

Inhaltsverzeichnis

1	Anatomie des Respirationstraktes	25
1.1	Luftleitungssystem	25
1.2	Gasaustauschendes System	31
2	Physiologie des Respirationstraktes	35
2.1	Äußere und innere Atmung	35
2.2	Zusammensetzung der Atemgase	35
2.3	Respiratorischer Quotient	36
2.4	Atemmechanik	37
2.5	Übertragungen der Volumenänderungen des Thoraxraumes auf die Lunge	40
2.6	Unterschiede zwischen Spontanatmung und Beatmung	40
2.7	Druckgrößen in der Atemphysiologie und Beatmungstherapie	42
2.8	Atemmechanische Größen	51
2.8.1	Physikalische Grundlagen	51
2.8.2	Resistance – Maß für den Strömungswiderstand	53
2.8.3	Compliance – Maß für die Lungendehnbarkeit	59
	Statische Compliance	64
	Dynamische Compliance	64
	Effektive Compliance	65
	Spezifische Compliance	67
	Druck-Volumen-Diagramm	68
2.8.4	Atemarbeit	72
2.9	Pulmonaler Gasaustausch	78
2.10	Nachweis von Gasaustauschstörungen	86
2.11	Alveolo-arterielle Sauerstoffpartialdruckdifferenz	87
2.12	Oxygenierungsindex	90
2.13	Ventilations-/Perfusionsverhältnis	90
2.14	Lungendurchblutung	93
2.14.1	Verteilung der Lungendurchblutung	95
2.14.2	Regulation der Lungendurchblutung	98
2.14.3	Hypoxische pulmonale Vasokonstriktion (HPV)	104
2.15	Totraum – Totraumventilation	105
2.16	Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt	110

2.17	Kompartimentmodell der Lunge	117
2.18	Sauerstofftransport im Blut	122
2.18.1	Sauerstoffsättigung	122
2.18.2	Sauerstoffbindungskurve	123
2.18.3	Sauerstoffbindungskapazität	126
2.18.4	Sauerstoffgehalt	127
2.18.5	Arteriovenöse O_2 -Gehaltsdifferenz ($Ca-vDO_2$)	128
2.18.6	Sauerstofftransportkapazität (Sauerstoffangebot)	129
2.18.7	Sauerstoffverbrauch (Sauerstoffaufnahme)	130
2.18.8	Gemischt-venöse Sauerstoffsättigung	131
2.18.9	Sauerstoffextraktionsrate	132
2.18.10	Beziehung zwischen O_2 -Angebot und O_2 -Aufnahme – DO_2/VO_2 -Ratio	135
2.18.11	Kohlendioxid-Transport im Blut	136
2.19	Statische Lungenvolumina	138
2.20	Verschlussvolumen (Closing Volume) – Verschlusskapazität (Closing Capacity)	142
2.21	Dynamische Atemvolumina	143
2.22	Atemflusswerte (Fluss-Volumen-Diagramm)	146
2.23	Differenzialdiagnose zwischen obstruktiven und restriktiven Ventilationsstörungen	151
2.24	Präoperative pulmonale Risikoeinschätzung	154
2.25	Allgemeinanästhesie und Lungenfunktion	161
2.25.1	Faktoren der pulmonalen Gasaustauschstörung	162
2.25.2	Prävention intraoperativer Atelektasen	167
2.25.3	Messung der FRC beim beatmeten Patienten	170
2.26	Zusammenfassung der atemphysiologischen Kenngrößen beim Erwachsenen	173
2.27	Atemregulation	174
2.27.1	Physiologische Regelmechanismen	174
2.27.2	Pathologische Atmungstypen	176
2.28	Grundlagen des Säure-Basen-Haushaltes	178
3	Respiratorische Insuffizienz	189
3.1	Respiratorisches System	189
3.2	Atempumpe	189
3.3	Definition und Klinik der respiratorischen Insuffizienz	191

3.4	Pathophysiologie der postoperativen pulmonalen Funktionseinschränkung	194
3.5	Pathomechanismen der postoperativen und posttraumatischen respiratorischen Insuffizienz	198
3.6	Kenngrößen für die Indikation zur maschinellen Atemhilfe bei akuter respiratorischer Insuffizienz	199
4	Beatmungstechnik	201
4.1	Atemzyklus	201
4.2	Grafische Darstellung des Atemzyklus	204
4.2.1	Druck-Zeit-Diagramm bei volumenkontrollierter Beatmung	204
	Druck-Zeit-Diagramm bei Variation des Inspirationsflows	206
4.2.2	Interpretation typischer Druck-Zeit-Diagramme bei volumenkontrollierter Beatmung	207
4.2.3	Druck-Zeit-Diagramm bei druckkontrollierter Beatmung	209
4.2.4	Flow-Zeit-Diagramm	210
4.2.5	Interpretation typischer Flow-Zeit-Diagramme bei volumenkontrollierter Beatmung	211
4.2.6	Interpretation typischer Flow-Zeit-Diagramme bei druckkontrollierter Beatmung	213
4.2.7	Volumen-Zeit-Diagramm	216
4.2.8	Druck-Volumen-Schleife (Pressure-Volume-Loop)	216
	Interpretation der Druck-Volumen-Schleife bei volumenkontrollierter Beatmung	219
	Interpretation der Druck-Volumen-Schleife bei druckkontrollierter Beatmung	222
	Tracheale Druck-Volumen-Schleife – SpiroDynamics	224
4.3	Beatmungsmuster – Beatmungsformen	225
4.3.1	Definition: Beatmungsmuster	225
4.3.2	Definition: Beatmungsform (Atemhilfe)	229
	Klassifizierung der Beatmungsformen nach der Atemarbeit	229
4.3.3	Auswahl der Atemhilfe	230
4.3.4	Kontrollierte Beatmungsformen (CMV = Controlled Mechanical Ventilation= Continuous Mandatory Ventilation)	234
	Volumenkontrollierte Beatmung (VCV = Volume Controlled Ventilation)	236
	Drucklimitierte Beatmung (PLV = Pressure Limited Ventilation)	241
	Druckkontrollierte Beatmung (PCV = Pressure Controlled Ventilation)	242

	Druckregulierte volumenkonstante Beatmung (PRVC = Pressure Regulated Volume Controlled Ventilation)	249
4.3.5	Maßnahmen zur Verbesserung der Oxygenierung	252
	PIF: Maß für die Beatmungsinvasivität	252
	Inspiratorische Sauerstoffkonzentration	252
	Beatmung mit erhöhtem positivem endexpiratorischem Druck (PEEP = Positive Endexpiratory Pressure)	253
	Seufzer-Beatmung	272
	Beatmung mit umgekehrtem Atemzeitverhältnis (IRV = Inverse Ratio Ventilation)	273
	Messmanöver <Intrinsischer PEEP>	282
4.3.6	Augmentierte Beatmungsformen	284
	Assistierte-kontrollierte Beatmung (A/C = Assist-Control Ventilation)	284
	Intermittierende mandatorische Beatmung (IMV = Intermittent Mandatory Ventilation)	287
	Synchronisierte intermittierende mandatorische Beatmung (SIMV = Synchronized Intermittent Mandatory Ventilation)	288
	Mandatorische Mindest-Ventilation (MMV = Mandatory Minute Ventilation)	292
	Beatmungsoption „AutoFlow“	295
	Druckunterstützte Spontanatmung (ASB = Assisted Spontaneous Breathing)	298
	Druckunterstützte volumenkonstante Spontanatmung (VS = Volume Support)	306
	Beatmungsoption „Automode“	310
	Spontanatmung mit kontinuierlichem positivem Atemwegsdruck (CPAP = Continuous Positive Airway Pressure)	311
	Biphasic Positive Airway Pressure (BIPAP)	320
	Bi-Level VG	334
4.3.7	Zusätzliche Beatmungsoptionen	337
	Automatische Tubuskompensation (ATC = Automatic Tube Compensation)	337
	Proportionale druckunterstützte Spontanatmung (PPS = Proportional Pressure Support)	342
	Neurally Adjusted Ventilatory Assist (NAVA)	356
4.4	Seitengetrennte Beatmung (ILV = Independent Lung Ventilation)	367
4.5	Nicht-invasive Beatmung (NIV = Non-invasive Ventilation) . . .	370
5	Entwöhnung vom Respirator (Weaning)	394
5.1	Definition	394
5.2	Pathophysiologie der Entwöhnung vom Respirator	395

5.2.1	Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwöhnung (Allgemeine Weaning-Strategien)	395
5.2.2	Determinanten der erforderlichen Atemarbeit	396
	Patientenabhängige Faktoren	397
	Beatmungssystemabhängige Faktoren	405
5.3	Methoden der Entwöhnung vom Respirator (respiratorbezogene Weaning-Strategien)	408
5.3.1	Diskontinuierliches Weaning	408
5.3.2	Kontinuierliches Weaning	410
5.4	Entwöhnungsindizes („Predictors of Weaning Outcome“)	416
5.4.1	Hechelindex (RSBI)	417
5.4.2	Atemwegsokklusionsdruck (P_{0,1})	417
5.4.3	Maximale inspiratorische Kraft (MIP)	419
5.4.4	Tension-Time-Index (TTI)	419
5.4.5	Automatische Tubuskompensation (ATC)	420
5.5	Weaning-Protokolle	420
5.5.1	Nicht-invasive Beatmung als Weaning-Strategie	426
5.6	Automatische Entwöhnung vom Respirator	427
5.6.1	Smart Care	428
6	Nebenwirkungen der maschinellen Beatmung	434
6.1	Kardiovaskuläre Nebenwirkungen	434
6.1.1	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Vorlast des rechten und linken Ventrikels	435
6.1.2	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Nachlast des linken Ventrikels	437
6.1.3	Pathophysiologische Auswirkungen bei suffizientem und insuffizientem Myokard	439
6.1.4	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Nachlast des rechten Ventrikels	439
	Erhöhung der rechtsventrikulären Nachlast	439
	Senkung der rechtsventrikulären Nachlast	440
6.2	Renale Nebenwirkungen	441
6.3	Hepatale Nebenwirkungen und Splanchnikusdurchblutung	441
6.4	Zerebrovaskuläre Nebenwirkungen	442
6.5	Pulmonale Nebenwirkungen	445
6.5.1	Beatmungsassoziierte Lungenschädigung	445
6.5.2	Beatmungsinduzierte diaphragmale Dysfunktion	453
6.5.3	Sauerstofftoxizität	454

6.6	Pneumothorax und Thoraxdrainage	455
6.6.1	Pneumothorax	455
	Definition	455
	Formen des Pneumothorax	455
	Klinische Symptomatik	455
	Therapie	457
6.6.2	Thoraxdrainage	457
	Ein-Flaschen-System („klassische Bülaudrainage“)	457
	Zwei-Flaschen-System	458
	Drei-Flaschen-System	458
7	Beatmungsmonitoring	462
7.1	Pulsoxymetrie	462
7.2	Kapnometrie – Kapnografie	464
7.3	Erweitertes Monitoring	469
7.4	Monitoring der Atemmechanik	469
7.5	Maschinenmonitoring	469
7.5.1	Beatmungsdruck	469
7.5.2	Volumenüberwachung	471
7.5.3	Frequenzüberwachung	472
7.5.4	Apnoe-Ventilation	473
7.5.5	Inspiratorische Sauerstoffkonzentration	473
7.5.6	Atemgastemperatur	474
7.6	Alarmmeldungen	474
7.7	Elektrische Impedanztomografie (EIT)	475
8	Anfeuchtung und Erwärmung des Atemgases (Atemgaskonditionierung)	484
8.1	Physikalische Grundlagen	484
8.2	Physiologie – Pathophysiologie	486
8.3	Methoden zur Atemgaskonditionierung	489
8.3.1	Aktive Befeuchtungssysteme	489
8.3.2	Passive Befeuchtungssysteme	492
9	Physikalische Therapie – Atemtherapie	497
9.1	Inzentive Spirometrie (SMI = Sustained Maximal Inspiration)	498
	Funktionsprinzip	498

9.2	Oszillierende PEP-Systeme	499
	Definition	499
	Aufbau und Funktionsprinzip	500
9.3	Beatmungsinhalation	
	(IPPB = Intermittent Positive Pressure Breathing)	503
	Technik der Beatmungsinhalation	503
	Indikationen	505
10	Beatmungsstrategien bei verschiedenen Krankheitsbildern	506
10.1	ARDS (= Acute Respiratory Distress Syndrome)	506
10.1.1	Pathophysiologie und klinischer Verlauf	506
10.1.2	Beatmungsstrategien beim ARDS	518
	Konzept der lungenprotektiven Beatmung („Baby Lung Concept“)	518
	Berechnung der Inflektionspunkte („Inflection points“)	520
	Rekrutementmanöver – Konzept der offenen Lunge	524
	Permissive Hyperkapnie	533
10.1.3	Analosedierung	539
	Appendix	540
10.2	COPD und Asthma bronchiale	543
10.2.1	Definition und Pathophysiologie	543
10.2.2	Beatmungsform – Beatmungsmuster	548
10.2.3	Analosedierung	553
10.3	Schädel-Hirn-Trauma	554
10.3.1	Pathophysiologie	554
10.3.2	Beatmungsform – Beatmungsmuster	558
10.3.3	Analosedierung	560
10.4	Herzinsuffizienz	561
10.4.1	Pathophysiologie	561
10.4.2	Beatmungsstrategie bei Linksherzinsuffizienz und kardiogenem Lungenödem	563
10.4.3	Analosedierung	565
10.5	Pulmonalembolie – akute pulmonale Hypertonie	565
10.5.1	Pathophysiologie	565
10.5.2	Beatmungsstrategie bei akuter pulmonaler Hypertonie und Rechtsherzinsuffizienz	567

11	Additive Therapie bei akutem Lungenversagen (ARDS)	576
11.1	Lagerungstherapie – Kinetische Therapie	576
11.1.1	Bauchlagerung	576
11.1.2	Kontinuierliche laterale Rotationstherapie (KLRT)	585
11.1.3	Bauchlagerung versus kontinuierliche laterale Rotationstherapie	587
11.2	Inhalative Vasodilatoren	589
11.2.1	Stickstoffmonoxid – NO	589
11.2.2	Prostanoide	596
11.3	Flüssigkeitsmanagement	601
12	Spezielle Behandlungsstrategien in der Therapie des ARDS	609
12.1	Extrakorporale Gasaustauschverfahren	609
12.1.1	Extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO)	610
12.1.2	Pumpenfreie extrakorporale Lungenunterstützung zur CO ₂ -Elimination (Interventional Lung Assist [iLA])	623
12.1.3	Pumpenbetriebene extrakorporale Lungenunterstützung zur CO ₂ -Elimination (Decap-System)	630
12.1.4	Extrakorporale Decarboxylierung und Evidenz	633
12.1.5	Zusammenfassung: Extrakorporale Gasaustauschverfahren	633
12.2	Hochfrequenzbeatmung (High Frequency Ventilation – HFV)	634
12.2.1	Hochfrequenzüberdruckbeatmung (High Frequency Positive Pressure Ventilation [HFPPV])	635
12.2.2	Hochfrequenz-Jetbeatmung (High Frequency Jet Ventilation [HFJV])	636
12.2.3	Superponierte Hochfrequenz-Jetbeatmung (Superimposed High Frequency Jet Ventilation [SHFJV])	640
12.2.4	Hochfrequenzoszillationsbeatmung (High Frequency Oscillation Ventilation [HFOV])	652
12.3	Applikation von Surfactant	667
13	Weitere Therapieansätze in der Behandlung des akuten Lungenversagens	674
13.1	Partielle Flüssigkeitsbeatmung (Partial Liquid Ventilation – PLV)	674
13.2	Tracheale Gasinsufflation (TGI)	676

14	Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie	681
14.1	Anatomische und physiologische Besonderheiten des kindlichen Respirationstraktes	681
14.2	Indikationen für maschinelle Atemhilfen	689
14.3	Grundprinzipien der maschinellen Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie	691
14.3.1	Beatmungsparameter	691
14.3.2	Beatmungsformen – Beatmungsmuster	703
	Grundeinstellung des Respirators	707
14.3.3	Entwöhnung vom Respirator (Weaning)	713
14.4	Respiratoren für die maschinelle Beatmung in der Neonatologie	714
14.4.1	Leckagekompensation	718
15	Technologie der Beatmungsgeräte	721
15.1	Gasversorgung	721
15.2	Gasmischer	723
15.2.1	Druckgasmischer	724
15.2.2	Strömungsmischer (Frischgasmischer)	725
15.2.3	Injektormischer	728
15.3	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Steuerprinzip	728
15.4	Triggerung	731
15.5	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Antriebsprinzip	733
15.6	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Atemgas-Dosierprinzip (Funktionsprinzip)	734
15.6.1	Constant-Flow-System	735
15.6.2	Demand-Flow-System	737
15.6.3	Intermittierendes Constant-Flow-System (Flow-Zerhacker-Prinzip)	738
15.6.4	Atemgasdosierung über ansteuerbare Hochdruckdosierventile („High Pressure Servo-Ventile“)	739
15.6.5	Atemgasdosierung über einen Gasmischtank	741
15.6.6	Narkosesysteme	745
15.7	Atemsysteme für die intraoperative Beatmung	749
15.7.1	Komponenten eines Narkoserespirators	749
15.7.2	Klassifizierung der Atemsysteme	753
	Atemsysteme ohne Rückatmung (= Nicht-Rückatmungssysteme = halboffene Atemsysteme)	753

	Atemsysteme mit teilweiser Rückatmung (= halbgeschlossene Atemsysteme)	756
	CO ₂ -Absorber (Atemkalk)	761
	Narkosemittelverdunster	765
	Atemsysteme mit vollständiger Rückatmung (= geschlossene Atemsysteme)	780
15.8	Niedrigflussnarkosen	783
15.8.1	Verfahrensspezifische Besonderheiten	783
15.8.2	Praktische Durchführung von Niedrigflussnarkosen	790
	Niedrigflussnarkosen mit Lachgas	791
	Niedrigflussnarkosen ohne Lachgas	792
16	Hyperbare Oxygenierung	796
16.1	Physikalische Grundlagen	796
16.2	Pathophysiologische und biochemische Grundlagen	799
16.3	Gasblasenerkrankung – Dekompressionskrankheit (Caisson-Krankheit)	800
16.4	Behandlungsschemata	803
16.5	Technische Anlagen	804
	Sachverzeichnis	806