

S. Schäfer F. Kirsch
G. Scheuermann R. Wagner

FACHPFLEGE

Beatmung

8. Auflage

Leseprobe



Urban & Fischer

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen aus Anatomie und Physiologie	1	2.4	Leitsymptome der respiratorischen Insuffizienz	40
1.1	Obere und untere Atemwege	2	2.4.1	Symptome der Hypoxämie	40
1.2	Lunge und Pleura	3	2.4.2	Symptome der Hyperkapnie	41
1.3	Atemmechanik	5	2.5	Diagnostik der respiratorischen Insuffizienz	41
1.3.1	Atemmuskulatur	5	2.5.1	Blutgasanalyse	41
1.3.2	Inspiration und Expiration	7	2.5.2	Veränderungen der Blutgasanalyse bei respiratorischer Insuffizienz	42
1.3.3	Lungenvolumina und -kapazitäten	8	2.5.3	Weitere Diagnostik bei respiratorischer Insuffizienz	43
1.3.4	Ventilation	9	2.6	Therapie der respiratorischen Insuffizienz	43
1.3.5	Atemwiderstände	10	2.6.1	Sauerstoffgabe	43
1.4	Gasaustausch	12	2.6.2	Weitere Behandlung	45
1.4.1	Diffusion	12	3	Freimachen und Freihalten der Atemwege, manuelle Beatmung	47
1.4.2	Perfusion	13	3.1	Maßnahmen zum Freimachen und Freihalten der oberen Atemwege	47
1.4.3	Ventilations-Perfusionsverhältnis	16	3.1.1	Obere Atemwege frei machen	47
1.5	Steuerung der Atmung	16	3.1.2	Pharyngealtuben	48
1.6	Atmung und Säure-Basen-Haushalt	18	3.2	Manuelle Beatmung	50
1.6.1	Regulationsmechanismen zur Konstanthaltung des Blut-pH	18	3.2.1	Beatmungsbeutel	50
1.6.2	Störungen des Säure-Basen-Gleichgewichts	19	3.2.2	Beatmungsmasken	52
2	Respiratorische Insuffizienz	25	3.2.3	Technik der manuellen Beatmung	53
2.1	Einteilung	25	4	Endotracheale Intubation und Extubation	57
2.2	Ursachen einer respiratorischen Insuffizienz	26	4.1	Indikationen zur endotrachealen Intubation	57
2.2.1	Ventilationsstörungen	26	4.2	Laryngoskope	58
2.2.2	Diffusionsstörungen	27	4.2.1	Konventionelle Laryngoskope	58
2.2.3	Perfusionsstörungen	28	4.2.2	Bullard-Laryngoskop®	60
2.2.4	Störungen des Ventilations-Perfusionsverhältnisses	28	4.2.3	Airtraq®-Laryngoskop	61
2.3	Respiratorische Insuffizienz: Häufige Erkrankungen von Lunge und Thorax	29	4.2.4	Videolaryngoskope	61
2.3.1	Pneumonie	30	4.3	Endotrachealtuben	62
2.3.2	COPD und Asthma bronchiale	31	4.3.1	Aufbau eines Endotrachealtubus	62
2.3.3	Thoraxtrauma	33	4.3.2	Blockerballon (Cuff)	64
2.3.4	Pneumothorax und Hämatothorax	34	4.3.3	Gebräuchliche Tubusarten und -formen	67
2.3.5	Lungenembolie	37			
2.3.6	ARDS	38			

4.4	Hilfsmittel zur Intubation	69	5.2	Punktionstracheotomie	103
4.4.1	Führungsstab	69	5.2.1	Vorbereitung der Punktionstracheotomie	103
4.4.2	Intubationszangen	70	5.2.2	Durchführung der Punktionstracheotomie	104
4.4.3	Medikamente zur Intubation	70	5.2.3	Vorteile und Nachteile der Punktionstracheotomie	105
4.5	Vorbereitung der Intubation	71	5.3	Konventionelle Tracheotomie	106
4.5.1	Vorbereitung des Materials	71	5.4	Koniotomie und Mini- Tracheotomie	107
4.5.2	Vorbereitung des Patienten	72	5.4.1	Koniotomie	107
4.6	Durchführung der oralen und nasalen Intubation	75	5.4.2	Mini-Tracheotomie	109
4.6.1	Orale Intubation	75	5.5	Komplikationen	109
4.6.2	Nasale Intubation	77	5.5.1	Komplikationen der Tracheotomie	109
4.7	Fiberoptische Intubation	78	5.5.2	Komplikationen bei liegender Trachealkanüle	109
4.7.1	Intubations-Bronchoskope	78	5.6	Trachealkanülenwechsel	111
4.7.2	Vorbereitung	79	5.6.1	Vorbereitung	111
4.7.3	Durchführung	79	5.6.2	Durchführung	112
4.8	Der schwierige Atemweg	82	5.7	Entfernen der Trachealkanüle	113
4.8.1	Vorgehen bei schwieriger Intubation	82	6	Maschinelle Beatmung	115
4.8.2	Hilfsmittel zur Sicherung der Atemwege bei schwieriger Intubation	84	6.1	Grundlagen der maschinellen Beatmung	115
4.9	Umintubation	89	6.1.1	Indikationen und Ziele der Beatmungstherapie	115
4.9.1	Vorbereitung	89	6.1.2	Beatmungstechnik	116
4.9.2	Durchführung	90	6.2	Beatmungsparameter	117
4.10	Intubation des nicht nüchternen Patienten	90	6.2.1	Ventilationszyklus	117
4.10.1	Vorbereitung	90	6.2.2	Inspirationsflow	120
4.10.2	Durchführung	91	6.2.3	Inspiratorische Sauerstoffkonzentration	121
4.11	Auswirkungen und Komplikationen der endotrachealen Intubation ..	91	6.2.4	PEEP	122
4.11.1	Frühkomplikationen	91	6.2.5	Trigger	124
4.11.2	Spätkomplikationen	93	6.3	Beatmungsformen	126
4.12	Extubation	93	6.3.1	Einteilung der Beatmungsformen ..	126
4.12.1	Voraussetzungen zur Extubation	93	6.3.2	Volumenkontrollierte Beatmung ..	132
4.12.2	Vorbereitung	94	6.3.3	Druckkontrollierte Beatmung	134
4.12.3	Durchführen der Extubation	94	6.3.4	BIPAP	138
4.12.4	Pflege des frisch extubierten Patienten	95	6.3.5	SIMV	140
4.12.5	Komplikationen bei und nach der Extubation	96	6.3.6	VC-MMV	143
5	Tracheotomie und Dekanülierung	99	6.3.7	Inspiratorische Druckunterstützung	144
5.1	Trachealkanülen	100	6.3.8	CPAP	149
5.1.1	Aufbau von Trachealkanülen	100	6.3.9	NAVA	151

6.3.10	Weitere Beatmungsformen und -strategien	152	6.10	Beatmungskurven, Loops und Trenddarstellungen	193
6.4	Nichtinvasive Beatmung	156	6.10.1	Beatmungskurven	193
6.4.1	Voraussetzungen zur nichtinvasiven Beatmung	156	6.10.2	Loops	195
6.4.2	Vorteile, Nachteile und Komplikationen der NIPPV	158	6.10.3	Trenddarstellungen	198
6.4.3	Möglichkeiten und Grenzen der nichtinvasiven Beatmung	159	6.11	Entwöhnung vom Respirator	198
6.4.4	Praxis der nichtinvasiven Beatmung	161	6.11.1	Weaning-Protokoll	198
6.5	Seitengetrennte Beatmung	163	6.11.2	Beurteilung der Entwöhnbarkeit ...	201
6.5.1	Indikationen zur seitengetrennten Beatmung	163	6.11.3	Weaning-Verfahren	201
6.5.2	Durchführung der seitengetrennten Beatmung	164	6.11.4	Schwerpunkte der Pflege bei Weaning	204
6.5.3	Pflege bei seitengetrennter Beatmung	166	7	Respiratoren	209
6.6	Atemgasklimatisierung	167	7.1	Aufbau und Einteilung von Respiratoren	209
6.6.1	Grundlagen der Atemgasklimatisierung	167	7.1.1	Aufbau eines Respirators	209
6.6.2	Aktive Befeuchtungssysteme	169	7.1.2	Einteilung von Respiratoren	211
6.6.3	Passive Befeuchtungssysteme	171	7.2	Kriterien für Anschaffung und Auswahl eines Respirators	212
6.7	Nebenwirkungen und Komplikationen der maschinellen Beatmung	173	7.3	Sonderfunktionen an Respiratoren	214
6.7.1	Nebenwirkungen und Komplikationen an der Lunge	173	7.3.1	Absaugroutine	214
6.7.2	Nebenwirkungen und Komplikationen an anderen Organen	176	7.3.2	Automatische Tubuskompensation	215
6.8	Beatmungsstrategien bei bestimmten Erkrankungen	179	7.3.3	Okklusionsdruck (P 0,1)	216
6.8.1	Beatmung bei ARDS	179	7.3.4	Rapid shallow breathing Index (RSBI)	217
6.8.2	Beatmung bei erhöhtem Hirndruck	181	7.3.5	Negativ inspiratory force Index (NIF)	217
6.8.3	Beatmung bei COPD und Asthma bronchiale	184	7.3.6	Open lung Tool	218
6.8.4	Beatmung bei Adipositas	185	7.4	Intensivrespiratoren	219
6.8.5	Beatmung von Palliativpatienten ...	186	7.4.1	Respiratoren der Firma Dräger Medical	219
6.9	Analgesie, Sedierung und Delirmanagement des beatmeten Patienten	187	7.4.2	Respiratoren der Firma GE Healthcare	223
6.9.1	Verwendete Medikamente	187	7.4.3	Respiratoren der Firma Hamilton Medical	224
6.9.2	Delirmanagement	189	7.4.4	Respiratoren der Firma MS Westfalia	226
6.9.3	Überwachung der Analgosedierung und Delir-Screening	190	7.4.5	Respiratoren der Firma Maquet ...	226
			7.4.6	Respiratoren der Firma Inspiration Healthcare	229
			7.4.7	Respiratoren der Firma Covidien ..	230
			7.4.8	Respiratoren der Firma Carefusion ..	231
			7.4.9	Respiratoren der Firma Salvia	232
			7.5	CPAP-Geräte	233

7.6	Notfall- und Transportbeatmungsgeräte	235	9.2.3	BGA, Pulsoxymetrie, Kapnometrie und elektrische Impedanztomografie	263
7.6.1	Transportrespiratoren der Firma Ambu	235	9.2.4	Klinische Überwachung der Beatmung	272
7.6.2	Transportrespiratoren der Firma Dräger Medical	236	9.2.5	Allgemeine Patientenüberwachung	274
7.6.3	Transportrespiratoren der Firma Hamilton Medical	237	9.2.6	Röntgenkontrolle des Thorax	274
7.6.4	Transportrespiratoren der Firma Weinmann	238	9.2.7	Dokumentation der Beatmungstherapie	275
7.7	Geräte zur High-flow-Sauerstofftherapie	240	9.3	Bewegungsförderung (Positionierung und Mobilisation)	277
8	Spezielle Behandlungsstrategien bei akutem Lungenversagen	243	9.3.1	Positionierung des beatmeten Patienten: Grundlagen	277
8.1	Lungenersatzverfahren	243	9.3.2	Allgemeine Maßnahmen vor, während und nach einem Positionswechsel	279
8.1.1	Indikationen und Kontraindikationen für extrakorporale Lungenersatzverfahren	243	9.3.3	Rücken-, Seiten- und sitzende Position	280
8.1.2	Kompletter Lungenersatz: ECMO und ECCO ₂ -R	244	9.3.4	Bauchlagerung	282
8.1.3	Teilweiser Lungenersatz (Lungenunterstützung)	247	9.3.5	Mobilisation des beatmeten Patienten	288
8.2	Surfactant-Applikation	250	9.4	Pflege bei oraler und nasaler Intubation	295
8.3	Inhalation von Vasodilatoren	251	9.4.1	Cuffdruckkontrolle	295
8.4	Inhalation von Heliox	252	9.4.2	Mundpflege bei oraler Intubation	297
8.5	Liquidventilation	252	9.4.3	Nasenpflege bei nasaler Intubation	300
8.6	Permissive Hyperkapnie	253	9.4.4	Tubeifixierung	301
9	Pflege des beatmeten Patienten	255	9.5	Pflege bei Tracheotomie	303
9.1	Auf- und Übernahme eines beatmeten Patienten	255	9.5.1	Cuffdruckkontrolle bei Trachealkanülen	304
9.1.1	Vorbereiten eines Beatmungsbettplatzes	255	9.5.2	Verbandswechsel am Tracheostoma	304
9.1.2	Aufnahme eines beatmeten Patienten	255	9.5.3	Lagekontrolle und Fixierung der Trachealkanüle	305
9.1.3	Übernahme eines beatmeten Patienten	258	9.5.4	Besonderheiten bei Laryngektomie	306
9.2	Überwachung des beatmeten Patienten	260	9.6	Maßnahmen zur Verbesserung des Schleimtransports	306
9.2.1	Kontrollen des Respirators und des Beatmungsschlauchsystems	260	9.6.1	Inhalationstherapie	306
9.2.2	Überwachen der Beatmungsparameter	260	9.6.2	Abklopfen und Vibrationsmassage	309
			9.6.3	Hustentechniken bei beatmeten Patienten	311
			9.6.4	Lagerungsdrainagen	311
			9.6.5	Kinetische Therapie	312

9.7	Bronchialtoilette	314	10.3	Geräte zur außerklinischen Beatmung	353
9.7.1	Indikationen zur Bronchialtoilette beim intubierten/tracheotomierten Patienten	315	10.3.1	Besonderheiten von Heimbeatmungsgeräten	353
9.7.2	Absaugkatheter	316	10.3.2	Geräte der Firma Breas	355
9.7.3	Allgemeine Maßnahmen vor, während und nach der Absaugung	317	10.3.3	Geräte der Firma Dräger Medical ...	356
9.7.4	Offene endotracheale Absaugung	318	10.3.4	Geräte der Firma Philips Respironics	356
9.7.5	Geschlossene endotracheale Absaugung	321	10.3.5	Geräte der Firma Covidien	357
9.7.6	Bronchoskopische Absaugung	323	10.3.6	Geräte der Firma ResMed	358
9.8	Überwachung beatmeter Patienten mit Thoraxdrainage	324	10.3.7	Geräte der Firma Weinmann	359
9.9	Kommunikation mit dem beatmeten Patienten und seinen Angehörigen	326	10.3.8	Geräte der Firma MPV-Truma	360
9.9.1	Mit dem beatmeten Patienten kommunizieren	326	11	Rechtliche Grundlagen und Leitlinien	361
9.9.2	Umgang mit Angehörigen	332	11.1	Medizinproduktegesetz und Medizinprodukte-Betreiberverordnung	362
9.10	Transport beatmeter Patienten	336	11.1.1	Medizinprodukte im Sinne des MPG	362
9.10.1	Vorbereitung des Transports	336	11.1.2	Begriffsdefinitionen zum MPG	362
9.10.2	Durchführung des Transports	340	11.1.3	Sachgerechte Handhabung von Medizinprodukten	364
9.11	Maßnahmen zur Infektionsprophylaxe	341	11.1.4	Medizinproduktebuch	364
9.11.1	Bakteriologisches Monitoring	341	11.1.5	Ordnungswidrigkeiten und Straftaten	365
9.11.2	Hygieneaspekte bei der Beatmungstherapie	343	11.1.6	Empfehlung zur Vorgehensweise bei „Vorkommissen“	365
10	Außerklinische Beatmung	345	11.2	Berufsgenossenschaftliche Vorschriften	366
10.1	Organisation der außerklinischen Beatmung	346	11.2.1	UVV für den Gesundheitsdienst ...	366
10.1.1	Voraussetzungen für eine außerklinische Beatmung	346	11.2.2	Umgang mit Sauerstoff	366
10.1.2	Einleitung der außerklinischen Beatmung	348	11.3	Hygienerichtlinien zur Beatmung ..	367
10.1.3	Entlassmanagement	349	11.3.1	Prävention der nosokomialen beatmungsassoziierten Pneumonie nach der RKI-Empfehlung	367
10.2	Durchführung der außerklinischen Beatmung	350	11.3.2	Hygieneplan	371
10.2.1	Maskenbeatmung	350	11.4	Leitlinien zur Intubation und Beatmung	371
10.2.2	Beatmung über ein Tracheostoma	351	11.4.1	Leitlinie nichtinvasive Beatmung als Therapie der akuten respiratorischen Insuffizienz	372
10.2.3	Überwachung der außerklinischen Beatmung	351	11.4.2	Leitlinie Lagerungstherapie und Frühmobilisation zur Prophylaxe oder Therapie von pulmonalen Funktionsstörungen	373
10.2.4	Weitere Betreuung	352			

XVIII Inhaltsverzeichnis

11.4.3	Leitlinie nichtinvasive und invasive Beatmung als Therapie der chronischen respiratorischen Insuffizienz	373
11.4.4	Leitlinie Analgesie, Sedierung und Delirmanagement in der Intensivmedizin	374
11.4.5	Leitlinie Prolongiertes Weaning	374
	Literaturverzeichnis	375
	Register	377

1 Grundlagen aus Anatomie und Physiologie

DEFINITION

Atmung: Gasaustausch zwischen Organismus und äußerer Umgebung. Unterschieden in:

- **Äußere Atmung**, d.h. Gasaustausch zwischen Umgebung und Blut über die Lungen: Sauerstoff wird ins Blut aufgenommen, Kohlendioxid in die Ausatemluft abgegeben
- **Innere Atmung (Zellatmung):** Gasaustausch zwischen Blut und Körperzellen. Nährstoffe werden in der Zelle mit Hilfe von Sauerstoff zu CO₂ und Wasser abgebaut (aerober Stoffwechsel), um Energie zu gewinnen.

Zum **Atmungssystem** (*respiratorisches System*) gehören alle anatomischen Strukturen des Körpers, die an der Atmung beteiligt sind, also neben Atemwegen und Lunge auch Teile des zentralen Nervensystems, z. B. die Medulla oblongata (verlängertes Mark, Sitz des Atemzentrums) und Nerven (etwa der N. phrenicus oder die Interkostalnerven), sowie Muskeln, z. B. das Zwerchfell oder die Interkostalmuskulatur.

Als **Respirationstrakt** wird die Gesamtheit von Atemwegen und Lunge bezeichnet (> Abb. 1.1).

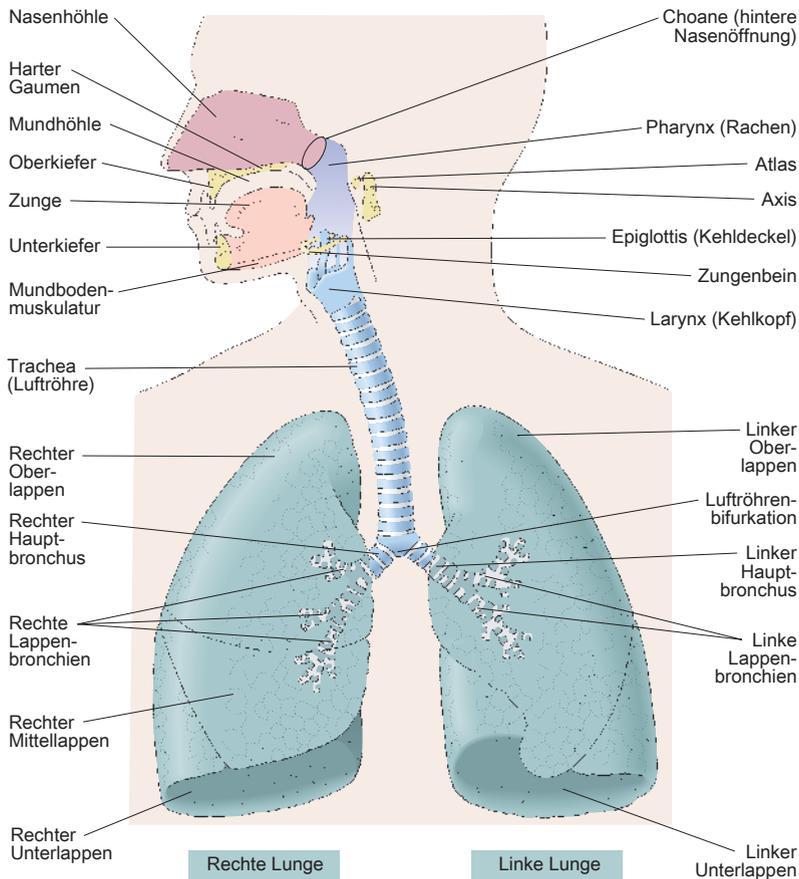


Abb. 1.1 Übersicht über den **Respirationstrakt**, d. h. die Gesamtheit von Atemwegen und Lunge. [L190]

1.1 Obere und untere Atemwege

Die **oberen Atemwege** beginnen an den beiden Nasenlöchern und umfassen die Nasenhöhle, den *Pharynx* (Rachen) und den *Larynx* (Kehlkopf). Die Nasenhöhle ist mit gefäßreicher Schleimhaut ausgekleidet, die bei Verletzungen stark bluten kann. Dies ist insbesondere bei der nasalen Intubation von Bedeutung (> 4.6.2). Unterhalb des Larynx beginnen die **unteren Atemwege**, zu denen die Trachea, die Bronchien und die Bronchiolen gehören. Weil die unteren Atemwege einer Baumkrone ähnlich sind, werden sie auch als *Tracheobronchialbaum* bezeichnet.

Pharynx

Der **Pharynx** (*Rachen*) liegt hinter Nasen- bzw. Mundhöhle und ist nach oben von der Schädelbasis und nach unten vom Ösophagus (Speiseröhre) bzw. der Trachea (Luftröhre) begrenzt. Der Pharynx gliedert sich in drei Abschnitte: den Naso-, den Oro- und den Laryngopharynx (> Abb. 1.2).

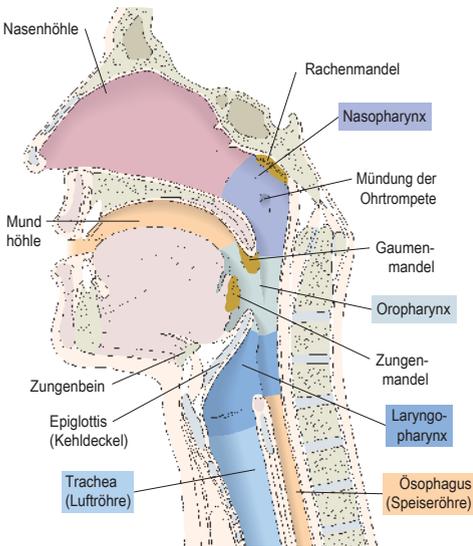


Abb. 1.2 Die drei Abschnitte des Pharynx: Naso-, Oro- und Laryngopharynx. [L190]

Larynx

Der **Larynx** (*Kehlkopf*) erfüllt zwei wichtige Funktionen:

- Im Larynx kreuzen sich Luft- und Speiseweg. Die am Kehlkopfeingang lokalisierte *Epiglottis* (Kehledeckel) legt sich beim Schlucken über den Kehlkopfeingang und verschließt ihn dadurch. Damit wird gewährleistet, dass Speisebrei vom Rachen in den *Ösophagus* (Speiseröhre) gelangt und nicht in die unteren Luftwege.
- Im Larynx erfolgt die **Stimmbildung**. Die Larynxschleimhaut bildet zwei waagrecht übereinanderliegende Faltenpaare: die oben liegenden Taschenfalten und die darunter liegenden *Stimmklappen*. Die Stimmklappen enthalten die *Stimmbänder* und *Stimmuskeln*. Als *Stimmritze* wird die Öffnung zwischen den Stimmklappen bezeichnet. Abhängig von der Stellung und Spannung der Stimmklappen entstehen Töne mit unterschiedlicher Frequenz. Der gesamte Stimmapparat, manchmal aber auch nur die Stimmritze, wird als *Glottis* bezeichnet.

PFLEGEPRAXIS

Kommunikation bei endotrachealer Intubation

Bei oro- oder nasotrachealer Intubation (> 4.6.1 und > 4.6.2) liegt der Tubus in der Stimmritze. Die betroffenen Patienten können daher **nicht sprechen**. Erwacht ein intubierter Patient erstmals (z. B. nach einem Unfallereignis) und bemerkt, dass er nicht sprechen kann, beruhigt ihn dies oft ausgesprochen stark. Dann ist es wichtig, dass die Pflegenden ihm erklären, dass dies am Tubus liegt und nur vorübergehend so sein wird. Gegebenenfalls bieten die Pflegenden dem Patienten ein seinen Fähigkeiten angemessenes Kommunikationshilfsmittel an, z. B. eine Schreibröhre (> 9.9.1). Tracheotomierte Patienten können mithilfe spezieller Trachealkanülen bzw. Kanülenaufsätze sprechen (> 5.1).

WICHTIG

Schluck- und Hustenreflex

Auslöser des **Schluckreflexes** ist die Reizung im Bereich von Gaumenbögen, Zungengrund und hinterer Rachenwand. Der Reiz wird an das im Hirnstamm gelegene Schluckzentrum geleitet. Dessen Erregung bewirkt:

- Aussetzen der Atmung während des Schluckens
- Anheben des Gaumensegels und Kontraktion der Rachenwand → Abdichten des Nasen-Rachenraums

- Anheben des Kehlkopfs → Epiglottis legt sich auf den Larynxeingang und dichtet diesen ab
- Aktivierung der Rachenmuskulatur → von oben nach unten durchlaufende peristaltische Kontraktion.

Auslöser des **Hustenreflexes** ist eine Reizung der Schleimhaut, besonders im Bereich von Pharynx, Larynx, Trachea und großen Bronchien, z.B. durch Fremdkörper oder Schleimansammlungen. Dies bewirkt einen reflektorischen Verschluss der Stimmritze mit nachfolgender explosionsartiger Ausatmung, die die Stimmritze öffnet und den Fremdkörper Richtung Mund/Rachen befördert.

Sowohl Schluck- als auch Hustenreflex sind **Schutzreflexe**, die dazu dienen, das Eindringen von Fremdkörpern in die Atemwege zu verhindern bzw. bereits in den Atemwegen befindliche Fremdkörper (z.B. Sekret) aus den Atemwegen heraus zu befördern. Patienten mit verzögertem oder fehlendem Schluck- und/oder Hustenreflex sind besonders Aspirationsgefährdet! (Aspiration von Mageninhalt > 4.11.1).

Laryngospasmus, Glottisödem > 4.12.5

Trachea und Bronchien

Die **Trachea** (*Luftröhre*) beginnt unterhalb des Larynx. Sie ist ca. 10–12 cm lang und aus 16–20 hinten offenen Knorpelspangen aufgebaut, deren Enden durch Bindegewebsmembranen mit Muskelzügen verbunden sind. Untereinander sind die Knorpelspangen durch Bänder verbunden, das Lumen der Trachea ist mit Schleimhaut ausgekleidet. An ihrem unteren Ende gabelt sich die Trachea in den rechten und linken **Hauptbronchus**. Diese Teilungsstelle (*Bifurcatio tracheae*, auch kurz **Bifurkation** genannt) liegt ungefähr auf Höhe des 4. Brustwirbelkörpers. Zwischen den Abgängen der beiden Hauptbronchien liegt die **Carina**, ein keilartig nach innen ragendes Knorpelstück, das insbesondere bei der Bronchoskopie (> 9.7.6) gut sichtbar ist.

Die Hauptbronchien zweigen sich jeweils wenige Zentimeter hinter der Bifurkation weiter auf in die **Lappenbronchien** und diese wiederum in die **Segmentbronchien**. So entstehen vergleichbar den Ästen eines Baums (daher auch die Bezeichnung *Tracheobronchialbaum*) immer kleinere **Bronchien** und schließlich **Bronchiolen**, an deren Ende sich die **Alveolen** (Lungenbläschen) befinden. Während die Wand der Hauptbronchien noch ähnlich aufgebaut ist wie die Trachea (mit Knorpelspangen, Schleimhaut, Flimmerepithel und bindegewebig muskulärer

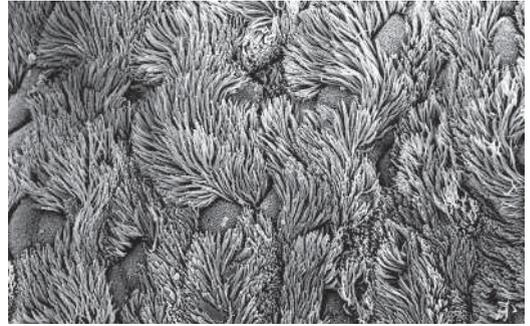


Abb. 1.3 Das Flimmerepithel gleicht einem wogenden Getreidefeld: Kleinste Partikel werden durch die Bewegungen der Zilien Richtung Rachen transportiert. [M375]

Rückwand), wird die Form der Knorpelspangen ab den Lappenbronchien unregelmäßig. In den tiefer gelegenen Bronchien finden sich statt Knorpelspangen nur noch Knorpelplatten. Die Bronchiolen schließlich haben keine knorpeligen Stützstrukturen mehr. Stattdessen findet sich in der Wand der Bronchiolen reichlich glatte Muskulatur.

WICHTIG

Mukoziliäre Clearance

Die Atemwege sind an ihrer Oberfläche von **Flimmerepithel**, d. h. dicht aneinanderliegenden, feinsten und hochbeweglichen Härchen (Zilien), überzogen, die sich rhythmisch Richtung Rachen bewegen (> Abb. 1.3). Das Flimmerepithel ist von schleimbildenden Becherzellen durchsetzt. Diese bilden täglich ca. 100 ml sterilen, farblosen und viskösen Schleim (bei bakteriellen Infektionen ist der Schleim zäher und evtl. eitrig). An diesem Schleim bleiben auch feinste Staubpartikel „kleben“. Durch die Bewegungen der Zilien transportiert das Flimmerepithel Schleim samt Partikeln Richtung Rachen, von wo aus er verschluckt oder ausgespuckt wird. Dieser Selbstreinigungsmechanismus wird als **mukoziliäre Clearance** (MCC) bezeichnet.

1.2 Lunge und Pleura

Die beiden Lungenflügel füllen den Brustkorb nahezu vollständig aus. Lediglich das Herz, die großen Gefäße und der Ösophagus sind zwischen den Lungenflügeln im **Mediastinum** (*Mittelfellraum*) eingebettet.

Die Hauptbronchien und die Lungengefäße treten am **Lungenhilus** (*Lungenhilum*), der an der Innenseite des Lungenflügels liegt, in die Lungen ein (➤ Abb. 1.4).

An ihrem unteren Ende liegen die Lungenflügel unmittelbar dem **Zwerchfell** (*Diaphragma*) auf. Oben reichen die Lungenspitzen jeweils bis in die Schlüsselbeingrube. Vorne, seitlich und hinten liegen die Lungenflügel dicht an den Rippen. Die Innenflächen der Lungenflügel begrenzen das Mediastinum. Wegen der Lage des Herzens zur linken Brustkorbseite hin ist der linke Lungenflügel etwa ein Viertel kleiner als der rechte.

Lungenlappen und Lungensegmente

Die Lungenflügel bestehen aus insgesamt 5 **Lungenlappen** (Ober-, Mittel- und Unterlappen rechts, Ober- und Unterlappen links). Die einzelnen Lungenlappen unterteilen sich weiter in **Lungensegmente** (➤ Abb. 1.4), die jeweils eine Funktionseinheit darstellen, d. h. jedes Lungensegment verfügt über einen Segmentbronchus sowie eine Arterie und eine Vene. Aufgrund dieses anatomischen Aufbaus ist es möglich, einzelne Lungensegmente chirurgisch zu entfernen, ohne das umliegende Lungengewebe zu schädigen.

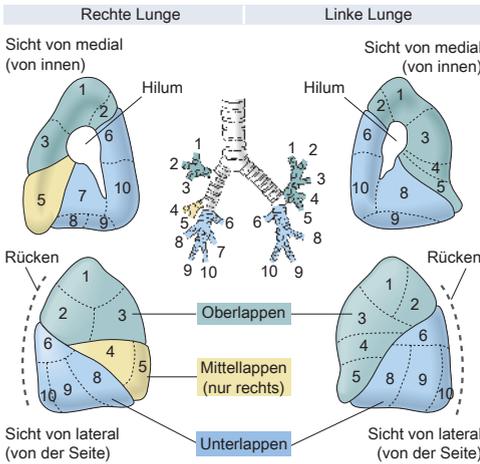


Abb. 1.4 Lungenlappen und -segmente mit den zugehörigen Segmentbronchien, oben in der Sicht von medial, unten von lateral. [L190]

Alveolen und alveolokapilläre Membran

An ihren Enden gehen die feinsten Bronchiolen in die Alveolargänge über, um die herum traubenförmig dicht beieinander die einseitig offenen **Alveolen** (*Lungenbläschen*) liegen. Die Wände der Alveolen sind hauchzart und von einem Netz feinsten Kapillaren des Lungenkreislaufs umspannen (➤ Abb. 1.5).

In den Alveolen sind Luft und Blut nur durch die sehr dünne **alveolokapilläre Membran** getrennt. Sie besteht aus dem Alveolarepithel, der Basalmembran und dem Kapillarendothel. An der alveolokapillären Membran findet der **Gasaustausch** statt: Sauerstoff diffundiert aus den Alveolen in die Kapillaren, Kohlendioxid diffundiert aus den Kapillaren in die Alveolen (➤ Abb. 1.9).

Durch den bläschenartigen Aufbau der Alveolen entsteht eine enorm große innere Oberfläche, die **Gasaustauschfläche**, die sich beim Erwachsenen auf etwa 100 m² ausdehnt (➤ 1.4.1).

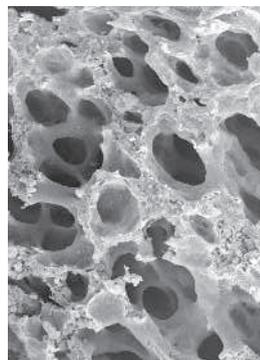
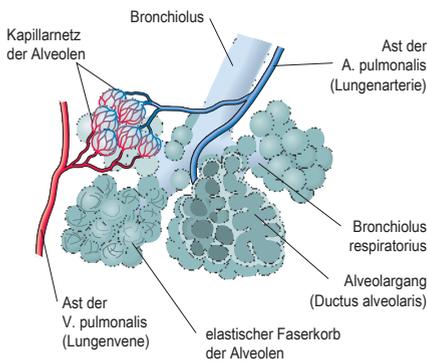


Abb. 1.5 Alveolargänge und Alveolen. Jede Alveole ist von einem Netz feinsten Kapillaren umspannen (links Schemazeichnung, rechts elektronenmikroskopische Aufnahme). [L190, X243]

WICHTIG**Surfactant**

Die Alveolaroberfläche ist mit einem hauchdünnen Lipoproteinfilm, dem **Surfactant** (*Surface active agent*, auch *Antiatelektasenfaktor* oder *Oberflächenfaktor*) überzogen, der in der Lunge selbst gebildet und auf die Alveolaroberfläche abgegeben wird. Der Surfactant reduziert die Oberflächenspannung, wodurch die Alveolen während der Einatmung leichter gedehnt werden können, und verhindert ein Kollabieren der Alveolen insbesondere während der Expiration.

Die Wirkung des Surfactant ist in kleineren Alveolen stärker als in größeren, dadurch entfalten sie sich vom Beginn der Einatmung (Dehnung) an leichter.

Ohne Surfactant wären die kleinen Alveolen viel schlechter belüftet als die größeren, d.h. es würde wesentlich weniger Gasaustauschfläche zur Verfügung stehen. Zudem würden die Alveolen v.a. während der Expiration kollabieren.

Die Halbwertszeit von Surfactant liegt bei ca. 12–24 Std. Rauchen vermindert die Surfactant-Bildung. Eine längerdauernde hohe Sauerstoffkonzentration führt – neben anderen negativen Auswirkungen – zu einer Schädigung des Surfactant (Sauerstofftoxizität > 6.2.3).

Zusammen mit den elastischen Fasern, welche die Alveolen netzartig umgeben, bestimmt der Surfactant wesentlich die **Compliance** (Volumendehnbarkeit) der Lunge (> 1.3.5).

Surfactant-Applikation > 8.2

Pleura

Jeder Lungenflügel ist von der *Pleura visceralis* (Lungenfell) überzogen, die, nur durch den *Pleuraspalt* getrennt, der *Pleura parietalis* (Rippfell) anliegt, die die Brusthöhle auskleidet und sowohl Zwerchfell als auch Mediastinum bedeckt. Beide Pleurablätter werden zusammen als **Pleura** bezeichnet.

Im Pleuraspalt befinden sich wenige Milliliter seröse Flüssigkeit. Dadurch können die Pleurablätter und mit ihnen die beiden Lungenflügel reibungslos im Brustkorb gleiten.

PFLEGEPRACTIS**Pleuritis und Pleuraerguss**

Eine **Pleuritis** (Entzündung der Pleurablätter, häufig Folge einer *Pneumonie* > 2.3.1) vermindert die Gleitfähigkeit der Pleura. Die Pleurablätter reiben dann aneinander, wodurch die Interkostalnerven gereizt und die Atmung extrem schmerzhaft werden kann.

Beim **Pleuraerguss** (z. B. infolge einer lokalen Entzündung, einer Linksherzinsuffizienz oder als Begleitreaktion bei Lungen- oder Pleuratumoren) sammelt sich Flüssigkeit im Pleuraspalt. Je größer das Ergussvolumen ist, desto stärker ist die Ausdehnung der Lunge und damit die Atmung eingeschränkt. Evtl. ist dann eine Pleurapunktion erforderlich, um die überschüssige Flüssigkeit abzusaugen.

Im Pleuraspalt herrscht normalerweise ein leichter Unterdruck von -4 bis -8 mbar, der atemabhängig schwankt. Gelangt Luft in den Pleuraspalt (*Pneumothorax*, z. B. durch die Ruptur einzelner Alveolen oder durch eine Verletzung, > 2.3.4) wird dieser Unterdruck aufgehoben; der betroffene Lungenflügel kollabiert aufgrund seiner Eigenelastizität und kann nicht mehr am Gasaustausch teilnehmen.

1.3 Atemmechanik**DEFINITION**

Atemmechanik: Gesamtheit aller *Vorgänge*, die der Organismus nutzt, um die Lunge zu ventilieren (belüften). Die Strukturen, die die Ventilation der Lunge ermöglichen – vor allem Atemmuskulatur und knöcherner Thorax – werden zusammen genommen als **Atempumppe** bezeichnet.

Die Lungen sind elastisch und nicht aktiv beweglich. Um ein Ein- bzw. Ausströmen von Luft während der Atmung zu erreichen, müssen sich die **Druckverhältnisse** in der Lunge ändern. Dies geschieht durch Bewegungen des Thorax und des Zwerchfells.

1.3.1 Atemmuskulatur**Hauptatemmuskeln**

Zu den **Hauptatemmuskeln** gehören das Zwerchfell sowie Zwischenrippenmuskeln.

Das **Zwerchfell** (*Diaphragma*) ist eine nach oben gewölbte Muskelplatte, die Thorax- und Bauchraum voneinander trennt. Die Zwerchfellmuskeln entspringen vorn am Schwertfortsatz des Sternums, seitlich an den sechs unteren Rippen und hinten an

der Lendenwirbelsäule. In der Mitte des Zwerchfells befindet sich eine sehnige Platte, an der die Zwerchfellmuskeln ansetzen. Innerviert wird das Zwerchfell vom N. phrenikus, einem Ast des Plexus cervicalis, der aus dem 3. -5. Halssegment entspringt.

Die äußeren und inneren **Zwischenrippenmuskeln** (*Mm. intercostales externi und interni*) liegen jeweils zwischen benachbarten Rippen. Die äußeren Zwischenrippenmuskeln verlaufen im Bereich der hinteren und seitlichen Brustwand, die inneren Zwischenrippenmuskeln im Bereich der seitlichen und vorderen Brustwand. Der Faserverlauf der äußeren Zwischenrippenmuskeln ist dem der inneren Zwischenrippenmuskeln entgegengesetzt (> Abb. 1.7).

Atemhilfsmuskulatur

Als **Atemhilfsmuskulatur** (*auxilliäre Muskulatur* > Abb. 1.6) wird eine Gruppe von Hals-, Brust- und Bauchmuskeln bezeichnet, die normalerweise andere Funktionen erfüllen, im Bedarfsfall aber die Hauptatemmuskeln *unterstützen* können, z.B. bei starker Atemnot. Im klinischen Alltag sind vor allem die *inspiratorischen Atemhilfsmuskeln* von Bedeutung. Dazu gehören v.a.:

- M. sternocleidomastoideus (Kopfwender)
- M. pectoralis major und minor (großer und kleiner Brustmuskel)
- Mm. scaleni (*Treppenmuskeln*, die von der HWS zu den beiden oberen Rippen ziehen)
- Mm. serrati posterior superior und anterior.

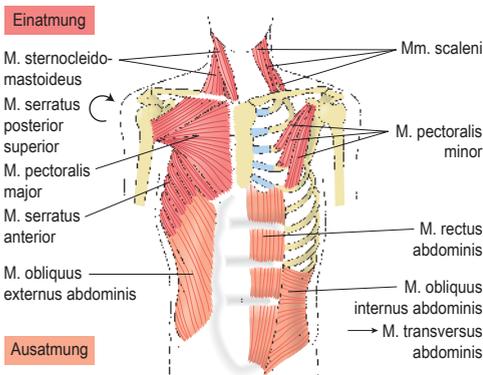


Abb. 1.6 Die wichtigsten Atemhilfsmuskeln. C Muskel liegt am Rücken. [L190]

Damit die Atemhilfsmuskeln optimal wirken, sollte der Patient eine Körperhaltung einnehmen, die Menschen mit schwerer Atemnot meist ohnehin einnehmen: Sitzend, seitlich mit den Armen abgestützt und vornüber gebeugt. In diesem sogenannten **Kutschersitz** ist der *M. pectoralis major* der stärkste Atemhilfsmuskel.

Eine forcierte, durch die Atemhilfsmuskulatur unterstützte Atmung, die bei starker Atemnot des Patienten zu beobachten ist, wird als **Auxiliaratmung** bezeichnet.

Atemarbeit

DEFINITION

Atemarbeit (*Work of breathing*, kurz **WOB**, auch *Respiratory working*): von der Atemmuskulatur geleistete Arbeit, die erforderlich ist, um Atemwegswiderstände zu überwinden und die zur Inspiration benötigte Druckdifferenz zwischen Lunge und Umgebungsdruck aufzubauen.

Unter **Spontanatmung** wird die Atemarbeit von zwei Komponenten bestimmt: den *elastischen Widerständen* (Kräfte, die der Lungenexpansion entgegenwirken, **Compliance**) und den *resistiven (viskösen) Widerständen* (Strömungswiderstände in den Atemwegen, **Resistance**). Beide sind normalerweise nur während der Inspiration wirksam, da die Expiration passiv erfolgt. In manchen Fällen müssen aber auch während der Expiration Widerstände überwunden werden, z. B. bei forcierter Expiration.

Beim **intubierten bzw. tracheotomierten Patienten** erhöhen verschiedene Faktoren die Atemarbeit **zusätzlich** (Ausnahme: Kontrolliert beatmete Patienten; hier übernimmt der Respirator die gesamte Atemarbeit):

- Endotrachealtubus bzw. Trachealkanüle bewirken zusätzliche Strömungswiderstände, d. h. sie erhöhen die Resistance (> 1.3.5, automatische Tubuskompensation > 7.3.2).
- Baut sich unter der Beatmung ein Intrinsic-PEEP auf (> 6.2.4), muss auch dieser überwunden werden.

Die Erhöhung der Atemarbeit beim intubierten bzw. tracheotomierten Patienten ist insbesondere während der Entwöhnung (*Weaning*, > 6.11) bedeutsam.

VORSICHT!**Respiratorische Erschöpfung**

Kann ein Patient die erforderliche Atemarbeit nicht mehr leisten, kommt es zur **respiratorischen Erschöpfung**, d. h. die Atemmuskulatur kann die Pumpleistung nicht mehr erbringen, die für eine ausreichende alveoläre Ventilation notwendig ist (daher auch die Bezeichnung *pulmonales Pumpversagen*). In der Blutgasanalyse finden sich die Zeichen einer respiratorischen Globalinsuffizienz (> 2.1). In dieser Situation muss dem Patienten die Atemarbeit ganz oder teilweise durch einen Respirator abgenommen werden, bis sich die ursächliche Erkrankung gebessert hat.

1.3.2 Inspiration und Expiration

Zu Beginn der **Inspiration** sind der Druck in der Lunge (*intrapulmonaler Druck*) und der Atmosphärendruck (Druck der Umgebungsluft) identisch, d. h. der intrapulmonale Druck liegt bei null (der intrapulmonale Druck bezieht sich immer auf den Atmosphärendruck). Die **Inspiration** beginnt mit der Kontraktion der Inspirationsmuskeln, vor allem des Zwerchfells, aber auch der äußeren Interkostalmuskeln. Dadurch weitet sich der Brustkorb und mit ihm die Lunge ($>$ Abb. 1.7). In der Folge sinkt der intrapulmonale Druck etwas unter den Atmosphärendruck ab, was dazu führt, dass Luft in die Lunge einströmt. Die Inspiration endet, sobald sich die Inspirationsmuskeln nicht mehr weiter kontrahieren. Dann strömt keine Luft mehr in die Lunge, der intrapulmonale Druck und der Druck der Umgebungsluft sind wieder gleich.

Die **Expiration** beginnt damit, dass die Inspirationsmuskeln erschlaffen. Aufgrund ihrer Eigenelastizität ziehen sich Lunge und Brustkorb zusammen, dadurch steigt der intrapulmonale Druck über den Atmosphärendruck an und die Luft strömt infolge dessen aus der Lunge. Unterstützend können die inneren Zwischenrippenmuskeln kontrahieren. Am Ende der Expiration fällt der intrapulmonale Druck wieder auf den Atmosphärendruck ab.

Während die Inspiration ein *aktiver* Vorgang ist, erfolgt die Expiration weitgehend *passiv*, d. h. ohne nennenswerte Muskelarbeit.

Bauch- und Brustatmung

Bei der **Bauchatmung** (auch *abdominale Atmung* oder *Zwerchfellatmung*) erfolgt die Inspiration über-

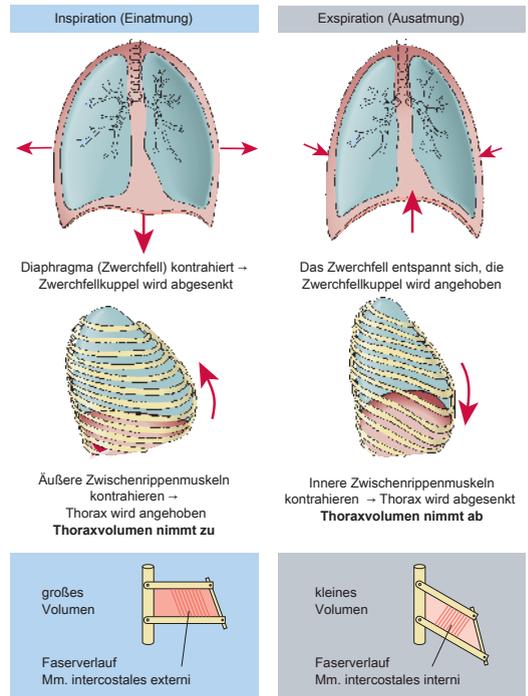


Abb. 1.7 Mechanik der In- und Expiration bei Spontanatmung. Durch die Kontraktion von Zwerchfell und äußeren Zwischenrippenmuskeln weitet sich der Brustkorb und mit ihm die Lunge: Es entsteht ein Druckgefälle, wodurch frische Luft in die Lunge strömt. Durch die Entspannung des Zwerchfells und die Kontraktion der inneren Zwischenrippenmuskeln wird der Brustraum wieder enger: Die sauerstoffarme, mit Kohlendioxid angereicherte Luft strömt nach außen. [L190]

wiegend durch die Kontraktion des Zwerchfells, bei der **Brustatmung** (auch *thorakale* oder *Kostalatmung*) kommt die Inspiration vor allem durch die Kontraktion der äußeren Interkostalmuskeln zustande.

Bei Kindern und Männern ist überwiegend eine Bauchatmung, bei Frauen überwiegend eine Brustatmung zu beobachten.

PFLEGEPRAXIS**Schonatmung**

Bei starken Schmerzen im Bauch- oder Brustraum, etwa nach Verletzungen oder operativen Eingriffen, ist bei den Betroffenen oft eine Brustatmung (bei Schmerzen im Bauchraum) oder eine Bauchatmung (bei Schmerzen im Brustraum) als **Schonatmung** zu beobachten.

1.3.3 Lungenvolumina und -kapazitäten

DEFINITION

Lungenvolumina: Verschiedene Rauminhalte von Lungen und Atemwegen im Verlauf von In- und Expiration.
Lungenkapazitäten: Kombinationen verschiedener Lungenvolumina.

Bei gesunden Erwachsenen füllt sich der Respirationstrakt während der Einatmung mit ca. 400–500 ml Luft (**Atemzugvolumen**, Menge v.a. abhängig von Aktivität, Geschlecht, Alter, Körpergröße und Körperbau). In Ruhe atmet ein gesunder Erwachsener ca. 14–16 mal pro Minute ein und aus, d.h. seine **Atemfrequenz** liegt bei ca. 15/Min. Daraus ergibt sich ein **Atemminutenvolumen** (AMV) von ca. 7,5 l/Min.

Nach einer normalen Einatmung kann ein gesunder Erwachsener zusätzlich ca. 2–3 l pro Atemzug einatmen (**inspiratorisches Reservevolumen, IRV**) bzw. nach normaler Ausatmung ca. 1,2 l zusätzlich ausatmen (**expiratorisches Reservevolumen, ERV**). Atemzugvolumen, inspiratorisches und expiratorisches Reservevolumen ergeben zusammen die **Vitalkapazität (VC)**.

Auch nach größtmöglicher Ausatmung bleibt noch Luft in der Lunge zurück (**Residualvolumen, RV**). Die nach normaler Ausatmung in der Lunge verbleibende Luftmenge heißt **funktionelle Residualkapazität (FRC)**. Sie ist maßgeblich für den Gasaustausch während der Expiration. Die Wirkung des PEEP (> 6.2.4), der bei praktisch jeder Beatmungstherapie zum Einsatz kommt, beruht auf der Erhöhung dieses Luftvolumens.

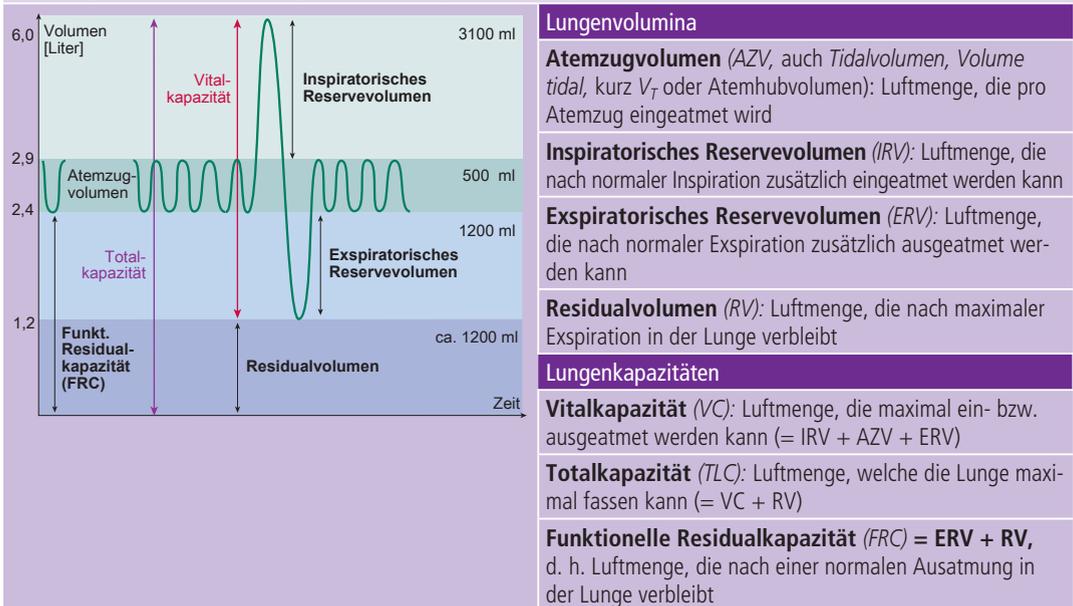
Der maximal mögliche Luftgehalt der Lunge wird als **Vitalkapazität** bezeichnet.

Die einzelnen statischen Lungenvolumina werden – mit Ausnahme des Residualvolumens – während langsamer Atmung spirometrisch gemessen.

Dynamische Lungenvolumina werden bei forcierter, d. h. schnellstmöglicher Ausatmung nach maximaler Einatmung, gemessen:

- Forcierte Vitalkapazität (FVC): Luftmenge, die nach maximaler Einatmung schnellstmöglich ausgeatmet werden kann
- Expiratorische Einsekundenkapazität (forciertes expiratorisches Volumen, kurz FEV₁): Luftmenge, die bei forcierter Ausatmung während der ersten Sekunde ausgeatmet wird
- Der Tiffeneau-Wert ist eine errechnete Größe aus FEV₁/FVC.

Tab. 1.1 Lungenvolumina und -kapazitäten sind abhängig von Alter, Geschlecht, Körpergröße und Körpergewicht. Die hier genannten Richtwerte gelten für einen gesunden jungen Mann). [Bild: L190]



1.3.4 Ventilation

DEFINITION

Ventilation: Belüftung des Respirationstrakts bei der Atmung. Abhängig von der Beteiligung am Gasaustausch unterschieden in *Totraumventilation* und *alveoläre Ventilation*.

Totraum

Bei jeder Inspiration füllt sich die Lunge mit frischer Luft, bei Erwachsenen in Ruhe mit etwa 400–500 ml (V_T ca. 7 ml/kg KG). Nur etwa $\frac{2}{3}$ dieser Luftmenge gelangen in die Alveolen und damit an die Luft-Blut-Schranke, wo der Gasaustausch stattfindet. Der Rest verbleibt in den Atemwegen (Nase, Rachen, Trachea, Bronchien), ohne die Alveolen zu erreichen, d.h. diese Luftmenge nimmt nicht am Gasaustausch teil. Dieser Anteil der Atemluft wird als **anatomischer Totraum** bezeichnet. Der anatomische Totraum beträgt normalerweise etwa 2 ml/kg KG, d.h. bei einem 75 kg schweren Erwachsenen liegt er bei ca. 150 ml.

Pathologische Zustände, etwa eine Lungenembolie, können dazu führen, dass Alveolarbereiche zwar belüftet (ventiliert), aber nicht durchblutet (perfundiert) werden. Die in diesen Alveolarbereich eingeatmete Luftmenge kann ebenfalls nicht am Gasaustausch teilnehmen, da keine Diffusion stattfinden kann, und wird als **alveolärer Totraum** bezeichnet.

WICHTIG

Funktioneller Totraum

Anatomischer und alveolärer Totraum ergeben zusammen den **funktionellen** (physiologischen) **Totraum** (*Volume deadspace, VD*).

Alveoläre Ventilation

Die **alveoläre Ventilation**, d. h. die tatsächlich am Gasaustausch teilnehmende Luftmenge, errechnet sich aus der Differenz zwischen Atemzugvolumen (AZV oder Tidalvolumen [VT]) und funktionellem Totraum (VD). Sie ist eine entscheidende Größe dafür, ob die Atmung eines Patienten ausreichend (suffizient) ist oder nicht!

$$\text{Alveoläre Ventilation} = \text{Tidalvolumen (VT)} - \text{funktioneller Totraum (VD)}$$

PFLEGEPRAXIS

Entscheidend: Atemfrequenz und Tidalvolumen

Bei oberflächlicher und schneller Atmung ist die **alveoläre Ventilation** geringer als bei tiefer und langsamer Atmung.

- Atmet ein Patient bei gleichbleibendem Atemminutenvolumen oberflächlicher und schneller, etwa wegen Schmerzen oder Atemnot, nimmt das Totraumvolumen zu und die alveoläre Ventilation ab (> Tab. 1.2). Kann der Patient das Tidalvolumen nicht steigern, muss er extrem hochfrequent atmen, um dieselbe alveoläre Ventilation zu erreichen (unterste Zeile in > Tab. 1.2). Dies kann zur Dekompensation führen, wenn der Patient die dazu notwendige enorme Atemarbeit nicht mehr leisten kann.
- Atmet ein Patient bei gleich bleibendem Atemminutenvolumen langsam und tief, verringert sich das Totraumvolumen und die alveoläre Ventilation nimmt zu.

VD/VT-Verhältnis

Das Verhältnis des Totraumvolumens (*Volume deadspace, VD*) zum Atemzugvolumen (*Volume tidal, VT*) heißt **VD/VT-Verhältnis** oder *Totraumquotient*. Es liegt normalerweise bei etwa 0,3, d. h. das

Tab. 1.2 Je schneller und oberflächlicher ein Patient atmet, desto mehr steigt das Totraumvolumen/Minute und sinkt die alveoläre Ventilation, d. h. die Atmung wird immer ineffektiver. Kann das Tidalvolumen nicht gesteigert werden, ist eine normale alveoläre Ventilation nur durch eine enorm schnelle Atmung möglich, die mit einer hohen Atemarbeit verbunden ist.

Atemfrequenz (f)	Tidalvolumen (V_T)	Atemminutenvolumen (AMV)	Totraum		Alveoläre Ventilation		VD/VT-Verhältnis
			pro Atemzug	pro Minute	pro Atemzug	pro Minute	
15	500 ml	7,5 l	150 ml	2,25 l	350 ml	5,25 l	0,3
20	375 ml	7,5 l	150 ml	3,0 l	225 ml	4,5 l	0,4
20	300 ml	6,0 l	150 ml	3,0 l	150 ml	3,0 l	0,5
24	250 ml	6,0 l	150 ml	3,6 l	100 ml	2,4 l	0,6

6

Maschinelle Beatmung

DEFINITION

Maschinelle Beatmung (*Mechanical ventilation*, auch *Artificial respiration*, d. h. *künstliche Beatmung*): Die Atemarbeit wird teilweise (*Partial respiratory/ventilatory support*) oder vollständig (*Full respiratory/ventilatory support*) von einem Beatmungsgerät (Respirator) übernommen.

Der Begriff **Ventilation** (englisch für „Beatmung“) wird im deutschen Sprachraum überwiegend als Überbegriff verwendet für jegliche Form der „Atmung“, also sowohl für die Spontanatmung als auch für die maschinelle Beatmung. Der Begriff **Breathing** (englisch für „Atmung“) wird gelegentlich verwendet im Zusammenhang mit Beatmungsformen, bei denen der Patient einen großen Teil der Atemarbeit selbst erbringt, z. B. ASB (> 6.3.7).

6.1 Grundlagen der maschinellen Beatmung

Grundsätzlich kann eine **maschinelle Beatmung** in der Intensivmedizin nicht-invasiv oder invasiv erfolgen:

- Eine **invasive Beatmung** erfordert die Atemwegssicherung über einen Endotrachealtubus (> Kap. 4) oder eine Trachealkanüle (> Kap. 5). Dies erlaubt i. d. R. alle Formen der Beatmung und damit eine bestmögliche Oxygenierung bzw. CO₂-Elimination bei gleichzeitig gutem Aspirationsschutz. Nachteilig sind jedoch die möglichen Komplikationen, allen voran die **VAP** (*Ventilator-assoziierte Pneumonie, Beatmungspneumie* > 6.7.1).
- Die **nicht-invasive Beatmung** (NIV) kommt dagegen ohne Tubus/Trachealkanüle aus, d. h. die Risiken einer Intubation/Tracheotomie werden umgangen. Allerdings sind die Anwendungsbe-

reiche einer NIV begrenzter als die einer invasiven Beatmung (Voraussetzungen > 6.4.1). Insbesondere Beatmungen mit einem Beatmungsdruck > 25 cm H₂O sollten *nicht* als nichtinvasive Beatmung vorgenommen werden.

6.1.1 Indikationen und Ziele der Beatmungstherapie

Wann ist eine maschinelle Beatmung angezeigt?

In der Intensivmedizin ist eine **invasive Beatmung** indiziert bei:

- Akuter respiratorischer Insuffizienz (> Kap. 2) und Kontraindikationen für bzw. Versagen einer NIV
- Atemstillstand/Schnappatmung
- Tiefer Bewusstlosigkeit.

Indikationen für eine **nichtinvasive Beatmung** > 6.4.1

Beatmung in der Palliativmedizin > 6.8.5.

Wichtige **Kriterien für die Indikationsstellung** sind vor allem die Atemfrequenz und die Werte der Blutgasanalyse:

- Die **Atemfrequenz** ist ein rasch erfassbarer Indikator für eine drohende Dekompensation. Atemfrequenzen > 35/Min. führen rasch zur Ermüdung des Zwerchfells (Hauptatemmuskel!). Dadurch kann sich die respiratorische Situation drastisch verschlechtern (auch > Tab. 1.2)
- **Blutgasanalyse** (> Tab. 2.5). Bei Patienten mit chronischer Hyperkapnie sind p_aCO₂-Werte von > 55 mmHg häufig „normal“. In diesem Fall ist dann neben einer Tachypnoe vor allem der pH-Wert ein wichtiges Kriterium: Ein niedriger pH-Wert (respiratorische Azidose) bei gleichzeitig niedrigem BE weist bei diesen Patienten auf eine Dekompensation hin. Weiter sind ausgeprägte

motorische Unruhe, starkes Schwitzen und Verwirrtheit bzw. zunehmende Bewusstseinsbeeinträchtigung bei diesen Patienten Zeichen der Verschlechterung der pulmonalen Situation.

WICHTIG

Nutzen und Risiko abwägen

Der Arzt berücksichtigt bei der **Entscheidung für oder gegen eine Beatmungstherapie** immer auch die Gesamtsituation und den mutmaßlichen Willen des Patienten (Vorerkrankungen, aktuelle Erkrankung einschließlich Ausmaß der respiratorischen Insuffizienz und Prognose, evtl. Patientenverfügung) und wägt den Nutzen gegen die Risiken der Beatmungstherapie ab.

- Die erschöpfte Atemmuskulatur kann sich erholen, der Sauerstoffbedarf der Atemmuskulatur wird reduziert
- Bei invasiver Beatmung erfolgt das *Weaning* (Entwöhnung vom Respirator > 6.11) und damit die Aktivierung der Atemmuskulatur des Patienten zum frühestmöglichen Zeitpunkt.

6.1.2 Beatmungstechnik

Die maschinelle Beatmung kann prinzipiell als **Überdruckbeatmung** oder als **Unterdruckbeatmung** erfolgen. In der modernen Intensivmedizin wird praktisch nur die Überdruckbeatmung eingesetzt. Lediglich im Bereich der außerklinischen Beatmung kommen in ausgewählten Fällen Verfahren der Unterdruckbeatmung zum Einsatz.

Ziele der Beatmungstherapie

Die Beatmungstherapie hat folgende **Ziele**:

- Der Gasaustausch des Patienten wird optimiert, das Gefühl der Luftnot wird beseitigt
- Beatmungsbedingte Lungenschädigungen (z. B. pulmonales Baro- oder Volutrauma, Sauerstofftoxizität) werden durch schonende („lungenprotektive“) Beatmung minimiert, d. h. Beatmung mit möglichst geringem Atemzugvolumen ($\leq 6 \text{ ml/kg KG}$ bei ARDS, ansonsten $6\text{-}8 \text{ ml/kg}$ des idealen Körpergewichts), niedrigem Beatmungsdruck und möglichst niedrigem F_iO_2

Überdruckbeatmung

Bei der Überdruckbeatmung baut das Beatmungsgerät einen **Überdruck in den Atemwegen** des Patienten auf. Dadurch entsteht ein Druckgefälle zu den Alveolen hin, und Luft strömt in die Lunge. Während der Expiration fällt der intrapulmonale Druck dann wieder auf den Ausgangswert ab (> Abb. 6.1).

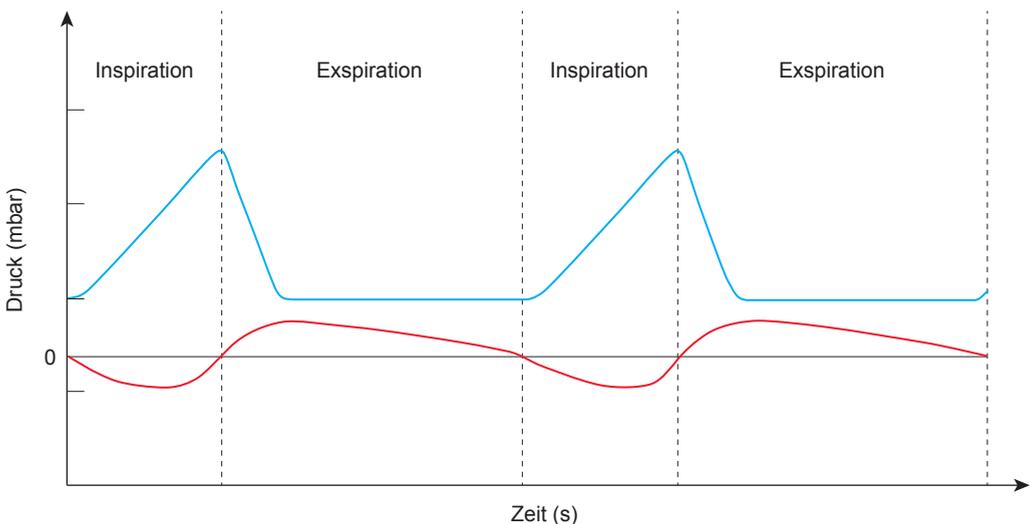


Abb. 6.1 Druckverlauf während Spontanatmung (rote Linie) und während Überdruckbeatmung (volumenkontrollierte Beatmung mit PEEP, blaue Linie). [A400]

WICHTIG**Unterschied Spontanatmung – maschinelle Beatmung**

Im Gegensatz zur Spontanatmung herrscht bei der maschinellen Beatmung während des gesamten Atemzyklus ein **Überdruck im Thorax** (> Abb. 6.1), d. h. es entstehen umgekehrte und *unphysiologische Druckverhältnisse*.

Unterdruckbeatmung

Die ersten Beatmungsgeräte waren die in den 20er Jahren im Rahmen der Polioepidemie in Amerika entwickelten **eisernen Lungen** (auch *Tankrespiratoren* genannt). Diese waren so konstruiert, dass der Körper des Patienten bis zum Hals in einer Kammer („Tank“) lag. Bei der mit diesen Geräten durchgeführten **Unterdruckbeatmung** wird im Tank ein Unterdruck erzeugt, der sich auf Thorax und Lunge überträgt, die sich daraufhin ausdehnen. Dadurch entsteht im Thorax ein negativer Druck (Sog), der bewirkt, dass Luft in die Lunge strömt. Insgesamt wirkt die Unterdruckbeatmung vergleichbar der Spontanatmung: Bei der Inspiration entsteht ein negativer intrapulmonaler Druck, der am Ende der Inspiration auf den Atmosphärendruck abfällt, während der Expiration leicht positiv wird und am Ende der Ausatmung wieder dem Atmosphärendruck entspricht.

Heute wird die Unterdruckbeatmung nur noch selten und fast ausschließlich im Bereich der außerklinischen Beatmung eingesetzt (> Kap. 10). Die hierbei verwendeten Geräte sind sämtlich Weiterentwicklungen der klassischen eisernen Lunge. In den letzten Jahren wurden Geräte entwickelt, die nicht mehr den gesamten Körper des Patienten vom Hals abwärts einschließen, sondern nur noch den Thorax und teilweise den Bauch. Diese **Kürass-Ventilatoren** (*Cuirasse* = „Lederpanzer“) dienen der Atemunterstützung und sind insbesondere bei Patienten im Kindesalter eine Option zur nichtinvasiven Beatmung über Maske (> 6.4). Langzeiterfahrungen mit diesen Geräten liegen nicht vor.

In der modernen Intensivmedizin werden Tankrespiratoren praktisch nicht eingesetzt. Grund dafür ist, dass die respiratorische Insuffizienz der Patienten hier häufig *pulmonal* bedingt ist (z. B. Folge einer Pneumonie, eines ARDS oder eines Thorax-

traumas), d. h. Resistance und Compliance der Lunge sind verändert und die Atemarbeit ist entsprechend erhöht. Dies können Tankrespiratoren nicht kompensieren. Die respiratorische Insuffizienz der Patienten, die zu Hause mit Unterdruckgeräten beatmet werden, ist i. d. R. *extrapulmonal* bedingt (z. B. Folge einer neuromuskulären Erkrankung).

6.2 Beatmungsparameter**6.2.1 Ventilationszyklus****DEFINITION**

Ventilationszyklus: Zeitdauer vom Beginn der Inspiration bis zum Ende der Expiration. Unterteilt in **Inspirations-** und **Expirationsphase** (Inspirations- und Expirationszeit).

Beide Phasen können weiter unterteilt werden in eine **Flow-Phase** (*Gasflussphase*, d. h. Zeit, in der Luft strömt) und eine **No-Flow-Phase** (*Pausenphase*, d. h. Zeit, in der kein Gasfluss stattfindet).

- Die **inspiratorische No-Flow-Phase** wird auch als *inspiratorische Pause* oder *Plateau-Phase* bezeichnet
- Die **expiratorische No-Flow-Phase** wird *Grundlinie* oder *Baseline* genannt.

Die **Zeitdauer der inspiratorischen No-Flow-Phase** einer volumenkontrollierten Beatmung (> 6.3.2) kann an den meisten Respiratoren eingestellt werden (Einstellparameter Pausendauer) oder resultiert aus der Inspirationsdauer (T_{insp}) und der eingestellten Geschwindigkeit, mit der das Gas in die Lunge strömt (Flow). Die **expiratorische No-Flow-Phase** dagegen ergibt sich: Sobald der Beatmungsdruck während der Expiration auf das eingestellte endexpiratorische Druckniveau abgefallen ist, beginnt die expiratorische No-Flow-Phase. Diese endet dann mit Beginn der nächsten Inspiration.

VORSICHT!

Strömt am Ende der Expiration noch Gas aus der Lunge (Erkennungsmerkmal: Flowkurve erreicht *nicht* die 0-Linie), muss das Beatmungsmuster modifiziert werden (z. B. Verlängerung der Expirationszeit), da ansonsten die **Gefahr des Airtrappings** (> 6.3.1 und > Abb. 6.2) besteht

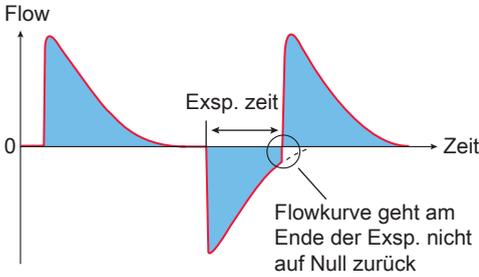


Abb. 6.2 Geht die Flowkurve am Ende der Expiration nicht auf Null zurück, ist dies ein Hinweis darauf, dass die Expirationszeit zu kurz ist und ein Teil des Atemzugvolumens in der Lunge bleibt. Dadurch entsteht das „Airtrapping“ und ein Intrinsic-PEEP (> 6.2.4). [A400]

Beatmungsfrequenz, Atemzug- und Atemminutenvolumen

DEFINITION

- Beatmungsfrequenz (f):** Anzahl der Atemhübe (Atemzüge) pro Minute.
- Atemhubvolumen (Tidal volume, kurz V_T):** Luftmenge, die pro Atemhub verabreicht wird.
- Atemminutenvolumen (kurz AMV):** Luftmenge, die pro Minute verabreicht wird.

Normwerte Atemfrequenz und Atemvolumina > 1.3.3

Am Respirator wird entweder das Atemhubvolumen oder das Atemminutenvolumen eingestellt:

Wird das **Atemhubvolumen** eingestellt, so errechnet sich das Atemminutenvolumen:

$$V_T \times f = \text{AMV}$$

Beispiel: Am Respirator sind ein Atemhubvolumen von 0,4 l (400 ml) und eine Beatmungsfrequenz von 12/Min. eingestellt. Das Atemminutenvolumen beträgt dann

$$0,41 \times 12 = 4,8 \text{ l}$$

Wird das **Atemminutenvolumen** eingestellt, so errechnet sich das Atemhubvolumen:

$$V_T = \text{AMV}/f$$

Beispiel: Am Respirator sind ein Atemminutenvolumen von 7,0 l und eine Beatmungsfrequenz von 14/Min. eingestellt. Das Atemhubvolumen beträgt dann

$$7,0 \text{ l}/14 = 0,5 \text{ l (500 ml)}$$

Zielgröße für die Einstellung der Beatmungsfrequenz und des Tidal- bzw. Minutenvolumens ist der $p\text{CO}_2$ (Normwerte > Tab. 2.5). Bei gesteigertem Stoffwechsel (etwa im Rahmen einer Sepsis mit stark erhöhter Körpertemperatur) entsteht vermehrt CO_2 . Dann sind höhere Beatmungsfrequenzen und/oder höhere Atemhub- und -minutenvolumina notwendig, um den $p\text{CO}_2$ im Normbereich zu halten. Umgekehrt sind z. B. bei Hypothermie (verminderter Stoffwechsel und verminderte CO_2 -Produktion) eine niedrige Atemfrequenz und niedrige Atemhub- bzw. -minutenvolumina ausreichend, um eine Normkapnie zu erhalten.

In manchen Situationen ist der angestrebte $p\text{CO}_2$ eher niedrig, z. B. bei der Beatmung eines Patienten mit erhöhtem Hirndruck (> 6.8.2), in anderen Fällen wiederum wird ein sehr hoher $p\text{CO}_2$ toleriert, um einen zu hohen Beatmungsdruck vermeiden zu können (permissive Hyperkapnie > 8.6).

WICHTIG

Eingestelltes AMV – verabreichtes AMV

Nur bei der **volumenkontrollierten Beatmung** (VC-CMV > 6.3.2) sowie bei PRVC, IPPV-Autoflow und APV (> 6.3.2) – jeweils ohne zugeschalteten Trigger (> 6.2.5) – entspricht das eingestellte AMV auch dem tatsächlich verabreichten AMV. Sobald einer Beatmungsform ein Trigger zugeschaltet ist, kann der Patient zusätzlich zu den maschinellen Atemzügen atmen und das tatsächliche AMV ist dann entsprechend größer als das am Respirator eingestellte.

Bei **druckkontrollierter Beatmung** kann das Atemhub- bzw. -minutenvolumen nicht eingestellt werden. Das Atemzugvolumen ergibt sich aus dem eingestellten Inspirationsdruck, der Inspirationszeit und der pulmonalen Situation des Patienten.

Seufzer

Normalerweise atmen Erwachsene 8–10-mal pro Stunde einen sog. **Seufzer** (sehr tiefen Atemzug oder „Deep sigh“) ein. Manche Respiratoren bieten die Möglichkeit, mit der Einstellung eines Seufzers dies nachzuahmen. Ist ein Seufzer eingestellt, wird in regelmäßigen Abständen (z. B. jeder 100. Atemzug) ein deutlich größerer Atemzug verabreicht, z. B. das eineinhalbfache oder doppelte Atemzugvolumen (*inspiratorischer Seufzer*), oder der PEEP intermittierend erhöht (*expiratorischer Seufzer*). Ziel ist die Atelektasenprophylaxe bzw. die Wiedereröffnung

atelektatischer Lungenbezirke (Recruitment, > 6.8.1). Die Seufzeratmung geht mit intermittierend höheren Beatmungsdrukken einher, d. h. das Risiko eines pulmonalen Volu- oder Barotraumas (> 6.7.1) steigt. Aus diesem Grund wird die Seufzerfunktion kaum noch angewendet und ist an vielen neueren Geräten nicht mehr möglich.

Atemzeitverhältnis

DEFINITION

Atemzeitverhältnis (*Inspirations-Expirationsverhältnis*, kurz *I:E-Verhältnis*): Verhältnis von Inspirationszeit (t_{insp}) zu Expirationszeit (t_{exp}). Physiologisch ist ein I:E von 1:1,5–1:2.

Abhängig vom verwendeten Beatmungsgerät wird das **Atemzeitverhältnis** direkt eingestellt oder indirekt, d. h. es wird die Inspirationszeit eingestellt und das I:E-Verhältnis errechnet sich:

- Wird das I:E-Verhältnis **direkt eingestellt**, so errechnen sich die Inspirations- und die Expirationszeit. *Beispiel:* Am Respirator sind ein I:E-Verhältnis von 1:1,5 und eine Atemfrequenz von 12/Min. eingestellt. Ein Ventilationszyklus dauert also 5 Sek. (60 Sek./12), damit beträgt bei einem I:E-Verhältnis von 1:1,5 die Inspirationsdauer 2 Sek. und die Expirationsdauer 3 Sek.
- Für die **indirekte Einstellung** gibt es verschiedene Möglichkeiten, aus denen sich dann jeweils das Atemzeitverhältnis errechnet:
 - *Einstellung der Inspirationszeit* in Sekunden.
Beispiel: Ist am Respirator eine Inspirationszeit von 2 Sek. und eine Beatmungsfrequenz von 15/Min. eingestellt, so dauert ein Ventilationszyklus 4 Sek., d. h. die Expirationszeit beträgt 2 Sek. (Ventilationszyklus minus Inspirationsdauer) und das I:E-Verhältnis liegt damit bei 1:1
 - *Einstellung der inspiratorischen Flow-Phase (Insp.-Dauer) und der inspiratorischen Pause (Pausendauer)* jeweils in % des Ventilationszyklus. *Beispiel:* Ist am Respirator eine Insp.-Dauer von 40 % und eine Pausendauer von 10 % eingestellt, beträgt die gesamte Inspirationsphase 50 % des Ventilationszyklus, d. h. das I:E-Verhältnis liegt bei 1:1.

Bei der Einstellung bzw. bei Veränderungen des I:E-Verhältnis Flow- und Druckkurven beachten: Die Differenz zwischen PEEP und dem Beatmung(spitzen)druck sollte möglichst niedrig sein.

WICHTIG

Ein **I:E-Verhältnis < 1:2** verlängert die Expirationszeit auf Kosten der Inspirationszeit. Dies ist bei der Beatmung von Patienten mit COPD (> 2.3.2) sinnvoll; hier soll die Expirationszeit möglichst lang sein, gleichzeitig muss eine ausreichendes Atemminutenvolumen gewährleistet sein.

Ein **I:E-Verhältnis > 1:2** verlängert die Inspirationszeit auf Kosten der Expirationsdauer. Dies ist häufig notwendig um den Beatmungsspitzendruck senken bzw. niedrig halten zu können und ausreichend Zeit für den Gasaustausch zur Verfügung zu stellen (IRV > unten). Bei hämodynamischem respiratorischen Versagen wird ein I:E-Verhältnis von 1:1 – 1:1,5 vorgeschlagen.

Beatmung mit IRV

DEFINITION

Inversed-ratio ventilation (kurz **IRV**; *inverse* = umgekehrt) ist keine eigenständige Beatmungsform, sondern besagt, dass eine (meist kontrollierte) Beatmung mit umgekehrtem Atemzeitverhältnis (I:E-Verhältnis) erfolgt, d. h. die Inspirationszeit ist genauso lang wie die Expirationszeit oder länger (das **I:E-Verhältnis ist ≥ 1**).

Bei **Beatmung mit IRV** wird das Atemzeitverhältnis (I:E-Verhältnis) umgekehrt. Daraus folgt eine

- Verlängerung der Inspirationszeit auf Kosten der Expirationszeit (Verkürzung der Expirationszeit, im Extremfall I:E = 4:1)
- Erhöhung des mittleren Beatmungsdrukks (Beatmungsmitteldruck, mittlerer Atemwegsdruck, kurz MAP).

IRV wird eingesetzt bei schweren Störungen des pulmonalen Gasaustauschs, insbesondere bei restriktiven Ventilationsstörungen (Erkrankungen mit Einschränkung der Compliance, > 1.3.5). Der **positive Effekt auf die Oxygenierung** wird bewirkt durch eine:

- Gleichmäßigere Verteilung des Gases in der Lunge
- Längere Kontaktzeit des Gases in der Lunge

- Bessere Belüftung von Lungenarealen mit erhöhter Resistance (mehr Zeit zum Öffnen atelektatischer Lungenbezirke).

Nachteilig ist die Erhöhung des mittleren Beatmungsdrucks und damit des intrathorakalen Drucks, der dazu führt, dass der venöse Rückstrom zum rechten Herzen abnimmt und in der Folge auch das Herzzeitvolumen und damit die Durchblutung der Organe verringert werden (Details > 6.7 Nebenwirkungen der Beatmung). Zudem kann sich durch die kurze Expirationszeit ein Intrinsic-PEEP aufbauen (siehe unten).

Intrinsic-PEEP und Airtrapping

Unter Beatmung mit IRV kann die verbleibende Zeit zur Expiration zu kurz sein, um das komplette zuvor eingeatmete Atemzugvolumen wieder aus der Lunge strömen zu lassen, d. h. ein Teil des Atemzugvolumens verbleibt in der Lunge (> Abb. 6.2). Dieses Phänomen wird **Airtrapping** (*Trap* = Falle) genannt. Es führt zu einer Erhöhung der FRC (> Tab. 1.1) und steigert den endexpiratorischen Druck, daher auch die Bezeichnung „Auto-PEEP“ oder **Intrinsic-PEEP** (PEEP > 6.2.4).

Im Gegensatz zum externen (am Respirator eingestellten) PEEP, der auf die gesamte Lunge einwirkt, kommt der Intrinsic-PEEP vor allem in den sog. „langsamen Lungenkompartimenten“ (Lungenabschnitte, die sich nur sehr langsam mit Luft füllen und entleeren) zur Wirkung (deshalb wird er von manchen Autoren auch „Individual-PEEP“ oder „selektiver PEEP“ genannt). Dies kann bei der Beatmung von Patienten mit ARDS genutzt werden, um die Alveolen offenzuhalten (> 6.8.1) [12].

VORSICHT!

Gefahren des Intrinsic-PEEP

Abhängig davon, ob der Patient volumen- oder druckkontrolliert beatmet ist, birgt der Intrinsic-PEEP unterschiedliche **Gefahren**: Bei volumenkontrollierter Beatmung kann sich der Intrinsic-PEEP unkontrolliert aufschaukeln mit der Gefahr eines pulmonalen Barotraumas (> 6.7.1), bei druckkontrollierter Beatmung bewirkt der Intrinsic-PEEP eine Verminderung der Atemzugvolumina (Details > 6.3.3).

6.2.2 Inspirationsflow

DEFINITION

Inspirationsflow: Geschwindigkeit, mit der das Atemgas während der inspiratorischen Flow-Phase verabreicht wird (Volumen pro Zeiteinheit). Je höher der Inspirationsflow, desto rascher füllt sich die Lunge mit Luft, d. h. desto schneller ist das eingestellte Atemhubvolumen verabreicht bzw. der eingestellte Inspirationsdruck erreicht.

Bei *volumenorientierten Beatmungsformen* kann der Inspirationsflow entweder direkt am Respirator eingestellt werden oder er ergibt sich aus dem eingestellten Atemhubvolumen, der Beatmungsfrequenz, der Flowanstiegszeit und der Inspirations- und Pausendauer.

Bei *druckorientierten Beatmungsformen* resultiert der Flow insbesondere aus der inspiratorischen Anstiegszeit, der eingestellten Druckdifferenz sowie der Resistance und Compliance von Lunge und Beatmungssystem.

Bei **hohem Inspirationsflow** füllt sich die Lunge rasch mit Luft. Eine hohe Gasflussgeschwindigkeit birgt jedoch die Gefahr von turbulenten Luftströmungen in den Atemwegen, was eine schlechtere Verteilung des Atemgases in der Lunge und eine Erhöhung des Spitzendrucks zur Folge hat. Bei **niedrigem Inspirationsflow** ist die Luftströmung in den Atemwegen weniger turbulent, das Atemgas wird besser in der Lunge verteilt und der Spitzendruck ist niedriger. Es muss jedoch immer ein gewisser Mindestflow eingestellt sein, damit das eingestellte Atemhubvolumen in der vorgesehenen Zeit verabreicht werden kann (siehe Kasten).

WICHTIG

Einstellung Inspirationsflow

Je niedriger der Inspirationsflow ist, desto größer ist die Gefahr, dass beim Patienten das **Gefühl der Luftnot** entsteht. Deshalb wird der Flow bei Beatmungsformen, bei denen der Patient selbst Atemarbeit leisten soll, höher eingestellt bzw. vom Respirator automatisch angehoben, sobald der Bedarf des Patienten steigt.

Faustregel für die Einstellung des Inspirationsflow bei volumenkontrollierter Beatmung: Der Inspirationsflow sollte immer mindestens das 2,5–3-fache des Atemminutenvolumens des Patienten betragen (bei Beatmungsformen mit hohem Spontanatemanteil eher höher).

Flowmuster

An manchen Beatmungsgeräten können verschiedene **Flowmuster** (*Flowformen, Flowprofile*) eingestellt werden (> Abb. 6.3):

- Beim **konstanten Flow** (auch *Rechteckflow* genannt) ist die Gasflussgeschwindigkeit während der gesamten inspiratorischen Flowphase gleich
- Beim **dezierierenden Flow** ist die Gasflussgeschwindigkeit zu Beginn hoch und fällt während der inspiratorischen Flowphase kontinuierlich ab
- Beim **Sinusflow** steigt die Strömungsgeschwindigkeit zu Beginn der inspiratorischen Flowphase an und fällt dann ab
- Beim **akzelerierenden Flow** steigt die Strömungsgeschwindigkeit während der gesamten inspiratorischen Flowphase kontinuierlich an.

WICHTIG

Bei druckorientierten Beatmungsformen (z. B. PC-CMV, PC-BIPAP, PRVC, PC-SIMV, SPN-CPAP/PS, druckunterstützte Beatmung) ist der Flow immer dezelerierend.

Flowanstiegszeit

An vielen Respiratoren kann die **Flowanstiegszeit** (*Inspirationsanstiegszeit*, auch *Rampe* genannt), eingestellt werden, d. h. die Zeitspanne, in welcher der (Spitzen-)flow erreicht wird.

- Ist eine lange Flowanstiegszeit (*flache Rampe*) eingestellt (sinnvoll bei hoher Resistance), strömt das Atemgas zu Beginn der Inspiration langsam zum Patienten. Dies hat den Vorteil, dass sich die Lunge besser (gleichmäßiger) füllt. Nachteilig ist, dass dadurch beim Patienten das Gefühl des Luft Hungers entstehen kann, weil das Gas zu langsam anflutet.

- Bei zu kurzer Flowanstiegszeit (*steile Rampe*) kann die Inspiration zu früh abgebrochen werden, da die Schwelle für die flowgesteuerte Umschaltung (> 7.1.2) noch während der Inspiration des Patienten erreicht wird.

Eine gute Beobachtung und – sofern möglich – Kommunikation mit dem Patienten ist deshalb sehr wichtig.

Moderne Respiratoren liefern einen Spitzenflow bis ca. 200 l/Min.

6.2.3 Inspiratorische Sauerstoffkonzentration

DEFINITION

Inspiratorische Sauerstoffkonzentration (inspiratorische O₂-Fraktion, kurz **F_IO₂**): Sauerstoffanteil der inspiratorischen Atemluft. Die Angabe erfolgt entweder in Prozent oder als Dezimalzahl (eine Sauerstoffkonzentration von 100 % entspricht einem F_IO₂ von 1,0, bei 21 % Sauerstoff beträgt die F_IO₂ 0,21).

Sauerstofftoxizität

Eine hohe inspiratorische Sauerstoffkonzentration kann die Atemwege und das Lungengewebe schädigen, und zwar umso mehr, je höher die Sauerstoffkonzentration ist.

WICHTIG

Schädigende Wirkung

In zu hoher Konzentration wirkt **Sauerstoff toxisch** („giftig“):

- Vermehrte Bildung von Sauerstoffradikalen
- Bildung von Resorptionsatelektasen (auch *Obturationsatelektasen* > 2.2.4)

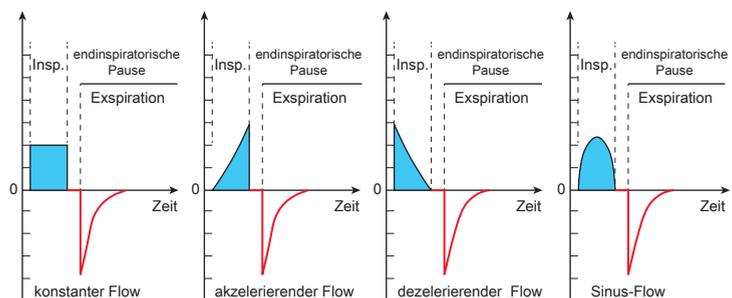


Abb. 6.3 Verschiedene Flowmuster (jeweils *ohne* Flowanstiegszeit, siehe Text). [A400]

- Verschlechterung der mukoziliären Clearance (> 1.1)
- Diffuse Schädigung der Alveolen ähnlich dem ARDS (Zunahme der Permeabilität der alveolokapillären Membran, Schädigung des Surfactant, Aktivierung von Mediatoren, $> 2.3.6$)
- Insbesondere bei Frühgeborenen kann eine längerfristige hohe Sauerstoffkonzentration eine *Retinopathie* (nicht entzündliche Netzhautschädigung) verursachen. Wo genau die Grenze liegt, oberhalb der die Sauerstoffkonzentration toxisch wirkt bzw. unterhalb der keine Schädigungen zu erwarten sind, ist nicht klar. **Derzeit gilt:** Eine Sauerstoffkonzentration von über 60 % ($F_{iO_2} > 0,6$) über einen längeren Zeitraum (als „länger“ gilt ein Zeitraum von mehr als 24 Std.) gilt als toxisch. Daher sollte ein $F_{iO_2} > 0,5-0,6$ langfristig möglichst nicht überschritten werden.

Bei Sauerstoffkonzentrationen $< 40\%$ ist anzunehmen, dass auch bei längerer Anwendung keine toxischen Schädigungen auftreten.

Liegt bei einem beatmeten Patienten eine Hypoxämie vor und kann die Oxygenierung nicht durch die Veränderung anderer Beatmungsparameter verbessert werden (z. B. Erhöhung des PEEP), wird ggf. auch längerfristig mit einer O_2 -Konzentration von über 60 % beatmet, um hypoxische Organschäden zu vermeiden.

Einstellung der inspiratorischen Sauerstoffkonzentration

Um Schädigungen der Lunge aufgrund einer zu hohen Sauerstoffkonzentration zu vermeiden, soll die **inspiratorische Sauerstoffkonzentration** grundsätzlich so niedrig wie möglich gewählt werden, d. h. nur so hoch, dass der gewünschte p_aO_2 (i. d. R. ca.

60–80 mmHg) bzw. eine Sauerstoffsättigung von 90–94% erreicht wird.

WICHTIG

Einstellung der F_{iO_2}

Bei der **Einstellung der F_{iO_2}** ist es wichtig, die Gesamtsituation des Patienten und die anderen Beatmungsparameter zu berücksichtigen. Eine Hypoxie sollte in jedem Fall vermieden werden, da sie für die Funktion des Gesamtorganismus und auch der Lunge schädlicher ist als eine hohe Sauerstoffkonzentration. Auch ein pulmonales Baro- bzw. Volutrauma (infolge sehr hoher Beatmungsdrücke bzw. Atemhubvolumina) schädigt die Lunge wahrscheinlich mehr als eine hohe F_{iO_2} .

6.2.4 PEEP

DEFINITION

PEEP (*Positiv endexpiratory pressure*): Positiver Druck am Ende der Ausatmung, d. h. der Druck in den Atemwegen fällt am Ende der Expiration nicht auf Null (im Verhältnis zum Atmosphärendruck) ab, sondern wird im positiven Bereich gehalten. Damit ist bei maschineller Beatmung mit PEEP der Druck während des gesamten Ventilationszyklus, also bei In- und Expiration, im positiven Bereich ($>$ Abb. 6.4).

Im Gegensatz dazu entspricht bei Beatmung mit **ZEEP** (*Zero endexpiratory pressure*) der Atemwegsdruck am Ende der Expiration dem Atmosphärendruck. Bei Beatmung mit **NEEP** (*Negative endexpiratory pressure*) wird am Ende der Expiration ein Unterdruck in den Atemwegen erzeugt (daher auch die Bezeichnung *Wechseldruckbeatmung*). Wegen der Gefahr der Atelektasenbildung ($>$ 2.2.4) wer-

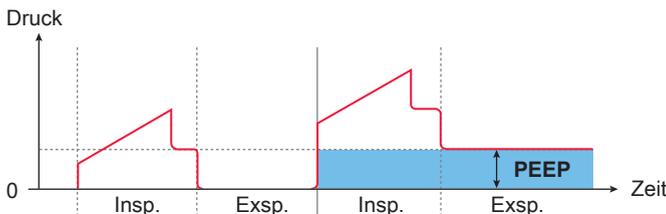


Abb. 6.4 Maschinelle Beatmung mit und ohne PEEP (hier volumenkontrollierte Beatmung). [A400]

Links: Bei Beatmung *ohne PEEP* fällt der Beatmungsdruck am Ende der Expiration auf Null ab (ZEEP siehe Text). **Rechts:** Bei Beatmung *mit PEEP* fällt der Beatmungsdruck am Ende der Expiration nur bis auf den eingestellten positiven Druck (PEEP-Niveau) ab. Damit bleibt der Druck in den Atemwegen bei Beatmung mit PEEP während des gesamten Atemzyklus im positiven Bereich.

den Beatmungen mit NEEP nicht mehr durchgeführt. An modernen Respiratoren ist daher die Einstellung eines NEEP nicht möglich.

Wirkungen des PEEP

Die **positiven Wirkungen des PEEP** beruhen vor allem darauf, dass durch den PEEP die FRC (funktionelle Residualkapazität > Tab. 1.1) zunimmt. Dadurch werden instabile (kollapsgefährdete) Alveolen vor dem Kollabieren bewahrt, bereits entstandene Atelektasen können in gewissem Umfang wieder eröffnet werden (*Alveolar recruitment* > 6.8.1). Dieses Rekrutieren bereits verschlossener Alveolarbereiche erfolgt vor allem durch das Zusammenspiel von erhöhtem Inspirationsdruck und PEEP: Durch entsprechend hohen Inspirationsdruck werden die Alveolen wieder eröffnet, der PEEP soll die rekrutierten Alveolen offen halten (der inspiratorische Plateaudruck öffnet die Lunge, der PEEP hält die Lunge offen). Zudem kann durch Anwendung eines PEEP die Umverteilung von extravaskulärem Lungenwasser aus dem Alveolarraum ins Interstitium erreicht werden.

WICHTIG

Insgesamt bessert sich durch die **Anwendung von PEEP** das Ventilations-Perfusionsverhältnis (> 1.4.3), der pulmonale Rechts-Links-Shunt nimmt ab und die Oxygenierung wird optimiert.

Nebenwirkungen des PEEP > 6.7.1

Indikationen für Beatmung mit PEEP

In vielen Kliniken wird bei maschineller Beatmung grundsätzlich ein geringer PEEP von mindestens 5 mbar eingestellt, der dazu dienen soll, die durch die Intubation bzw. Tracheotomie verminderte FRC zu normalisieren. Dieser geringe PEEP wird daher auch „**physiologischer PEEP**“ genannt.

Darüber hinaus ist ein **PEEP indiziert** bei:

- Oxygenierungsstörungen aufgrund restriktiver Ventilationsstörungen (> 2.2.1), also z. B. bei Lungenkontusion, ARDS, Pneumonie sowie bei instabilem Thorax (> 2.3.3) zur „inneren Schienung“.

- Beim kardiogenen Lungenödem bewirkt PEEP (meist in Form von CPAP-[Be-]Atmung) die Senkung von Vor- und Nachlast des Herzens (auch als *Nitroeffekt* bezeichnet), dadurch verbessert sich das Verhältnis von Sauerstoffangebot und -bedarf des Herzmuskels, was die Rückbildung der Lungenstauung unterstützt.
- Bei Operationen, bei denen mit einem erhöhten intraabdominellen Druck zu rechnen ist, wird bereits intraoperativ mit PEEP beatmet. Gerade bei diesen Patienten ist auch postoperativ mit Atelektasen zu rechnen, daher ist eine postoperative Beatmung mit PEEP bzw. CPAP-Atmung notwendig [13].

Umstritten ist die Anwendung eines **PEEP bei obstruktiven Ventilationsstörungen**, z. B. COPD oder Asthma bronchiale (> 2.3.2), da hier oft erkrankungsbedingt bereits ein Intrinsic-PEEP besteht. Durch Einstellen eines PEEP auf ca. 85% des Niveaus des Intrinsic-PEEP ist es jedoch möglich, die kleinen Atemwege offen zu halten. Dies erleichtert die Ausatmung und vermindert die Atemarbeit des Patienten.

VORSICHT!

Bei kreislaufinstabilen Patienten mit **Hypovolämie** ist es häufig notwendig, vor der Anwendung bzw. Erhöhung eines PEEP eine Volumensubstitution und evtl. auch eine Therapie mit Katecholaminen durchzuführen, um die negativen Auswirkungen auf das Herz-Kreislauf-System (Abfall von HZV und arteriellen Blutdruck > 6.7.2) gering zu halten.

Weiter wird ein PEEP nur mit größter Vorsicht eingesetzt bei Patienten mit:

- **Erhöhtem Hirndruck** (durch den PEEP kann der Hirndruck weiter steigen)
- **Lungenembolie** (PEEP erhöht die rechtsventrikuläre Nachlast)
- **Herzfehler mit Rechts-Links-Shunt** (PEEP kann hier den Rechts-Links-Shunt verstärken).

Einstellung des PEEP

Die Höhe des PEEP (in mbar) wird am Respirator eingestellt, im Beatmungssystem (nicht in der Lunge!) gemessen und kann am Display oder am Beatmungsdruckmanometer abgelesen werden.

WICHTIG

Extrinsic- und Intrinsic-PEEP

Der am Respirator eingestellte PEEP wird auch als **Extrinsic-PEEP** oder *extrinsischer PEEP* bezeichnet; er wirkt gleichmäßig auf die gesamte Lunge ein (daher auch die Bezeichnung „all over PEEP“). Im Gegensatz dazu baut sich der **Intrinsic-PEEP** (auch *intrinsischer PEEP*) bei bestimmten Erkrankungen (insbesondere COPD > 2.3.2) bzw. bei speziellen Beatmungsformen und Einstellungen am Respirator in Lunge des Patienten auf (> 6.2.1). Der Intrinsic-PEEP ist meist ungleichmäßig über die Lunge verteilt.

Für die Einstellung des PEEP-Niveaus existieren keine allgemeingültigen Richtlinien. Grundsätzlich wird folgendes **empfohlen**:

- **Konzept minimaler PEEP:** Den PEEP so hoch einstellen, dass bei einem $F_{iO_2} < 0,6$ eine Sauerstoffsättigung über 90 % bzw. ein $pO_2 > 60$ mmHg erreicht wird.
- Einstellung des PEEP mittels **PEEP/ F_{iO_2} -Tabelle**. Derzeit sind zwei verschiedene Tabellen gebräuchlich, die entweder einen höheren PEEP-Wert oder ein höheres F_{iO_2} zum Erreichen einer ausreichenden Sauerstoffversorgung tolerieren (> Tab. 6.1). Ist z. B. bei Einsatz der Tabelle *niedriger PEEP/hohes F_{iO_2}* bei einem F_{iO_2} von 0,5 und einem PEEP von 8 mbar der p_aO_2 zu niedrig, wird der PEEP auf 10 mbar angehoben. Ist wegen zu geringem p_aO_2 eine erneute Anpassung notwendig, wird die F_{iO_2} auf 0,6 angehoben usw.
- **Konzept optimaler PEEP:** Den PEEP so hoch einstellen, dass sich eine maximale Sauerstoffversorgung des Gewebes ergibt (mit steigendem PEEP steigt das Sauerstoffangebot im Blut zunächst an. Sobald der PEEP zu hoch ist, sinken Blutdruck und HZV, dadurch fällt das Sauerstoffangebot ab). Ist der untere Umschlagpunkt (*Lower inflection point* > Abb. 1.8 und > Abb. 7.6) durch eine Compliance-Messung ermittelt, sollte der PEEP 2–3 mbar darüber liegen.

- Sehr hohe PEEP-Werte (> 15 mbar) sollen wegen der Nebenwirkungen vermieden werden (PEEP-Nebenwirkungen > 6.7.1).
- Stress-Index-Bestimmung (PEEP wird so hoch eingestellt, dass Druck- Zeit- Kurve bei konstantem Flow eine lineare Form annimmt > Abb. 6.27)
- Wird der Ösophagusdruck gemessen, wird der PEEP auf oder über dem Wert des endexpiratorischen Ösophagusdrucks eingestellt (maximal 15 cmH₂O).

Für die individuelle Einstellung des PEEP bei einem Patienten existieren verschiedene Konzepte, bei denen auf unterschiedliche Weise der für den Patienten optimale PEEP ermittelt wird (Beispiel für die Einstellung des „best PEEP“ > 6.8.1 *Lungenprotektive Beatmung*). Ein neues Verfahren ist die PEEP-Einstellung unter zweidimensionaler Impedanztomographie, die (bettseitig durchgeführt) eine grafische Darstellung der Lungenverhältnisse bei Veränderungen des PEEP-Niveaus ermöglicht (> 9.2.3).

6.2.5 Trigger

DEFINITION

Trigger (engl.: *Auslöser*): Schaltelement am Respirator, das Inspirationsbemühungen des Patienten erkennt und es ihm ermöglicht, einen maschinellen Atemhub auszulösen (assistiert kontrollierte Beatmung) oder am Respirator spontan zu atmen. Im klinischen Sprachgebrauch wird der Begriff „Trigger“ bisher nur für das Auslösen der Inspiration benutzt. Neuere Respiratoren sind jedoch teilweise auch in der Lage, Expirationsbemühungen des Patienten zu registrieren und daraufhin die Expiration einzuleiten, auch wenn die eingestellte Inspirationsdauer noch nicht abgelaufen ist. Diese Respiratorfunktion wird als **expiratorischer Trigger** bezeichnet.

Im Folgenden ist der Begriff „Trigger“ immer synonym verwendet mit dem **inspiratorischen Trigger**. *Steuerung der Atmung* > 1.5

Tab. 6.1 PEEP/ F_{iO_2} -Tabellen zur Einstellung des PEEP (nach ARDS-Netzwerk).

Niedriger PEEP/hohes F_{iO_2}														
F_{iO_2}	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9	0,9	1,0
PEEP (mmHg)	5	5	8	8	10	10	10	12	14	14	14	16	18	20–24
Hoher PEEP/niedriges F_{iO_2}														
F_{iO_2}	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,8	0,8	0,9	1,0
PEEP (mmHg)	5	8	10	12	14	14	16	16	18	20	22	22	22	24

Druck-, Flow- und Volumentrigger

An derzeit gebräuchlichen Beatmungsgeräten kommen **Drucktrigger** und/oder **Flowtrigger** zur Anwendung. An manchen Geräten sind **Mischtrigger** installiert, d. h. der Anwender kann hier den Drucktrigger oder den Flowtrigger aktivieren. Überwiegend im pädiatrischen Bereich werden auch **Volumentrigger** eingesetzt.

Drucktrigger

Beim **Drucktrigger** muss der Patient durch seine Einatembemühungen einen bestimmten Unterdruck (unter PEEP) im Beatmungssystem aufbauen, um einen maschinellen Atemzug auszulösen bzw. spontan am Respirator atmen zu können (> Abb. 6.5). Der eingestellte Unterdruck (z. B. -2 mbar unter PEEP) entspricht der **Triggerschwelle** (auch *Triggerempfindlichkeit*) und wird von Drucksensoren im Respirator gemessen. Sobald der vom Patienten aufgebrachte Unterdruck die eingestellte Triggerschwelle unterschreitet, öffnet nach kurzer Zeit (Triggerlatenzzeit, siehe unten) das Inspirationsventil und es beginnt – je nach eingestellter Beatmungsform – ein maschineller Atemzug oder der Patient kann spontan einatmen.

Flowtrigger

Beim **Flowtrigger** erzeugt der Respirator auch während der Expirationsphase einen geringen konstanten Basisflow, der durch das Beatmungsschlauchsystem geleitet wird. Solange der Patient nicht versucht einzuatmen, sind der vom Respirator abgegebene Flow und der Rücklauf-Flow gleich hoch. Dies ändert sich, sobald der Patient einatmet (d. h. Volumen aus dem Basisflow „abzieht“). Der Respirator erkennt die Differenz zwischen abgegebenem Flow und Rücklauf-Flow und verabreicht – sobald der Patient einen bestimmten Teil des Basisflows eingeatmet hat – einen maschinellen Atemzug bzw. ermöglicht es dem Patienten, am Respirator spontan zu atmen.

Volumentrigger

Der **Volumentrigger** arbeitet ähnlich wie der Flowtrigger. Hierbei wird der Atemzug allerdings nicht

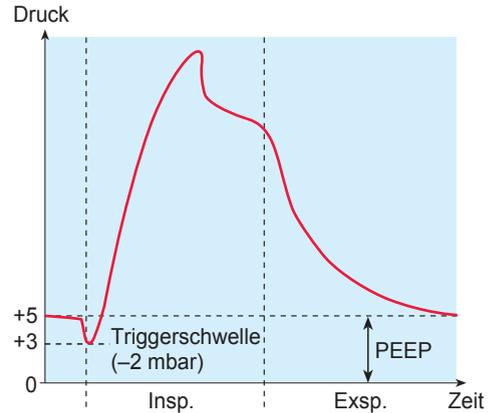


Abb. 6.5 Drucktrigger. Der Patient hat die Triggerschwelle erreicht (hier -2 mbar unter PEEP), daraufhin hat der Respirator einen maschinellen Atemhub verabreicht. [A400]

ausgelöst, wenn eine Flowänderung erkannt wird, sondern wenn ein bestimmtes Volumen aus dem Basisflow eingeatmet wird.

Neuronale Triggerung

Bei der **neuronalen Triggerung** werden spezielle nasogastrale Sonden (Größe ab 6 Fr.) verwendet, die die elektrischen Impulse des Zwerchfells (*Electric diaphragmatic impulse*, kurz EDI) messen. Der Respirator nutzt die gemessenen Impulse zur Steuerung der Beatmung: Je größer der Impuls, desto größer die Unterstützung der Atmung (> 6.3.9 NAVA). Der Respirator leitet die Expiration ein, sobald die Signalstärke auf 70 % ihres Ausgangswerts abfällt.

Das Verfahren der neuronalen Triggerung setzt sehr viel **früher** im Atemprozess an als Druck- und Flowtrigger: Die neuronale Triggerung registriert bereits die Erregung des Zwerchfells, während Druck- und Flowtrigger erst die nach der Kontraktion des Zwerchfells erfolgte Druck- oder Flowänderung im Schlauchsystem registrieren. Bei der neuronalen Triggerung kommt es dadurch seltener zu Fehltriggerungen bzw. nicht beantworteten Triggerbemühungen des Patienten und damit zur Desynchronisation von Patient und Respirator.

Die neuronale Triggerung ist optional an den Respiratoren Servo i[®], Servo u[®] und Servo n[®] (Firma Maquet) realisiert.

Triggerempfindlichkeit

An manchen Respiratoren ist die **Triggerempfindlichkeit** (*Triggerschwelle*) fest eingestellt und kann vom Anwender nicht variiert werden. An den meisten gebräuchlichen Respiratoren jedoch kann die Triggerempfindlichkeit eingestellt werden. Dabei ist es wichtig, die Triggerschwelle weder zu hoch (geringe Empfindlichkeit) noch zu niedrig einzustellen:

- Eine **zu hohe Einstellung** erhöht die Atemarbeit des Patienten und birgt die Gefahr der respiratorischen Erschöpfung (Ermüdung der Atemmuskulatur). Besonders gefährdet sind COPD-Patienten. Erreicht der Patient die zu hoch eingestellte Triggerschwelle nicht, werden seine Einatembemühungen vom Respirator nicht „beantwortet“. Keinesfalls sollte ein Drucktrigger möglichst hoch eingestellt werden um die Atemmuskulatur des Patienten zu „trainieren“.
- Eine zu niedrige (zu empfindliche) Einstellung begünstigt die **Selbsttriggerung** des Respirators. Dabei werden geringste Veränderungen von Druck, Flow oder Volumen, die z. B. bei der Umlagerung des Patienten oder bei Bewegungen des Atemschlauchsystems entstehen, vom Respirator als Inspirationsbemühung gedeutet und entsprechend beantwortet (Verabreichung eines maschinellen Atemzugs bzw. Beginn der Spontanatmungsphase am Respirator).

WICHTIG

Richtwerte für die Einstellung der Triggerempfindlichkeit

- Drucktrigger: 1–2 mbar unter PEEP
- Flowtrigger: 2–4 l/Min.

Grundsätzlich sollte der Trigger bei jeder Beatmungsform aktiviert sein, damit der Patient, falls er versucht einzutreten, auch tatsächlich Luft bekommt (kontrollierte Beatmung > 6.3.1).

Triggerlatenz

DEFINITION

Triggerlatenz: Zeitverzögerung zwischen Erreichen der Triggerschwelle und Beginn des Inspirationsflows. Sollte so kurz wie möglich sein (< 50 ms), um beim Patienten

das Gefühl der Atemnot und zusätzliche Atemarbeit zu vermeiden.

Die Triggerlatenz ist immer gerätespezifisch, d. h. sie variiert abhängig vom Respiratortyp. Daher ist die Triggerlatenz für die Praxis der Beatmungstherapie wenig relevant, sondern vor allem ein Kriterium für die Auswahl bzw. Neuanschaffung eines bestimmten Beatmungsgeräts (> 7.2).

6.3 Beatmungsformen

6.3.1 Einteilung der Beatmungsformen

Eine einheitliche, allgemein gültige **Klassifikation der Beatmungsformen** existiert bis heute nicht.

Derzeit gebräuchlich sind vor allem:

- Die Einteilung der Beatmungsformen in kontrollierte Verfahren, Verfahren zur Unterstützung der Spontanatmung sowie hybride bzw. andere spezielle Verfahren (> Tab. 6.2)
- Die **Klassifikation der Beatmungsformen nach Chatburn** (> Tab. 6.3), die es ermöglichen soll, die einzelnen (firmenspezifisch benannten) Beatmungsformen besser miteinander vergleichen zu können. Dies soll insbesondere Schulungen erleichtern.

WICHTIG

Unterschiedliche Bezeichnungen

Einzelne Beatmungsformen haben – obwohl sie grundsätzlich gleich funktionieren – unterschiedliche, **meist vom Gerätehersteller festgelegte Namen**. Zudem unterscheiden sich einzelne Beatmungsformen abhängig vom Gerätehersteller in Details, z. B. hinsichtlich der notwendigen Einstellparameter oder des Ablaufs der Beatmung. Bei den neuen Beatmungsgeräten ist es auch möglich, dass eine Beatmungsform eines Gerätetyps sich abhängig von der verwendeten Software-Version von derselben Beatmungsform desselben Respirators unterscheidet. Eine genaue Kenntnis der Gebrauchsanweisung ist daher unbedingt erforderlich.

Tab. 6.2 Übersicht und Einteilung gängiger Beatmungsformen (modifiziert nach [15]).

Kontrollierte (mandatorische) Beatmungsverfahren (Full respiratory support)			
Bezeichnung der Beatmungsform*	Kurz-Bezeichnung**	Merkmale	
Volumenkontrollierte Beatmung (<i>Volume controlled ventilation</i>)	VCV , VC-CMV	Verabreichung eines eingestellten Tidalvolumens, Beatmungsdruck variiert > 6.3.2	
Druckkontrollierte Beatmung (<i>Pressure controlled ventilation</i>)	PCV , PC-CMV	Verabreichung eines eingestellten Beatmungsdrucks, Tidalvolumen variiert > 6.3.3	
Druckregulierte volumenkontrollierte Beatmung (<i>Pressure-regulated volume-controlled ventilation</i>)	PRVC , DRVK	Druckkontrollierte Beatmung, Respirator errechnet erforderlichen Beatmungsdruck, um Zieltidalvolumen zu erreichen > 6.3.3	
Verfahren zur Unterstützung der Spontanatmung (Partial respiratory support)			
Gruppe	Bezeichnung der Beatmungsform*	Kurz-Bezeichnung**	Merkmale
AMV-unterstützende Verfahren	<i>Biphasic positive airway pressure</i>	BIPAP	Druckkontrollierte Beatmung mit Möglichkeit der Spontanatmung auf beiden Druckniveaus > 6.3.4
	<i>BIPAP-Airway pressure release ventilation</i>	BIPAP-APRV	
	Volumenkontrollierte synchronisierte intermittierende maschinelle Beatmung (<i>Volume controlled synchronized intermittent mandatory ventilation</i>)	VC-SIMV	Spontanatemphasen zwischen (getriggerten) volumenkontrollierten Atemhüben > 6.3.5
	Druckkontrollierte synchronisierte intermittierende maschinelle Beatmung (<i>Pressure controlled synchronized intermittent mandatory ventilation</i>)	PC-SIMV	Spontanatemphasen zwischen (getriggerten) druckkontrollierten Atemhüben > 6.3.5
Tidalvolumenunterstützende Verfahren	Assistiert-kontrollierte Beatmung	A/C-CMV	Bei Auslösen des Triggers wird kontrollierter Atemhub verabreicht. Ohne Trigger entspricht A/C-CMV der kontrollierten Beatmung
	Druckunterstützte Beatmung (<i>Pressure support ventilation</i>)	DU, PSV	Spontanatmung, bei der jede Inspiration durch eingestellten Druck unterstützt wird > 6.3.7
	Variable Druckunterstützung	Noisy-PSV	PSV, bei der die Höhe der Druckunterstützung variiert > 6.3.7
Adaptive Verfahren	<i>Adaptive support ventilation</i>	ASV	Unterstützung durch Respirator variiert abhängig von Atemmechanik und Spontanatemfähigkeit (> 6.3.10)
	<i>Intelligent-Adaptive support ventilation</i>	Intelligent-ASV	Unterstützung variiert abhängig von Atemmechanik, Spontanatemfähigkeit, $p_e\text{CO}_2$ und $S_p\text{O}_2$ (> 6.3.10)
	Neural regulierte Beatmungshilfe (<i>Neurally adjusted ventilatory assist</i>)	NAVA	Höhe der Beatmungsunterstützung variiert abhängig von elektrischer Aktivität des Diaphragmas (EDI, > 6.3.9)
	<i>SmartCare/Pressure support</i>	Smart care/PS	Variable Druckunterstützung, Ziel: Erreichen der Komfortzone (Kriterien Atemfrequenz, Tidalvolumen und $et\text{-CO}_2$), führt Spontanatemversuch durch > 6.11.3
	<i>Proportional assist ventilation</i>	PAV	Druckunterstützung proportional zu Einatembemühungen > 6.3.7

Tab. 6.2 Übersicht und Einteilung gängiger Beatmungsformen (modifiziert nach [15]). (Forts.)

Hybride Beatmungsverfahren			
Gruppe	Bezeichnung der Beatmungsform*	Kurz-Bezeichnung**	Merkmale
Kombinationen verschiedener Beatmungs- und Unterstützungsverfahren, z.B. SIMV + PSV, BIPAP + PSV oder PSV + ATC (> 7.3.2)			
Sonderformen			
Hochfrequenz-Oszillationsbeatmung		HFOV	Hoher Gasfluss wird durch Oszillator in hochfrequente Schwingungen versetzt (> 6.3.10)
* Viele Beatmungsformen haben zahlreiche Synonyme , die bei der detaillierten Beschreibung der jeweiligen Beatmungform genannt sind.			
** Die meisten Beatmungsformen haben mehrere verschiedene (Kurz-)Bezeichnungen , häufig werden sowohl deutsche als auch englische Begriffe verwendet. Hier sind die im klinischen Sprachgebrauch am häufigsten verwendeten aufgeführt. Weitere Kurz-Bezeichnungen sind jeweils bei der Definition der Beatmungsform aufgeführt.			

Tab. 6.3 Klassifikation der Beatmungsformen nach Chatburn (2007).

Verabreichung des Atemzugs (Atemmuster)	
Kontrollvariablen	VC (<i>Volume control</i> , volumenkontrolliert, > 6.3.2): das Gerät verabreicht den Atemhub mit einem voreingestellten Flow, der für eine vorgegebene Zeit verabreicht wird, um ein gewünschtes Atemzugvolumen (Vt) zu erreichen. Das Tidalvolumen ist vorgegeben, der Druck in der Lunge variiert z. B. abhängig vom Atemwegswiderstand (Resistance). Flow- und volumenkontrollierte Beatmung werden häufig synonym verwendet, da bei beiden ein konstanter Flow verabreicht wird.
	PC (<i>Pressure control</i> , druckkontrolliert, > 6.3.3): das Gerät verabreicht den Atemhub mit einem voreingestellten Druck, um den Druck in der Lunge zu erreichen ist ein dezelerierender Flow notwendig. Der vorgegebene Druck kann für eine voreingestellte Zeit erhalten bleiben (klassische Druckkontrolle) oder patientengesteuert (z. B. bei Unterschreiten eines bestimmten Flowwerts, klassische druckunterstützte Beatmung) auf den PEEP-Wert abfallen. Bei dieser Beatmungsform ist der Druck vorgegeben, das Atemzugvolumen variiert abhängig von den Lungenverhältnissen (Compliance und Resistance). Auch Beatmungsformen wie PRVC zählen zu dieser Gruppe der Beatmung (Zielvolumen vorgegeben, Atemzüge druckkontrolliert).
	DC (<i>Dual control</i> , zweifache Kontrolle): während eines Atemzugs kommen sowohl die volumen- als auch die druckkontrollierte Steuerung zum Einsatz (Bsp.: ein Atemzug beginnt volumenkontrolliert, beim Erreichen eines vorgegebenen oberen Drucks schaltet der Respirator auf druckkontrollierte Beatmung, d. h. von konstantem auf dezelerierenden Flow). DC wird selten verwendet.
Art der Verabreichung der Atemzüge	CMV (<i>Continuous mandatory ventilation</i> , kontinuierliche maschinelle Beatmung): Der Respirator verabreicht voreingestellte Atemhübe, diese können VC, PC oder DC sein. Die Beatmungsform wird entsprechend als VC-CMV, PC-CMV oder DC-CMV bezeichnet. Wenn der Patient triggert, wird ein voreingestellter VC-, PC- oder DC-Atemhub verabreicht.
	IMV (<i>Intermittent mandatory ventilation</i> , intermittierende maschinelle Beatmung): Der Respirator verabreicht voreingestellte Atemhübe, diese können VC, PC oder DC (CMV) sein. Triggert der Patient, wird ein Spontanatemzug (ggf. druckunterstützt, d. h. PC) ermöglicht. Bisher wurde diese Beatmungsform meist als SIMV bezeichnet. Da alle modernen Respiratoren über die Möglichkeit der Patiententriggerung verfügen, d. h. Atemzüge synchronisiert mit den Einatembemühungen des Patienten verabreichen, verzichtet Chatburn auf die Bezeichnung „synchronisiert“. Die Beatmungsform wird als VC-IMV, PC-IMV oder DC-IMV bezeichnet.
	CSV (<i>Continuous spontaneous ventilation</i> , kontinuierliche Spontan [Be-]Atmung): Hier triggert der Patient jeden Atemzug und bestimmt dessen Dauer und Tiefe. Atemzug kann auch mit Unterstützung des Respirators erfolgen (z. B. druckunterstützte Beatmung). Die Beatmungsform wird als PC-CSV oder DC-CSV bezeichnet, da bei VC-Beatmung das Tidalvolumen vorgegeben wird, ist VC-CSV nicht möglich.

Tab. 6.3 Klassifikation der Beatmungsformen nach Chatburn (2007). (Forts.)

Steuerungsarten	
Taktische Steuerung	<p>Drei Arten:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Anwender gibt <i>alle Beatmungsparameter</i> vor, z. B. Tidalvolumen, I:E-Verhältnis, Frequenz. Ändert sich die Situation des Patienten, muss der Anwender die Beatmungsparameter anpassen. Beispiele: Volumenkontrollierte, druckkontrollierte oder druckunterstützte Beatmung. 2. Anwender legt <i>einzelne Beatmungsparameter</i> fest, der Respirator steuert die Beatmung nach diesen vorgegebenen Bedingungen. Bsp.: CMV mit PLV (> 6.3.2), bei Erreichen des p_{\max} schaltet das Gerät auf dezelerierenden Flow, d. h. druckkontrollierte Beatmung. 3. Anwender legt lediglich <i>Grenzwerte</i> fest, der Respirator liefert Druck/Flow abhängig von diesen Einstellungen und den Einatembemühungen des Patienten (servo-gesteuert). Bsp.: ATC (> 7.3.2), PAV (> 6.3.7)
Strategische Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptiv, d. h. der Respirator variiert einzelne Beatmungsparameter. Bsp.: Bei der PRVC-Beatmung variiert der Respirator den Beatmungsdruck so, dass ein vorgegebenes Tidalvolumen erreicht wird. Bei manchen Beatmungsformen variiert die Frequenz, um ein eingestelltes I:E-Verhältnis zu ermöglichen. • Optimal, d. h. der Respirator variiert mehrere Beatmungsparameter, um eingestellte Vorgaben zu erreichen, z. B. ASV (> 6.3.10): AMV ist vorgegeben, Respirator variiert Tidalvolumen, Beatmungsfrequenz und -druck abhängig von der Patientensituation.
Intelligente Steuerung	Das Beatmungsgerät nutzt (nach Vorgaben des Benutzers) auf Expertenwissen basierende Modelle und steuert die Beatmung abhängig von diesen Modellen und der Grunderkrankung des Patienten. Bsp.: Intellivent-ASV® (> 6.3.10) und SmartCare™ (> 6.11.3).
Arbeits-Algorithmen („Arbeitsschritte“ während der Beatmung)	
Phasen-Variablen	Hier wird beschrieben, wie z. B. bei VC-IMV mit Unterstützung der assistierten Atemzüge die Unterstützung verabreicht wird, z. B. als Druckunterstützung (vorgegebener Druck), Volume assist (adaptive, d. h. sich verändernde Druckunterstützung), ATC (Automatische Tubuskompensation, servogesteuerte Unterstützung) oder Smartcare (automatisierte Entwöhnung, Steuerung durch Respirator).
Bedingungs-Variablen	Respirator steuert die Beatmung anhand von Vorgaben und reagiert auf Veränderungen, z. B. durch Applikation kontrollierter Atemzüge zur Vermeidung einer Hypoventilation, wenn der Patient ein vorgegebenes AMV nicht erreicht.
Komplexe Berechnungen	Hier wird beschrieben, mit welchen Rückkopplungen der Respirator arbeitet, z. B. Analyse von $etCO_2$, S_pO_2 und Änderungen der Lungenmechanik bei Intellivent-ASV® und entsprechende Steuerung der Beatmung anhand hinterlegter Algorithmen, die auf Expertenwissen beruhen (z. B. ARDS Network).

PFLEGEPRAXIS

Respirator-Standard-einstellung

In der Praxis hat es sich bewährt, **Standard-einstellungen** für die eingesetzten Respiratoren festzulegen, die bei Inbetriebnahme des Geräts zunächst eingestellt und zum frühestmöglichen Zeitpunkt auf die spezielle Patientensituation angepasst werden. So weiß jeder Mitarbeiter, wie welches Gerät einzustellen ist, und Fehleinstellungen werden vermieden.

Kontrollierte Beatmungsverfahren

DEFINITION

Kontrollierte Beatmung (auch *Continuous mandatory ventilation*, kurz *CMV*): Beatmungsform, bei der das Beatmungsgerät die Atemarbeit vollständig übernimmt.

Ein Trigger ist zwar zugeschaltet (> 6.2.5), für die Beatmung ist es jedoch nicht erforderlich, dass der Patient diesen auch auslöst.

Kontrollierte Beatmung erfolgt:

- **Volumenkontrolliert** (*Volume controlled-CMV*, kurz *VC-CMV*)
- **Druckkontrolliert** (*Pressure controlled-CMV*, kurz *PC-CMV* oder *PCV*)
- **Volumenkonstant-druckreguliert** (*Pressure regulated volume controlled*, kurz *PRVC*).

Kontrollierte Beatmung *mit PEEP* wird auch als **CPPV** (*Continuous positive pressure ventilation*) bezeichnet, kontrollierte Beatmung *ohne PEEP* (ZEEP, d. h. *Zero end-expiratory pressure*, wird fast nicht mehr durchgeführt) als **IPPV** (*intermittend positive pressure ventilation*).

Inversed-ratio ventilation (IRV) > 6.2.1

PFLEGEPRAXIS

Triggert ein kontrolliert beatmeter Patient häufig, ist zu überlegen, ob eine weniger invasive Beatmungsform gewählt werden kann, d. h. Wechsel von CMV zu IMV oder PSV bzw. CSV

Vorteile, Nachteile und Indikationen kontrollierter Beatmung

Die kontrollierte Beatmung hat zwei **Vorteile**, aus denen sich gleichzeitig die **Indikationen** für eine kontrollierte Beatmung ergeben:

- Der Sauerstoffverbrauch des Patienten wird auf ein Minimum reduziert (dies ist z. B. wichtig bei schwersten Gasaustauschstörungen, etwa im Rahmen eines ARDS)
- Überanstrengte Atemmuskulatur (etwa nach lang dauernden Entwöhnungsversuchen) kann sich unter kontrollierter Beatmung erholen.

Beide Vorteile können jedoch nur wirksam werden, wenn der Patient nicht unter der kontrollierten Beatmung erfolglose Atembemühungen unternimmt, da diese das Gegenteil bewirken würden (der Sauerstoffverbrauch steigt, eine Erholung der Atemmuskulatur kann nicht erfolgen) und zudem beim Patienten das Gefühl der Luftnot entstände (er versucht einzuatmen, bekommt aber keine Luft). Deshalb müssen Patienten häufig sediert und selten auch relaxiert werden, um eine kontrollierte Beatmung tolerieren zu können (Ausnahme: Patienten, die wegen ihrer Grunderkrankung, etwa einer Intoxikation oder eines schweren Schädel-Hirn-Traumas, nicht selbstständig atmen können).

Analgesie und Sedierung beim beatmeten Patienten > 6.9

Der **Nachteil** der kontrollierten Beatmung besteht vor allem darin, dass die Atemmuskulatur geschwächt wird, und zwar umso mehr, je länger die kontrollierte Beatmung andauert (Atemmuskulaturatrophie > 6.7.2). Daneben ist oft eine (tiefe) Sedierung, ggf. auch eine Relaxierung des Patienten mit allen damit verbundenen Nachteilen erforderlich. Da bei der kontrollierten Beatmung Zwerchfellaktivitäten des Patienten kaum vorhanden sind oder ganz fehlen, kann es vermehrt zu Atelektasen in den dorsobasalen Lungenabschnitten kommen. Dies

wiederum hat meist eine Verlängerung der gesamten Beatmungsdauer und der anschließenden Weaning-Phase zur Folge. Deshalb wird eine kontrollierte Beatmung nur solange wie unbedingt nötig eingesetzt, eine Anwendung von maximal 48 Std. sollte möglichst nicht überschritten werden.

Die spezifischen Nachteile und Gefahren einer volumen- bzw. druckkontrollierten Beatmung sind jeweils bei diesen Beatmungsformen beschrieben.

Beatmungsverfahren zur Unterstützung der Spontanatmung

DEFINITION

Bei **Beatmungsverfahren zur Unterstützung der Spontanatmung** erhält der Patient eine mehr oder weniger umfangreiche Unterstützung durch den Respirator, d. h. er leistet einen Teil der Atemarbeit selbst. Voraussetzung ist, dass der Patient den Trigger auslösen kann. Unterschieden in *Tidalvolumen-unterstützende*, *Atemminutenvolumen-unterstützende* und *adaptive* Verfahren. Abhängig vom gewählten Verfahren werden die Einatembemühungen des Patienten verschieden „beantwortet“.

Tidalvolumen-unterstützende Verfahren

Bei der **assistiert-kontrollierten Beatmung** (kurz A/C) wird jede Einatembemühung des Patienten mit einem voreingestellten Atemhub beantwortet:

- Triggert der Patient, erhält er Unterstützung entweder in Form eines eingestellten maschinellen Atemhubs (CMV siehe oben, PCV > 6.3.3; PRVC > 6.3.3).
- Triggert der Patient *nicht*, so erhält er die eingestellte kontrollierte Beatmung.

Bei der **PSV** triggert der Patient und erhält Unterstützung in Form des Anstiegs auf einen voreingestellten Beatmungsdruck (PSV), dabei kann der Patient die Atemfrequenz sowie das I:E-Verhältnis, Inspiration- und Expirationsdauer sowie Tidalvolumen bestimmen. Sonderformen sind die PSV-VG, bei der ein gewünschtes Tidalvolumen durch Anpassung des Inspirationsdrucks erreicht wird, sowie die Noisy-PSV, bei der die Druckunterstützung von Atemzug zu Atemzug variiert.

Atemminutenvolumen-unterstützende Verfahren

Bei **Atemminutenvolumen-unterstützenden Verfahren** wird es dem Patienten ermöglicht, zusätzlich zu den maschinellen Atemhüben spontan zu atmen (Kombination mit Druckunterstützung > 6.3.7):

- Bei **VC-SIMV** und **PC-SIMV** können maschinell eingestellte Atemzüge im Erwartungsfenster getriggert werden. Triggert der Patient nicht, wird nach Ablauf dieser Zeit ein voreingestellter Hub verabreicht. In der Zeit zwischen zwei maschinellen Hüben kann der Patient spontan atmen.
- Bei **BIPAP** und **APRV** kann der Patient sowohl auf dem PEEP- als auch auf dem höheren Druckniveau spontan dazuatmen können.

Adaptive Verfahren

Bei den **adaptiven Beatmungsverfahren** passt sich die Beatmungsunterstützung den Bedürfnissen des Patienten an (adaptiv = angepasst). Beispiele für adaptive Beatmungsverfahren sind (Intellivent) ASV (> 6.3.10), SmartCare/PS (> 6.11.3), PAV⁽⁺⁾ (> 6.3.7) sowie NAVA (> 6.3.9).

Hybride Beatmungsverfahren

Hybride Beatmungsverfahren (hybrid = vermischt, gebündelt) sind Kombinationen verschiedener Beatmungs- und Unterstützungsverfahren, d.h. hier werden die oben beschriebenen Verfahren kombiniert. Beispiele sind die Kombination von:

- BIPAP/APRV und/oder PSV bzw. ATC
- SIMV und/oder PSV bzw. ATC
- PSV und ATC.

Spezielle Beatmungsverfahren

Einziges, praktisch eingesetztes Verfahren dieser Gruppe ist die HFOV (Hochfrequenzoszillations-Beatmung > 6.3.10).

Vorteile und Nachteile von Beatmungsverfahren zur Unterstützung der Spontanatmung

Gegenüber der reinen kontrollierten Beatmung zeichnen sich die Verfahren zur Unterstützung der Spontanatmung durch folgende **Vorteile** aus:

- Da der Patient die Unterstützung synchron zu seinen Einatembemühungen erhält, hat er nicht das Gefühl, dem Respirator hilflos ausgeliefert zu sein (kein „Kampf gegen das Beatmungsgerät“). Daher ist i. d. R. eine weniger tiefe Sedierung ausreichend.
- Bei Verwendung eines Drucktriggers sinkt der Beatmungsdruck in der Triggerphase um die eingestellte Triggerschwelle ab. Dies verbessert den venösen Rückstrom zum Herzen (> 6.7.2).
- Einatembemühungen des Patienten müssen nicht unterdrückt werden, sondern bleiben erhalten. Dadurch bleibt die Atemmuskulatur – wenn auch evtl. nur in geringem Umfang – aktiv.
- Bei Triggerbemühungen des Patienten werden durch die Zwerchfellbewegungen die dorsobasalen Abschnitte der Lunge besser belüftet.

Nachteilig sind folgende Faktoren:

- Atmet der Patient mit einer hohen Frequenz (z. B. bei Unruhe, Schmerzen oder Durchgangssyndrom), kann es zu einer *Hyperventilation* kommen, da die eingestellte Atemfrequenz und das eingestellte Atemminutenvolumen (beides auf die Bedürfnisse des Patienten eingestellt) weit überschritten werden. Diese kann eine *respiratorische Alkalose* (> 1.5.2) verursachen.
- Die Tidalvolumina sind evtl. größer, als es einer lungenprotektiven Beatmung entspricht.
- Bei hoher Atemfrequenz reicht die Zeit zur Expiration evtl. nicht aus, um das Gas komplett abzuatmen. Dadurch kann es zum *Airtrapping* kommen (> 6.2.1).
- Der Patient hat wenig Einfluss auf das verabreichte Tidalvolumen, d. h. die Luftmenge des verabreichten Atemzugs entspricht evtl. nicht dem Bedürfnis des Patienten (maschineller Atemzug kann zu groß oder zu klein sein).

6.3.2 Volumenkontrollierte Beatmung

DEFINITION

Volumenkontrollierte Beatmung (*Volume-controlled CMV*, kurz **VC-CMV** oder **VCV**): Kontrollierte Beatmung, bei der das Tidalvolumen (Atemzugvolumen) sowie der zeitliche Ablauf des Atemzyklus am Respirator eingestellt und entsprechend der Einstellung verabreicht wird, sofern nicht zuvor am Respirator eingestellte Grenzwerte (z. B. für den Beatmungsdruck) überschritten werden. Meist wird das Volumen mit einem konstanten Flow (auch Rechteckflow) in der vorgegebenen Zeit verabreicht. Manche Respiratoren ermöglichen auch andere Flowformen (> 6.2.2).

Der Beatmungsdruck (Spitzen- und Plateaudruck) bei volumenkontrollierter Beatmung ergibt sich aus den vorgenommenen Einstellungen und dem Zustand von Atemwegen und Lunge des Patienten (Compliance und Resistance > 1.3.5).

Das Tidalvolumen stellt der Anwender entweder direkt am Respirator ein oder er stellt das Atemminutenvolumen und die Atemfrequenz ein und der Respirator errechnet daraus das Tidalvolumen (> 6.2.1).

Ablauf eines Atemzyklus bei volumenkontrollierter Beatmung

- Das eingestellte Tidalvolumen wird während der inspiratorischen Flowphase entsprechend dem eingestellten Flowmuster verabreicht.
- Der Beatmungsdruck steigt während der inspiratorischen Flowphase kontinuierlich an, bis am Ende der inspiratorischen Flowphase der *Beatmungsspitzen*druck erreicht ist (> Abb. 6.6).
- Ist eine inspiratorische Pause eingestellt, sind – nachdem das Tidalvolumen verabreicht wurde – in der eingestellten Zeit sowohl das Inspirations- als auch das Expirationsventil des Respirators geschlossen (Flow = 0). In dieser Phase verteilt sich das Atemgas gleichmäßig in der Lunge, dadurch fällt der Spitzendruck auf den *Plateaudruck* ab.
- Je niedriger der Flow gewählt ist, desto länger ist die inspiratorische Flowphase und desto kürzer ist die inspiratorische Pause.
- Die Expiration beginnt, wenn die voreingestellte Inspirationszeit (inspiratorische Flowphase plus insp. Pause) abgelaufen ist.
- Während der Expiration strömt das Atemgas aus der Lunge des Patienten. Auch für diesen Vorgang steht eine bestimmte Zeit zur Verfügung, die sich aus den Einstellungen ergibt (> 6.2.1). Bei Beatmung mit PEEP wird das Expirationsventil spätestens dann geschlossen, wenn der eingestellte PEEP erreicht ist, bei Beatmung ohne PEEP fällt der Druck auf den Atmosphärendruck ab.
- Ist das Ende der eingestellten bzw. errechneten Expirationszeit erreicht, beginnt die nächste Inspiration.

Beatmungsparameter

Am Respirator **eingestellt werden müssen**:

- **Tidal- bzw. Minutenvolumen** (abhängig vom verwendeten Respirator). Das Tidalvolumen beträgt i. d. R. 5–7 ml/kg IBW, das AMV 80–100 ml/kg IBW. Zielgröße für diese Volumina ist der pCO₂. Werden trotz hoher Frequenz Volumina benötigt, die zu einem hohen Beatmungsdruck führen, sollte auf eine druckkontrollierte Beatmung umgestiegen oder eine permissive Hyperkapnie in Betracht gezogen werden.
- **Frequenz**. Zielgröße ist auch hier der pCO₂, meist beträgt sie 8–18/Min. Wird die Frequenz (bei gleichem AMV) erhöht, muss beachtet werden, dass der Anteil der Totraumventilation am AMV zunimmt (> 1.3.4).
- **Atemzeitverhältnis**. Meist wird am Respirator die *Inspirationszeit* (Inspirationsdauer) in Sekunden oder % des Atemzyklus eingestellt, und die *Expirationszeit* errechnet sich aus der Zeitdauer des Ventilationszyklus abzüglich der Inspirationszeit (> 6.2.1). An manchen Respiratoren werden der Flow und das Tidal- bzw. Atemminutenvolumen eingestellt, daraus errechnen sich Inspirations- und Expirationsdauer.
 - Die *Inspirationsdauer* besteht aus *inspiratorischer Flowphase* und der *inspiratorischen Pause* (inspiratorische No-Flow-Phase). Beide werden entweder in Sekunden oder in % des Atemzyklus eingestellt. Physiologisch ist ein Atemzeitverhältnis (I:E-Verhältnis) von 1:1,5–1:2, ab einem Verhältnis von 1:1 spricht man von IRV (> 6.2.1). Während der Flowphase wird die Lunge mit Gas gefüllt, in der Pause

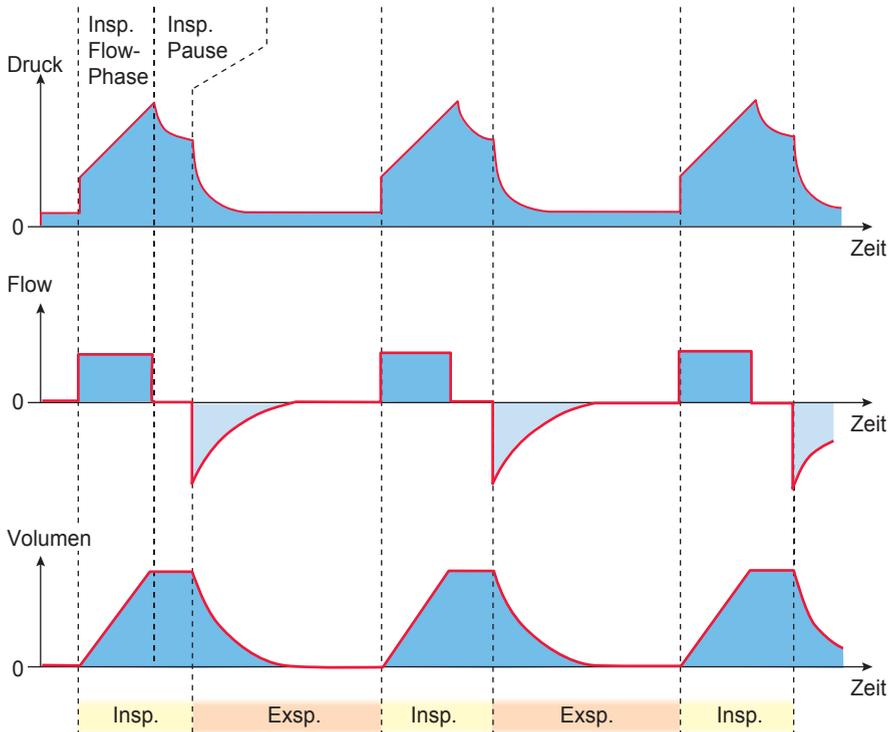


Abb. 6.6 Druck-, Flow- und Volumendiagramm bei volumenkontrollierter Beatmung mit PEEP und konstantem Flow. [A400]

verteilt sich das Gas in der Lunge, dies ist insbesondere bei regionalen Belüftungsstörungen sinnvoll

- Die *Expirationsdauer* muss so lang sein, dass das Gas vollständig aus der Lunge strömen kann.

- Flowmuster (> 6.2.2).
- Sauerstoffkonzentration.

Zusätzlich **eingestellt werden können:**

- PEEP (> 6.2.4)
- Trigger. Sobald ein Trigger ausgelöst wird, erhält der Patient einen maschinellen Hub, das I:E-Verhältnis verschiebt sich zugunsten der Inspiration
- Inspirationsanstiegszeit (> 6.2.2).

- Alarme für das **Minutenvolumen**. Einstellung der Grenzwerte anfangs ca. 20 % über und unter dem eingestellten Wert für das AMV, im weiteren Verlauf abhängig von der Patientensituation, um Fehlalarme zu vermeiden.
- Alarme für die Sauerstoffkonzentration. Wird häufig geräteseitig automatisch vorgenommen, ansonsten sollten die Grenzen 5 Vol.% über und unter dem eingestellten Wert liegen.
- Alarm für Atemfrequenz, um zu hohe Frequenz zu erkennen.
- Alarm für zu niedrigen und zu hohen PEEP.
- Diskonnektionsalarm.

Beatmungsgrenzwerte und Alarme

- **Obere Druckgrenze.** Einstellung ca. 10 mbar über dem gemessenen Spitzendruck, um frühzeitig Verschlechterungen der Lungenverhältnisse zu bemerken. Grundsätzlich möglichst < 35 mbar einstellen (> 6.7.1).

Vorteile und Nachteile volumenkontrollierter Beatmung

Die volumenkontrollierte Beatmung ist eine weitverbreitete, bekannte und (v. a. in der Anästhesie) vielfach benutzte Beatmungsform. Von **Vorteil** ist die Volumenkonstanz, d. h. das eingestellte Volumen wird verabreicht, auch wenn sich die Lungen-

verhältnisse verändern (z. B. wegen Umlagerung des Patienten). Die Volumenkonstanz ist gewährleistet, solange die obere Beatmungsdruckgrenze nicht erreicht wird.

Nachteilig ist, dass bei volumenkontrollierter Beatmung hohe Spitzendrücke entstehen können mit der Gefahr eines pulmonalen Baro- oder Volutraumas (> 6.7.1). Eine genaue Überwachung des Spitzendrucks sowie eine angemessene Einstellung der oberen Druckgrenze ist bei dieser Beatmungsform daher sehr wichtig. Zudem besteht bei geschädigter Lunge die Gefahr, dass Lungenareale mit normaler Resistance und Compliance überdehnt werden, während Areale mit erhöhter Resistance minderbelüftet werden.

Sonderform der volumenkontrollierten Beatmung: Pressure limited ventilation

Bei der *druckbegrenzten Beatmung (Pressure limited ventilation, kurz PLV)* stellt der Anwender neben der oberen Druckgrenze eine Drucklimitierung (p_{max}) ein. Wird im Verlauf der Inspiration diese Drucklimitierung erreicht, reduziert der Respirator den Inspirationsflow, um einen weiteren Anstieg des Beatmungsdrucks zu vermeiden. Durch die Reduktion des Inspirationsflows verlängert sich die inspiratorische Flowphase (> Abb. 6.7) zu Lasten der inspiratorischen Pausendauer (inspiratorische Pause > 6.2.1).

Kann das eingestellte Tidalvolumen auch mit dem verminderten Inspirationsflow nicht in der vorgegebenen Inspirationszeit (gesamte Inspirationszeit einschließlich inspiratorischer Pause) verabreicht werden, wird die Beatmung volumeninkonstant und der Respirator gibt Alarm.

6.3.3 Druckkontrollierte Beatmung

DEFINITION

Druckkontrollierte Beatmung (*Pressure-controlled CMV, kurz PC-CMV oder PCV*): Kontrollierte Beatmung, bei der ein am Beatmungsgerät eingestellter Druck aufgebaut und während der gesamten Inspirationsdauer in der Lunge aufrechterhalten wird. Der Flow ist anfänglich hoch und sinkt im Verlauf der Inspiration ab (dezellierender Flow). Das Tidalvolumen resultiert insbesondere aus dem eingestellten Druckniveau sowie der Compliance und Resistance von Atemwegen und Lunge, ist aber auch von der Inspirationsdauer abhängig.

Ablauf eines Atemzyklus bei druckkontrollierter Beatmung

- Zu Beginn der Inspiration wird das eingestellte Druckniveau rasch aufgebaut, d. h. die Lunge füllt sich mit Atemgas, das anfangs mit sehr hoher Geschwindigkeit anflutet. Mit zunehmender Füllung der Lunge sinkt der Flow und letztlich strömt nur noch so viel Atemgas nach wie nötig

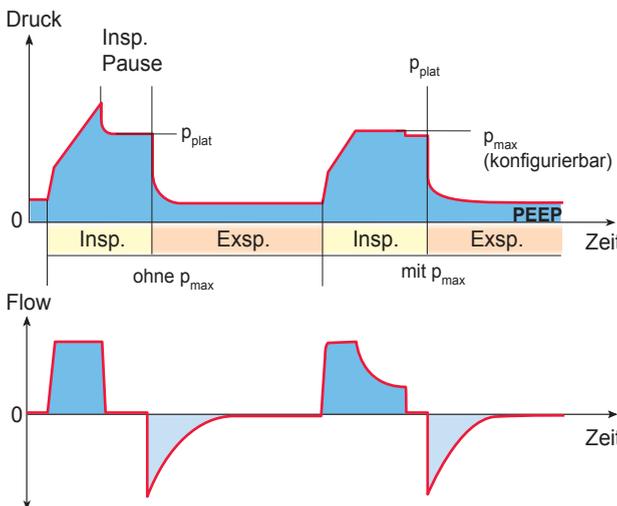


Abb. 6.7 Druck-Flowdiagramm, links ohne, rechts mit PLV. Sobald p_{max} erreicht ist, reduziert der Respirator den Inspirationsflow, um einen weiteren Anstieg des Beatmungsdrucks zu verhindern. Solange die Beatmungsdruckkurve am Ende der Inspiration noch ein kurzes Plateau zeigt, ist die Beatmung volumenkonstant. [A400]

ist, um den Druck bis zum Ende der eingestellten Inspirationszeit aufrechtzuerhalten. Daraus resultiert ein *decelerierender Flow* (➤ Abb. 6.8).

- Während der Expiration strömt das Atemgas aus der Lunge des Patienten. Bei Beatmung mit PEEP schließt das Expirationsventil sobald der eingestellte PEEP erreicht ist, bei Beatmung ohne PEEP (im druckkontrollierten Modus sehr selten) fällt der Druck auf den Atmosphärendruck ab.
- Ist das Ende der eingestellten bzw. errechneten Expirationszeit erreicht oder triggert der Patient, beginnt die nächste Inspiration.

Beatmungsparameter

Am Respirator **eingestellt werden müssen:**

- **Druckdifferenz** (Differenz zwischen endexpiratorischem Druck [i. d. R. PEEP] und inspiratorischem Druckniveau, auch *Driving force*). Die Druckdifferenz wird z. B. als Druckniveau über PEEP oder als P_{insp} eingestellt (dann PEEP von P_{insp} abziehen, um Druckdifferenz zu erhalten). Je höher die Druckdifferenz ist, umso höher ist das verabreichte Tidalvolumen. Angestrebt wird

der niedrigste notwendige Druck, um den Patienten zu beatmen. Wichtigstes Kriterium ist der $p_a\text{CO}_2$. Grundsätzlich sollte der Beatmungsdruck nicht über 30 mbar (inkl. PEEP) liegen. Die Druckdifferenz sollte 15 mbar nicht übersteigen. Sollten höhere Drücke erforderlich werden, ist eine permissive Hyperkapnie in Erwägung zu ziehen.

War der Patient zuvor volumenkontrolliert beatmet, eignet sich der Plateaudruck als Richtwert für die Einstellung der Druckdifferenz.

- **Atemfrequenz.** Zielgröße ist auch hier der $p\text{CO}_2$, meist beträgt die Atemfrequenz 8–18/Min.
- **Atemzeitverhältnis.** Die *Inspirationsdauer* besteht bei PC-CMV nur aus der inspiratorischen Flowphase. Das Einstellen einer inspiratorischen Pause ist *nicht* sinnvoll und daher an vielen Respiratoren auch nicht möglich, sobald im druckkontrollierten Modus beatmet wird. Die *Inspirationsdauer* wird entweder in Sekunden oder in % des Atemzyklus eingestellt. Die *Expirationsdauer* muss so lang sein, dass das Gas vollständig aus der Lunge strömen kann.
- Sauerstoffkonzentration.

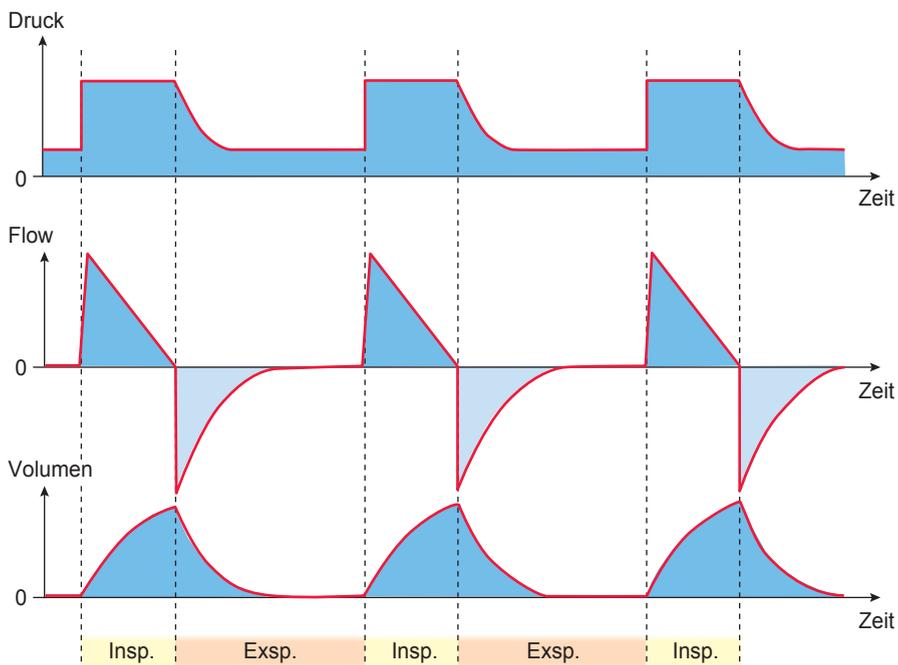


Abb. 6.8 Druck-, Flow- und Volumendiagramm bei druckkontrollierter Beatmung mit PEEP. [A400]

Zusätzlich **eingestellt werden können:**

- PEEP ($>$ 6.2.4)
- Trigger ($>$ 6.2.5)
- Flowanstiegszeit ($>$ 6.2.2).

Beatmungsgrenzwerte und Alarme

- Alarme für **Minutenvolumen**. Wichtige Überwachungsfunktion bei druckkontrollierter Beatmung (siehe Kasten). Einstellung bei Beatmungsbeginn ca. 20 % über und unter dem gewünschten Wert für das Atemminutenvolumen, später dann abhängig von der Patientensituation (Fehlalarme vermeiden). Bei manchen Respiratoren können auch Grenzwerte für das Atemhubvolumen (V_T) eingestellt werden.
- Obere Druckgrenze. Einstellung ca. 10 mbar über dem eingestellten Druckniveau (möglichst $<$ 30 mbar) um hohe Spitzendrücke (z. B. beim Husten des Patienten) zu vermeiden.
- Alarme für die Sauerstoffkonzentration. Häufig geräteseitig automatisch eingestellt, ansonsten 5 Vol.% über und unter dem eingestellten Wert
- Alarm für Atemfrequenz, um zu hohe Frequenz zu erkennen.
- Alarm für zu niedrigen und zu hohen PEEP.
- Diskonnektionsalarm.

Vorteile und Nachteile der druckkontrollierten Beatmung

Wesentlicher **Vorteil** der druckkontrollierten Beatmung ist der festgelegte Beatmungsspitzenwert. Dadurch ist die Gefahr eines pulmonalen Volu- oder Barotraumas geringer. Insbesondere in Kombination mit einem PEEP scheint die druckkontrollierte Beatmung für die Eröffnung und das Offenhalten atelektatischer Lungenbereiche sehr günstig zu sein (*Alveolar recruitment* mit nachfolgender verbesserter Oxygenierung $>$ 6.8.1). Die druckkontrollierte Beatmung wird daher häufig eingesetzt bei Lungenerkrankungen, insbesondere bei Erkrankungen des Lungenparenchyms, z. B. ARDS, Lungenkontusion oder Pneumonie.

Zudem können durch druckkontrollierte Beatmung Undichtigkeiten teilweise kompensiert werden, z. B. am Tubus bei Beatmung mit Tubus ohne Cuff (vor allem bei Kindern) oder Luftlecks bei Pneumothorax ($>$ 2.3.4).

WICHTIG

Tidalvolumen überwachen

Bei druckkontrollierter Beatmung ist das **Tidalvolumen** immer vom eingestellten Beatmungsdruck und der Inspirationsdauer sowie von Compliance und Resistance der Lunge abhängig. Ändern sich die Lungenverhältnisse des Patienten (z. B. auch durch Umlagerung oder Bronchialsekret), so ändern sich auch die Tidalvolumina, d. h. bei akuter Veränderung kann das Tidalvolumen rasch abfallen. Deshalb ist es bei druckkontrollierter Beatmung sehr wichtig, das **Tidal- und Atemminutenvolumen genau zu überwachen** und die Grenzwerte (insbesondere die untere AMV-Grenze) entsprechend einzustellen, um Veränderungen (Hyper- oder Hypoventilation) rasch zu bemerken.

An Respiratoren der neueren Generation ist die druckkontrollierte Beatmung zunehmend in einer Art BIPAP_{assist} realisiert, d. h. der Beatmung liegt vom Prinzip her eine BIPAP-Beatmung ($>$ 6.3.4) zugrunde, bei der der Patient auf dem oberen Druckniveau spontan dazuatmen kann. Im Gegensatz zum „echten“ BIPAP erfolgt jedoch der Wechsel vom oberen auf das untere Druckniveau unabhängig von den Atembemühungen des Patienten. Einatembemühungen des Patienten auf dem unteren Druckniveau lösen eine maschinelle Inspiration, also einen Wechsel vom unteren auf das obere Druckniveau aus.

Sonderformen der druckkontrollierten Beatmung: PRVC, IPPV-Autoflow[®] und APV

Die Beatmungsformen **IPPV-Autoflow[®]**, **PRVC** (*Pressure-regulated volume-controlled*, d. h. druckregulierte-volumenkontrollierte Beatmung, kurz DRVK) und **APV** (*Adaptive pressure ventilation*) sind druckkontrollierte Beatmungsformen, die sich dadurch auszeichnen, dass der Beatmungsdruck innerhalb eingestellter Grenzen vom Respirator automatisch den aktuellen Lungenverhältnissen so angepasst wird, dass ein eingestelltes Zieltidalvolumen erreicht wird (PC-CMV mit adaptiver Steuerung von Atemzug zu Atemzug, um das Tidalvolumen zu erreichen). So verbinden diese Beatmungsformen die Vorteile der druckkontrollierten mit denen der volumenkontrollierten Beatmung.

Heute bieten fast alle Hersteller von Beatmungsgeräten eine solche Beatmungsform mit jeweils eigenem Namen an. Die Beatmungsformen unterschei-

Sicherheit bei der Überwachung und Pflege des beatmeten Patienten



Das Wichtigste rund um die Überwachung und Pflege des beatmeten Patienten: fachlich anspruchsvoll, verständlich, mit anschaulichen Abbildungen
Beatmung auf Intensivstationen – und zunehmend auch zu Hause – ist ein zentrales Thema der Pflege. Die Autoren und Herausgeber dieses Buches haben langjährige praktische Erfahrung in Klinik und Weiterbildung.

Fachpflege Beatmung umfasst:

- alle grundlegenden Kenntnisse der Beatmungstechnik und der verschiedenen Beatmungsformen
- aktuelles Fachwissen zur Pflege des beatmeten Patienten
- die speziellen Pflegemaßnahmen im Bereich Intubation, Tracheotomie und Maskenbeatmung
- Anleitungen zum Umgang mit den gängigen Respiratoren

Mit diesem Buch sind Sie sowohl als Anfänger als auch als Fortgeschrittener auf der sicheren Seite:

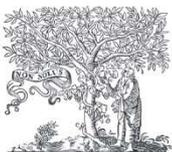
Denn es informiert Sie vollständig und leicht verständlich zu allen beatmungsspezifischen Pflegeethemen. Neu: Seine durchgängig vierfarbige Gestaltung macht es Ihnen noch leichter, Pflegemaßnahmen sicher vorzunehmen.

Fachpflege Beatmung

Schäfer S., et. al.

8. Aufl. 2019. 408 S., kt.

ISBN: 978-3-437-25197-9



ELSEVIER

elsevier.de

Empowering Knowledge