400 ml/min bzw. 100–150 ml/kgKG/min und ist somit mehr als doppelt so groß wie die des Erwachsenen.

1.2.4 Mukoziliäre Clearance

Die Fähigkeit des Respirationstraktes zur Selbstreinigung wird mukoziliäre Clearance genannt. Die Innenwände der Atemwege sind durchgängig mit Flimmerepithel, den Zilien, ausgekleidet, durchsetzt von schleimproduzierenden Zellen. Diese Drüsenzellen produzieren flüssiges Sekret, die Sol-schicht, in der sich die Zilien befinden. Die Sekrete setzen sich als muköse Schicht auf die Flimmerhärchen und dient der Selbstreinigung der Atemwege (■ Abb. 1.8).

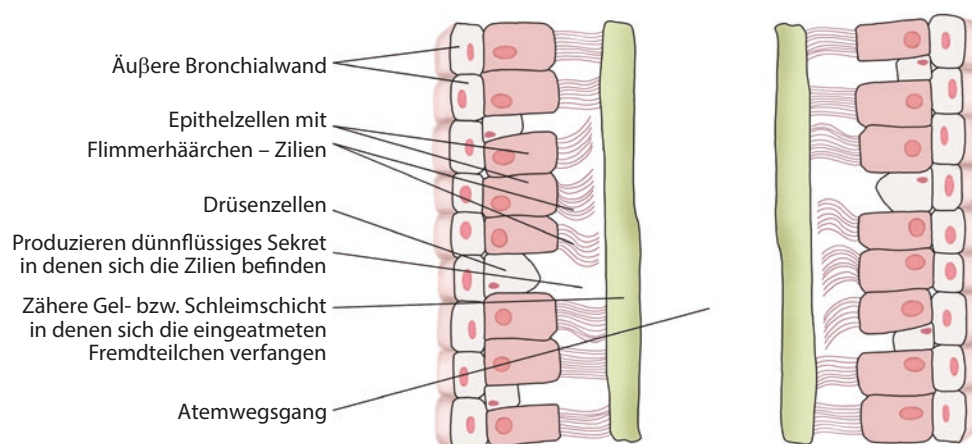
Die Zilien bewegen sich peitschenartig hin und her, etwa 30-mal pro Sekunde (30 Herz; Hz). Sie sorgen somit für einen Transport des Schleims und der Fremdpartikel in Richtung Kehlkopf. Es findet eine fortwährende Schleimsekretion statt. Die Schleimschicht fängt Fremdpartikel ein und umschließt sie. Schließlich werden sie nach oben Richtung Luftröhre (Trachea) transportiert.

Die meisten Fremdpartikel, die durch die Atmung in die luftleitenden Atemwege gelangen, werden so innerhalb von 24 h abtransportiert. Längere Transportzeiten betreffen Fremdpartikel, die im Alveolarbereich abgelagert wurden.

Die Zilienbeweglichkeit ist abhängig von der Luftfeuchtigkeit. Ist die Luftfeuchtigkeit nicht ausreichend und die Temperatur zu niedrig, wird der Reinigungsmechanismus behindert (s. oben).

Eine invasiver Beatmungszugang (Tubus oder Trachealkanüle) kann eine Behinderung des Reinigungsmechanismus bewirken. Daher ist es notwendig, dass die eingeatmete

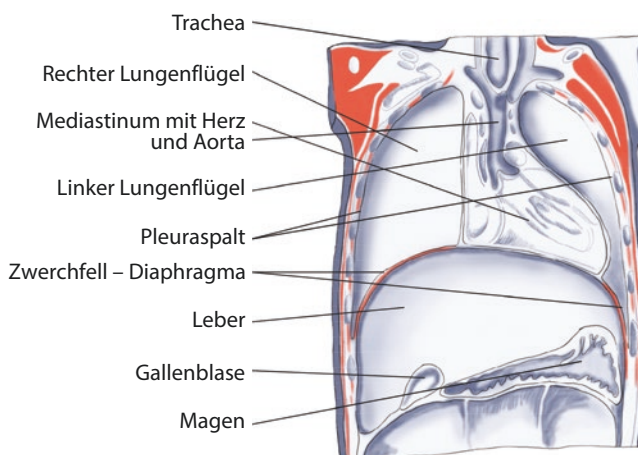
■ **Abb. 1.8** Mukoziliäres Transportsystem. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)



bzw. beatmete Luft warm und feucht ist. Bei der normalen Atmung wird das durch die oberen Atemwege gewährleistet. Bei der künstlichen Beatmung durch die aktiven oder passiven Befeuchtungssysteme.

Bezug zur künstlichen Beatmung

Ohne Befeuchtung und Erwärmung kann der Respirationstrakt seine Clearance-Aufgaben nicht wahrnehmen. Schon die Senkung der Luftfeuchtigkeit auf 90 % kann die Beweglichkeit der Flimmerhärchen stark beeinträchtigen. Daher wird bei der künstlichen Beatmung eine Feuchtigkeit von 100 % angestrebt. Jedoch ist die Beweglichkeit der Zilien bei einer vorübergehenden unzureichenden Befeuchtung und Erwärmung der Atemluft reversibel.



■ **Abb. 1.9** Rumpfansicht. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)

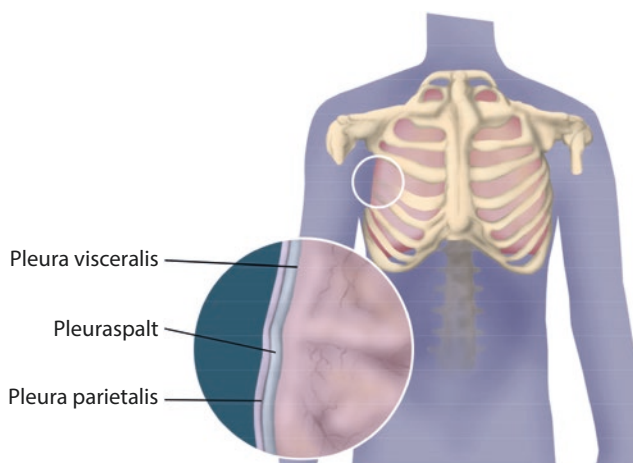
1.2.5 Lage der Lungen im Körper

Die Lunge liegt im Brustkorb (Thorax; ■ Abb. 1.9). Tastet man oberhalb des Schlüsselbeins (Clavicula), befindet sich darunter die obere Lungenspitze. Das Zwerchfell (Diaphragma) begrenzt die Lunge nach unten hin und trennt gleichzeitig den Thorax vom Bauchraum (Abdomen).

Nach vorne, seitlich und hinten ist die Lunge durch die Rippen, das Brustbein und die Wirbelsäule begrenzt. Gleichzeitig bilden die Rippen einen Schutz der Lunge und der weiteren Organe des Thorax (Herz, große Blutgefäße).

Nur durch die Eintrittspforte für Blutgefäße und die Stammbronchien (Hilus) ist die Lunge fest mit dem Thorax verbunden.

Die Lunge ist von einer Haut, der Pleura (Brustfell) umschlossen und besteht aus zwei „Blättern“. Das innere Blatt, die „Pleura viszeralis“ (Lungenfell) liegt der Lunge an. Das äußere Blatt, die „Pleura parietalis“ (Rippenfell) kleidet den Thorax von innen aus (■ Abb. 1.10). Zwischen beiden Blättern befindet sich der „Pleuraspalt“, der mit Flüssigkeit gefüllt ist, pro Lungenseite ca. 5 ml. Damit ist die Lunge am Brustkorb aufgespannt, sie kann nicht kollabieren. Mit Hilfe



■ **Abb. 1.10** Pleura und Pleuraspalt. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)

der Pleuraflüssigkeit „haftet“ die Lungen damit an der Innenwand des Thorax. Wenn die Lunge „könnte, wie sie wollte“, würde sie kollabieren, zusammenfallen, da sie elastischen Rückstellkräften, den sog. Retraktionskräften ausgesetzt ist. Tritt Luft in den Pleuraspalt ein (z. B. durch äußere Verlet-

zungen), so fällt die Lunge zusammen, ein Pneumothorax entsteht.

Die beiden Blätter können sich gegeneinander verschieben. Hierdurch ist die Lunge atemverschieblich. Die Lunge folgt somit passiv der Bewegung des Brustkorbs, der bei der Atmung aktiv bewegt wird. Die Lunge selbst hat keine Muskulatur, die eine aktive Bewegung erzeugt.

Bei einem spontan atmenden Menschen beträgt der intrapulmonale Druck bei der Inspiration ca. $-1 \text{ cmH}_2\text{O}$, bei der Expiration ca. $+2 \text{ cmH}_2\text{O}$.

Innerhalb des Pleuraspaltes besteht ein negativer, subatmosphärischer Druck. Er beträgt während der Ausatmung ca. $-4 \text{ cm H}_2\text{O}$ und bei der Einatmung ca. $-8 \text{ cm H}_2\text{O}$. Durch ihre elastischen Fasern neigt die Lunge dazu, ihr Volumen zu verkleinern und folgt bei der Einatmung der Bewegung des Brustkorbes und des Zwerchfells. Damit sinkt der negative intrapleurale Druck während der Einatmung (von -4 auf $-8 \text{ cm H}_2\text{O}$ bei der Einatmung). Strengt sich der Mensch stärker an (z. B. forcierte Einatmung bei körperlicher Belastung), sinkt der intrapleurale Druck stärker.

Während der Ausatmung verkleinert sich der Brustkorb, das Zwerchfell erschlafft. Die Lunge verkleinert sich ebenfalls aufgrund ihrer elastischen Fasern. Der intrapleurale Druck steigt wieder auf ca. $-4 \text{ cm H}_2\text{O}$ an.

Messung des intrapleuralen Druckes

Dieser intrapleurale Druck kann mittels Sonden direkt im Pleuraspalt gemessen werden.

Eine indirekte, jedoch zuverlässige Messmethode ist die Anwendung von Ösophagusdrucksonden, da am Ende der Speiseröhre ein vergleichbarer Druck herrscht.

Der Druckunterschied von intrapulmonalem Druck und intrapleuralem Druck wird **transpulmonaler Druck** genannt. Dieser ist bei spontaner Atmung immer positiv (siehe ► Abschn. 33.6.7).

Bezug zur künstlichen Beatmung

Patienten, deren Lungengewebe erkrankt ist, müssen sich bei der Atmung mehr anstrengen. Mittels Ösophagusdrucksonden kann diese Anstrengung mittelbar gemessen werden (s. oben). Bei großer Einatemanstrengung ist zu erwarten, dass der intrapleurale Druck größer ist.

Bei Lungenerkrankungen, die die Elastizität der Lunge verringern, kann die starre Lunge nicht wie die gesunde Lunge der Brustkorb- und Zwerchfellbewegung folgen. Je größer der negative Pleuradruck ist, desto mehr strengt sich der Patient bei der Atmung an und es besteht die Gefahr, dass sich der Patient respiratorisch erschöpft.

Künstliche Beatmung soll dazu beitragen, dass sich respiratorisch erschöpfte Patienten bei der Atemarbeit nicht so stark anstrengen müssen. Luft wird mit Überdruck in die Lungen gepresst, das entlastet die Atemarbeit der Patienten. Bei der künstlichen Beatmung ist der Druck innerhalb der Lunge (intrapulmonal) somit immer im positiven Bereich. Ebenso der intrapleurale Druck, da die mit Luft vollgepumpte Lunge auf den Pleuraspalt drückt. Somit befindet sich der transpulmonale Druck ebenso im positiven Bereich.

1.2.6 Lungenflügel, Lungenlappen und Lungensegmente

Die Lunge besteht aus einem rechten und einem linken Lungenflügel.

Der rechte Lungenflügel hat 3 Lungenlappen.

Der linke Lungenflügel hat 2 Lungenlappen (► Abb. 1.11).

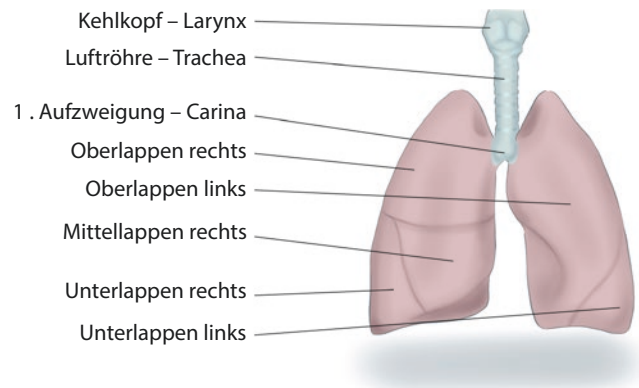
Die Lungenlappen teilen sich noch einmal in Segmente auf (► Abb. 1.12).

Der rechte Lungenflügel besteht aus 10 Lungensegmenten:

- 3 gehören dem Oberlappen an,
- 2 dem Mittellappen,
- 5 dem Unterlappen.

Der linke Lungenflügel besteht aus 9 Segmenten und da der linke Lungenflügel keinen Mittellappen hat, ergibt sich eine andere Einteilung.

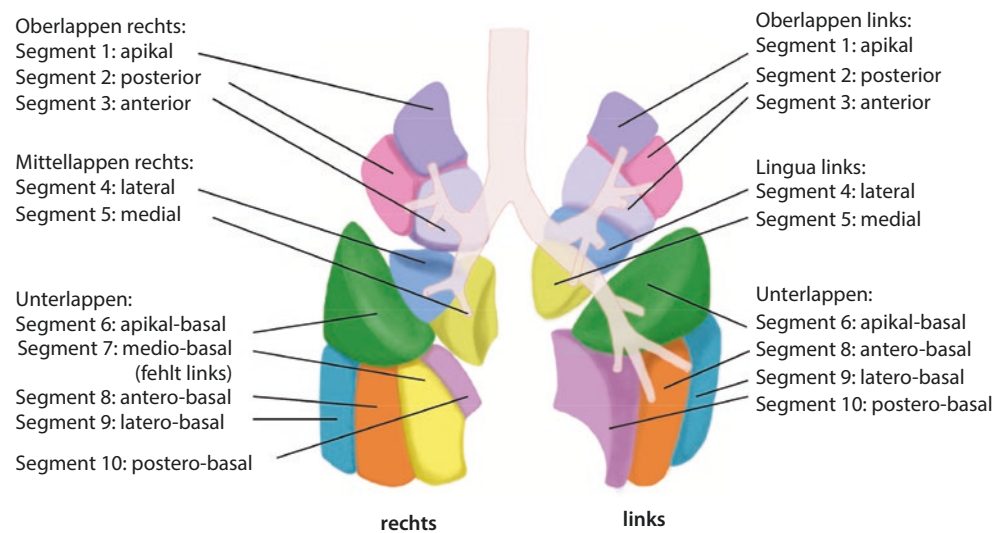
- 5 Segmente gehören dem Oberlappen an.
- Die Segmente 4 und 5 werden Lingua genannt.
- Der Unterlappen hat 4 Segmente.
- Segment 7 ist links nicht ausgebildet.



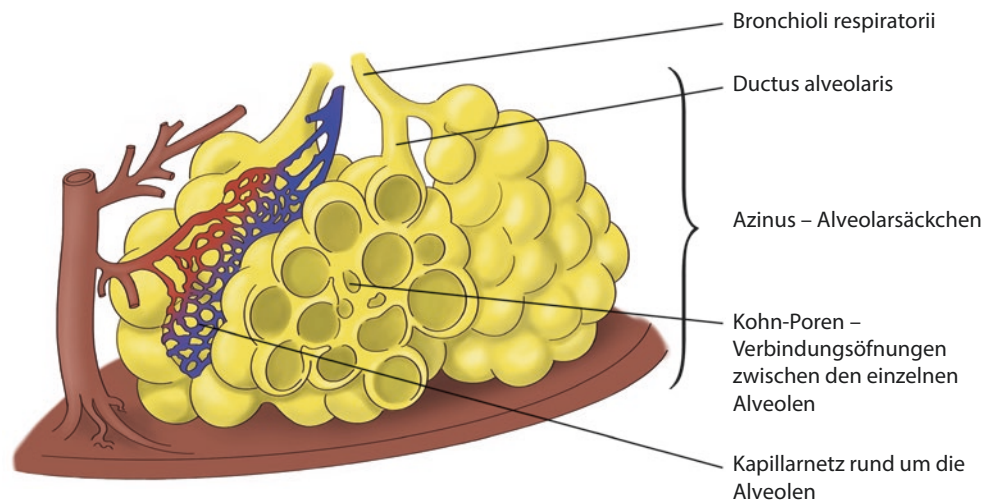
► Abb. 1.11 Lungenflügel und Lungenlappen. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)

1.2 · Untere Atemwege

■ **Abb. 1.12** Lungensegmente.
(Mit freundlicher Genehmigung
von Isabel Schlütter)



■ **Abb. 1.13** Azinus – Azini.
(Mit freundlicher Genehmigung
von Isabel Schlütter)



Bezug zur künstlichen Beatmung

Bei der physiologischen Einatmung gelingt es, dass sich die Luft gleichmäßig in alle Lungenlappen und -segmente verteilt. Bei der künstlichen Beatmung gelingt diese gleiche Verteilung der Inspirationsluft nicht immer. Die Luft der künstlichen Beatmung wird mit Überdruck in die Lungen gepresst und neigt dazu, sich ungleichmäßig zu verteilen. Meistens mit einer guten Belüftung der oberen, apikalen, Lungensegmente aber mit einer unzureichenden Belüftung der unteren, der basalen und dorsobasalen, Lungensegmente. Überdruckluft erreicht die apikalen Segmente besser als die dorsobasalen, da sie den Weg des geringsten Widerstandes geht und der verweist nach oben, nach apikal.

Bei einigen Beatmungsgeräten findet man mehr als 10 verschiedene Beatmungsformen. Es ist der Versuch, mit Hilfe der unterschiedlichen Beatmungsformen eine gleichmäßige Luftverteilung zu erreichen.

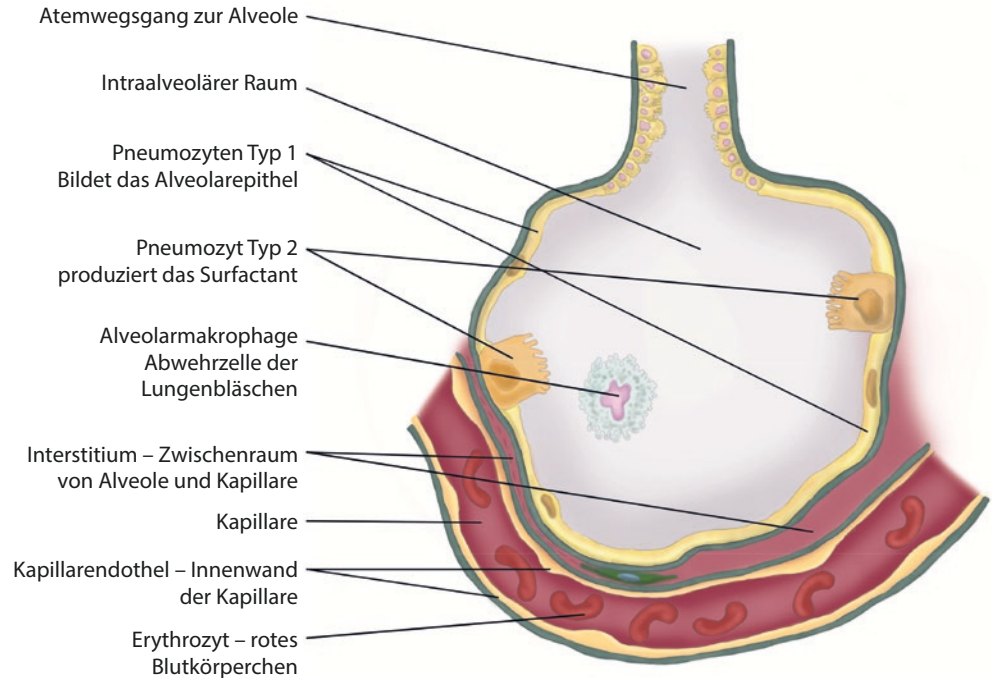
1.2.7 Alveolen und Surfactant

Die insgesamt ca. 300–400 Millionen Alveolen werden von einem feinen Kapillarnetz überspannt. Zwischen den luftgefüllten Alveolen und den Kapillaren, die aus der Pulmonalarterie hervorgehen, findet dann der eigentliche Gasaustausch statt.

- **Der Gasaustausch in der Lunge wird äußere Atmung genannt.**
- **Der Gasaustausch im Gewebe bzw. an den einzelnen Körperzellen wird innere Atmung genannt.**

Eine einzelne Alveole hat einen Durchmesser von 10–25 Mikrometer (■ Abb. 1.13). Die ca. 300–400 Millionen Alveolen haben zusammen eine Oberfläche von ~60–80 m². Die einzelne Alveole hat keinen einzelnen eigenen Bronchioli. Ungefähr 1500–4000 Alveolen bilden Alveolensäckchen, ein Azinus (Mehrzahl: Azini). Die Alveolen eines Azinus sind untereinander mit Öffnungen, den **Kohn-Poren**, verbunden.

Abb. 1.14 Modell einer Alveole. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)



Die eingeatmete Luft kann sich somit innerhalb dieser kleinen Einheit gleichmäßig verteilen.

Bezug zur künstlichen Beatmung

Bei der künstlichen Beatmung besteht durch die ungleichmäßige inspiratorische Luftverteilung das Problem, dass kleine Alveolen oft gar nicht belüftet bzw. minderbelüftet werden, während große und größere Alveolen überbläht werden. Eine mögliche Folge ist der Verlust von Gasaustauschfläche.

Die Alveolen sind ausgekleidet mit Lungenzellen, den Pneumozyten Typ I. Sie bilden die innere Wand der Alveolen, das Alveolarepithel (Abb. 1.14).

Zu den Pneumozyten Typ I gibt es den Pneumozyt Typ II. Dieser bildet das Surfactant, welches

- als dünner Film die innere Oberfläche der Alveolen auskleidet,
- die Oberflächenspannung herabsetzt und
- das Kollabieren der Alveolen verhindert.

Gäbe es kein Surfactant, müsste ein wesentlich höherer Druck für die Wiedereröffnung der Alveolen aufgewendet werden, bzw. in der Inspiration wäre eine größere Kraft der Atemmuskulatur erforderlich.

Das Surfactant bildet die Grenze zwischen Atemluft und Gewebe. Es wird schon intrauterin vom Fötus ab der 23. Schwangerschaftswoche produziert.

Surfactant besteht zu ca. 90 % aus Lipiden (Fetten), zu 10 % aus Proteinen (Eiweißen) und Kalziumionen.

Das Surfactant erfüllt folgende Funktionen:

- Erniedrigung der Oberflächenspannung des Flüssigkeitsfilms auf dem Alveolarepithel → antiatelektatische Funktion,
- Flüssigkeitstransport vom Alveolarraum ins Interstitium → antiödematöse Funktion,
- Flüssigkeits- und Sekrettransport in Richtung Trachea → Clearancefunktion,
- Interaktion mit Infektionserregern → direkte Abwehrfunktion,
- Regulation der intrapulmonalen Immunantwort → immunregulatorische Funktion,
- Schutz vor Sauerstoffradikalen, dies sind O_2 -Moleküle und Verbindungen mit Sauerstoff, die nicht zum Gasaustausch geeignet sind, sondern ggf. gewebstoxische Eigenschaften aufweisen.

Bezug zur künstlichen Beatmung

Damit das Surfactant seine Funktion vollständig erfüllen kann, ist es notwendig, dass die eingeatmete Luft bzw. die Beatmungsluft warm und feucht ist. Bei der normalen Atmung wird das durch die oberen Atemwege gewährleistet. Bei der künstlichen Beatmung muss das durch die aktiven oder passiven Befeuchtungssysteme erfolgen.

1.2.8 Lungengefäße

■ Vasa privata

Das Lungenparenchym und das Bronchialsystem werden selbst mit Blut, Sauerstoff und Nährstoffen aus der Bronchialarterie versorgt. Diese entspringt der Brustaorta oder einer Interkostalararterie. Dieses Blut ist am Gasaustausch nicht beteiligt.

■ Vasa publica

Das Blut, das vom rechten Herzen über die Pulmonalarterie in die Lunge gelangt, versorgt das Lungengewebe nicht mit Blut und Nährstoffen. Dieses Blut soll die Lungenstrombahn passieren, um mit Sauerstoff angereichert zu werden.

1.3 Atemhilfsmuskulatur

1.3.1 Inspiration

An der Inspiration sind beteiligt:

- das Zwerchfell,
- die äußere Rippenmuskulatur,
- Hebemuskeln sowie Atemhilfsmuskeln.

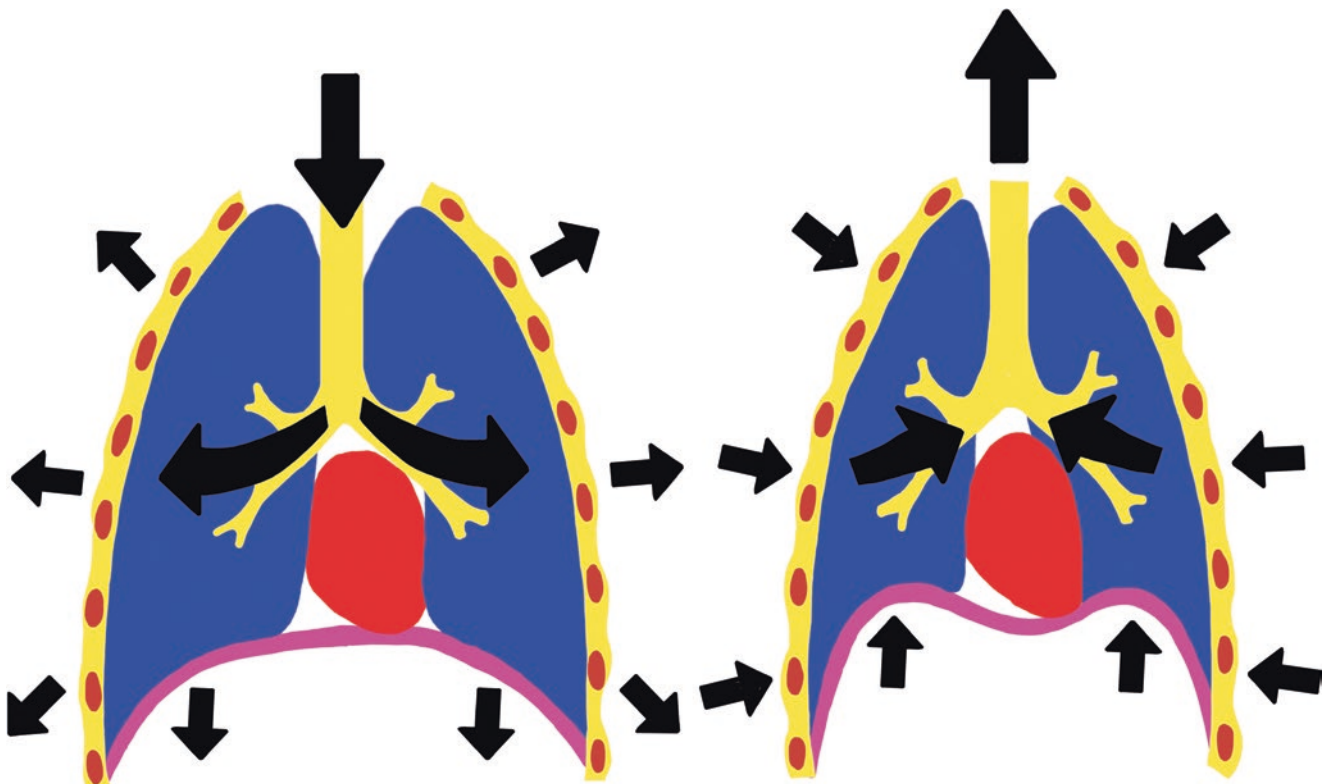
Das Zwerchfell senkt sich (■ Abb. 1.15). Circa 2/3 der Atemarbeit wird vom Zwerchfell geleistet. Die äußere Rippenmuskulatur kontrahiert und dabei wird der Thorax angehoben. Die

Luft strömt in die Lungen ein. Ein Halten der Inspiration (ist vergleichbar dem Plateau) erfolgt durch die Halsmuskeln. Weitere Hilfsmuskulatur zur Inspiration, die in der Lage ist, den Brustkorb während der Einatmung zu weiten sind: Mm. pectoralis major und minor, Mm. scaleni, Mm. sternocleidomastoideus.

Die gleichzeitige Muskelarbeit von Zwerchfell und äußerer Zwischenrippenmuskulatur bewirkt, dass sich die Lunge im Thorax gleichmäßig weitet und ausdehnt.

Das Zwerchfell bildet im nichtkontrahierten Zustand jeweils Kuppen unterhalb der beiden Lungenflügel. Die Kontraktion des Zwerchfells bewirkt, dass die Kuppen sich glätten. Damit bildet das kontrahierte Zwerchfell bei der Einatmung ein abgeflachtes Trapez. Dadurch werden die Abdominalorgane nach unten und nach vorne verdrängt. Daran erkennt man die „Bauchatmung“.

Das Zwerchfell zieht die Lungenflügel in die Länge. Es erfolgt eine gleichmäßige vertikale Dehnung. Die äußere Zwischenrippenmuskulatur dehnt den Brustkorb nahezu zirkulär. Der Brustkorb wird nach vorne, zur Seite und nach hinten hin angehoben. Die Lungenflügel werden dadurch gleichmäßig horizontal gedehnt. Durch die vertikale und die horizontale Dehnung entsteht ein leichter Unterdruck in der Lunge im Vergleich zur Außenluft und Atemluft strömt über die Atemwege in die Lunge ein. Im Prinzip „saugen“ wir bei der Einatmung Luft ein. Die Luft, die wir einatmen, kann sich durch die gleichmäßige Dehnung der Lunge auch gleichmäßig innerhalb der Lungen in alle Bereiche verteilen. So gibt es nahezu keine Bereiche der Lunge, die minderbelüftet sind.



■ Abb. 1.15 Zwerchfellkuppen bei In- und Expiration. (Mit freundlicher Genehmigung von Isabel Schlütter)

Bezug zur künstlichen Beatmung

Die künstliche Beatmung bewirkt keine gleichmäßige Dehnung der Lunge. Die durch Überdruck verabreichte Luft verteilt sich oft ungleichmäßig in den Lungenbereichen. Das bewirkt, dass einige Bereiche überdehnt, andere minder- oder gar nicht belüftet werden.

Die Oberkörperhochlagerung des Patienten auf 30–45° ermöglicht ein optimales Einsetzen der Atemhilfsmuskulatur. Assistierte Spontanatmung des Patienten bewirkt eine gleichmäßige Verteilung der Beatmungsluft in der Lunge.

- die innere Zwischenrippenmuskulatur,
- die schräge Brustmuskulatur und
- die gerade Bauchmuskulatur.

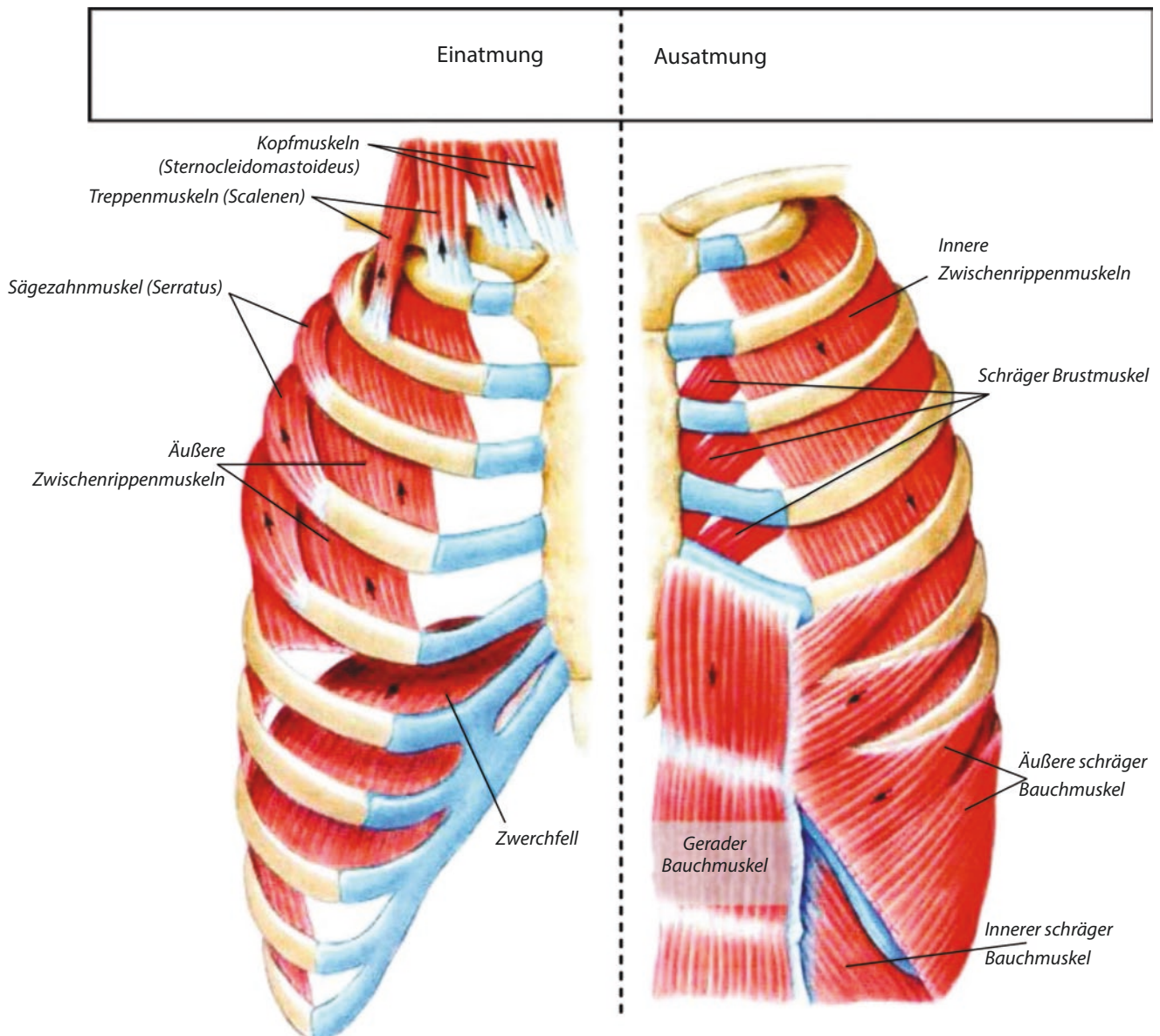
Ausatmung ist vorwiegend ein passiver Vorgang. Das kontrahierte Zwerchfell erschlafft und die Lungenflügel werden leicht zusammengestaucht. Die äußere Zwischenrippenmuskulatur erschlafft und die zirkuläre Dehnung wird zurückgenommen. Auch das führt zu einem Zusammenstauchen der Lunge.

Dadurch entsteht innerhalb der Lungen ein leichter Überdruck im Vergleich zur Außenluft. Dieser Überdruck wird abgebaut, Luft strömt leicht aus den Lungen heraus.

Atemarbeit ist ein energiesparsamer Vorgang. Nur 2–3 % des täglichen Energiebedarfs eines erwachsenen Menschen wird für Atemarbeit aufgebracht. Benötigt ein Mensch ca. 2000 kcal/Tag, so werden für die Atemarbeit

1.3.2 Expiration

An der Expiration beteiligte Muskulatur sind (■ Abb. 1.16):



■ Abb. 1.16 Ein- und Ausatemmuskeln. (Mit freundlicher Genehmigung der idiag ag, Fehraltorf, Schweiz)