

Inhaltsverzeichnis

1	Anatomie des Respirationstrakts.	21
1.1	Luftleitungssystem	22
1.2	Gasaustauschendes System.	25
2	Physiologie des Respirationstrakts.	28
2.1	Äußere und innere Atmung	28
2.2	Zusammensetzung der Atemgase	28
2.3	Respiratorischer Quotient	28
2.4	Atemmechanik	29
2.4.1	Definition.	29
2.4.2	Zwerchfell	29
2.5	Übertragungen der Volumenänderungen des Thoraxraums auf die Lunge	31
2.6	Unterschiede zwischen Spontanatmung und Beatmung	31
2.6.1	Druck-Zeit-Diagramm	31
2.7	Druckgrößen in der Atemphysiologie und Beatmungstherapie	32
2.7.1	Partialdruck	32
2.7.2	Transmurale Druckdifferenz	35
2.7.3	Alveolardruck (= intrapulmonaler Druck).	35
2.7.4	Intrapleuraler Druck (= intrathorakaler Druck).	35
2.7.5	Transpulmonaler Druck	36
2.7.6	Transthorakaler Druck	37
2.7.7	Transrespiratorischer Druck	37
2.7.8	Volumenmessbedingungen.	37
2.7.9	Umrechnung zwischen den einzelnen Volumenmessbedingungen	39
1.3	Weiterführende Literatur	27
2.8	Atemmechanische Größen	39
2.8.1	Physikalische Grundlagen	39
2.8.2	Resistance – Maß für den Strömungswiderstand	41
2.8.3	Atemsynchrone Resistance-Änderungen.	43
2.8.4	Compliance – Maß für die Lungendehnbarkeit	44
2.8.5	Atemarbeit.	53
2.9	Pulmonaler Gasaustausch	57
2.9.1	Ventilation.	58
2.9.2	Diffusion.	59
2.9.3	Perfusion	61
2.10	Nachweis von Gasaustauschstörungen.	62
2.11	Alveoloarterielle Sauerstoffpartialdruckdifferenz	63
2.12	Oxygenierungsindex.	65
2.13	Ventilations-/Perfusionsverhältnis	65
2.14	Lungendurchblutung	67
2.14.1	Verteilung der Lungendurchblutung.	68
2.14.2	Regulation der Lungendurchblutung.	70
2.14.3	Hypoxische pulmonale Vasokonstriktion (HPV)	74

2.15	Totraum – Totraumventilation . .	75	2.23	Differenzialdiagnose zwischen obstruktiven und restriktiven Ventilationsstörungen.	103
2.15.1	Totraumquotient	75			
2.15.2	Totraumventilation	76			
2.15.3	Alveoläre Totraumventilation	76	2.24	Präoperative pulmonale Risikoeinschätzung	104
2.16	Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt	78	2.24.1	Präoperative Funktionsdiagnostik und Risikoeinschätzung vor allgemeinchirurgischen Eingriffen . .	106
2.16.1	Hepatopulmonales Syndrom – Sonderform eines intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts	81	2.24.2	Präoperative Funktionsdiagnostik und Risikoeinschätzung vor lungenchirurgischen Eingriffen. . .	107
2.17	Kompartimentmodell der Lunge .	82	2.25	Allgemeinanästhesie und Lungenfunktion.	110
2.18	Sauerstofftransport im Blut.	85	2.25.1	Faktoren der pulmonalen Gasaustauschstörung	110
2.18.1	Sauerstoffsättigung	85	2.25.2	Prävention intraoperativer Atelektasen	114
2.18.2	Sauerstoffbindungskurve	86	2.25.3	Messung der FRC beim beatmeten Patienten	115
2.18.3	Sauerstoffbindungskapazität	88	2.26	Atemphysiologische Kenngrößen beim Erwachsenen	118
2.18.4	Sauerstoffgehalt.	88	2.27	Atemregulation.	118
2.18.5	Arteriovenöse O ₂ -Gehaltsdifferenz (Ca-vDO ₂)	90	2.27.1	Physiologische Regelmechanismen	118
2.18.6	Sauerstofftransportkapazität (Sauerstoffangebot)	90	2.27.2	Pathologische Atmungstypen	120
2.18.7	Gemischt-venöse Sauerstoffsättigung.	91	2.28	Grundlagen des Säure-Basen-Haushalts	121
2.18.8	Zentralvenöse Sauerstoffsättigung (ScVO ₂)	92	2.28.1	Mathematische Grundlagen	121
2.18.9	Sauerstoffextraktionsrate.	92	2.28.2	Definitionen und Normalbereiche .	121
2.18.10	Beziehung zwischen O ₂ -Angebot und O ₂ -Aufnahme – DO ₂ /VO ₂ -Verhältnis.	94	2.28.3	Beurteilungen von Störungen des Säure-Basen-Haushalts.	123
2.18.11	Kohlendioxidtransport im Blut . . .	95	2.28.4	Physiologische Gegenregulationsmechanismen	124
2.19	Statische Lungenvolumina	96	2.29	Weiterführende Literatur.	125
2.20	Verschlussvolumen (Closing Volume) – Verschlusskapazität (Closing Capacity)	98			
2.21	Dynamische Atemvolumina.	99			
2.22	Atemflusswerte (Fluss-Volumen-Diagramm).	101			
2.22.1	Quotient der Atemgasflüsse.	101			
2.22.2	Konfiguration des Fluss-Volumen-Diagramms.	102			

3	Respiratorische Insuffizienz.....	127		
3.1	Respiratorisches System	127	3.5	Pathomechanismen der postoperativen und post-traumatischen respiratorischen Insuffizienz.....
3.2	Atempumpe.....	127		133
3.3	Definition und Klinik der respiratorischen Insuffizienz....	128	3.6	Kenngrößen für die Indikation zur maschinellen Atemhilfe bei akuter respiratorischer Insuffizienz.....
3.4	Pathophysiologie der postoperativen pulmonalen Funktionseinschränkung	130		133
3.4.1	Prophylaxe perioperativer pulmonaler Komplikationen.....	132	3.7	Weiterführende Literatur
				134
4	Beatmungstechnik.....	135		
4.1	Atemzyklus	135	4.4	Seitengetrennte Beatmung (ILV = Independent Lung Ventilation)
4.1.1	Phasenvariable	135		243
4.2	Grafische Darstellung des Atemzyklus	137	4.4.1	Definition.....
4.2.1	Druck-Zeit-Diagramm bei volumenkontrollierter Beatmung .	137	4.4.2	Indikationen
4.2.2	Druck-Zeit-Diagramm bei druckkontrollierter Beatmung	140	4.4.3	Wirkprinzip.....
4.2.3	Flow-Zeit-Diagramm	140		243
4.2.4	Volumen-Zeit-Diagramm	145	4.5	Nicht-invasive Beatmung (NIV = Non-invasive Ventilation)
4.2.5	Druck-Volumen-Schleife (Pressure-Volume-Loop)	145		245
4.3	Beatmungsmuster – Beatmungsformen	150	4.5.1	Definition.....
4.3.1	Definition: Beatmungsmuster	150	4.5.2	Vorteile der NIV (im Vergleich zur invasiven Beatmung)
4.3.2	Definition: Beatmungsform (Atemhilfe).....	153	4.5.3	Nachteile der NIV (im Vergleich zur invasiven Beatmung)
4.3.3	Auswahl der Atemhilfe	154	4.5.4	Voraussetzungen für NIV.....
4.3.4	Kontrollierte Beatmungsformen (CMV = Controlled Mechanical Ventilation = Continuous Mandatory Ventilation)	157	4.5.5	Indikationen
4.3.5	Maßnahmen zur Verbesserung der Oxygenierung	169	4.5.6	Kontraindikationen
4.3.6	Augmentierende Beatmungsformen	189	4.5.7	Nebenwirkungen
4.3.7	Zusätzliche Beatmungsoptionen ..	223	4.5.8	Beatmungszugang („Interface“) ...
			4.5.9	Adaptationsphase.....
			4.5.10	Auswahl der Atemhilfe und praktische Durchführung
			4.5.11	Erfolgskriterien der NIV.....
			4.5.12	Abbruch- bzw. Intubationskriterien bei NIV
			4.5.13	Prädiktoren des NIV-Versagens ...
			4.5.14	Weaning und NIV.....
			4.5.15	Sedierung.....
			4.5.16	Monitoring.....
			4.5.17	Helium-Sauerstoff-Mischung
				255

4.5.18	Intermittierende kontrollierte nächtliche Selbstbeatmung (ISB) – Heimbeatmung	255	4.6.3	Patient-Respirator-Asynchronie unter kontrollierter Beatmung	256
4.5.19	Wirkprinzip	255	4.6.4	Patient-Respirator-Asynchronie unter augmentierter Spontanatmung	258
4.5.20	Klinische Effekte	255	4.6.5	Klinische Folgen.	262
4.6	Patient-Respirator-Asynchronie.	256	4.6.6	Diagnose.	262
4.6.1	Synonym.	256	4.6.7	Therapeutische Maßnahmen.	263
4.6.2	Definition	256	4.7	Weiterführende Literatur.	264
5	Entwöhnung vom Respirator (Weaning)	268			
5.1	Definition	268	5.4.2	Atemwegsokklusionsdruck (P _{0,1}).	284
5.2	Pathophysiologie der Entwöhnung vom Respirator.	269	5.4.3	Maximale Inspiratorische Kraft (MIP)	285
5.2.1	Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwöhnung (allgemeine Weaning-Strategien)	269	5.4.4	Tension-Time-Index (TTI)	285
5.2.2	Determinanten der erforderlichen Atemarbeit	269	5.4.5	Automatische Tubuskompensation (ATC)	286
5.3	Methoden der Entwöhnung vom Respirator (respiratorbezogene Weaning-Strategien)	278	5.5	Weaning-Protokolle.	286
5.3.1	Diskontinuierliches Weaning.	278	5.5.1	Nicht-invasive Beatmung als Weaning-Strategie.	290
5.3.2	Kontinuierliches Weaning	279	5.6	Automatische Entwöhnung vom Respirator – Closed-Loop-Beatmungsverfahren.	291
5.4	Entwöhnungsindizes („Predictors of Weaning Outcome“) .	283	5.6.1	Smart Care/PS	293
5.4.1	Hechelindex (Rapid Shallow Breathing Index [RSBI])	283	5.6.2	Adaptive Support Ventilation (ASV)	294
6	Nebenwirkungen der maschinellen Beatmung	301	5.7	Weiterführende Literatur.	298
6.1	Kardiovaskuläre Nebenwirkungen	301			
6.1.1	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Vorlast des rechten und linken Ventrikels.	301	6.1.4	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Nachlast des rechten Ventrikels.	304
6.1.2	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Nachlast des linken Ventrikels	303	6.2	Renale Nebenwirkungen	305
6.1.3	Pathophysiologische Auswirkungen bei suffizientem und insuffizientem Myokard	304	6.3	Hepatale Nebenwirkungen und Splanchnikusdurchblutung	305
			6.4	Zerebrovaskuläre Nebenwirkungen	306

6.5	Pulmonale Nebenwirkungen . . .	308	6.6	Pneumothorax und Thorax- drainage	315
6.5.1	Beatmungsassoziierte Lungen- schädigung.	308	6.6.1	Pneumothorax	315
6.5.2	Beatmungsinduzierte diaphrag- male Dysfunktion.	314	6.6.2	Thoraxdrainage.	316
6.5.3	Sauerstofftoxizität	314	6.7	Weiterführende Literatur	318
7	Beatmungsmonitoring	320			
7.1	Pulsoxymetrie.	320	7.5.5	Inspiratorische Sauerstoff- konzentration	328
7.1.1	Funktionsprinzip	320	7.5.6	Atemgastemperatur	328
7.1.2	Grenzen und Fehlermöglichkeiten der Pulsoxymetrie	321	7.6	Alarmmeldungen.	328
7.2	Kapnometrie – Kapnografie	322	7.7	Elektrische Impedanztomografie (EIT)	328
7.2.1	Funktionsprinzip	322	7.7.1	Definition.	328
7.2.2	Physiologisches Kapnogramm	322	7.7.2	Funktionsprinzip	329
7.3	Erweitertes Monitoring	325	7.7.3	Visualisierung der Lungendehnung ("Lung-Stretch")	332
7.4	Monitoring der Atemmechanik .	325	7.7.4	Klinische Anwendung	334
7.5	Maschinenmonitoring (Respiratormonitoring)	325	7.7.5	Regionale versus globale Druck- Volumen-Beziehung.	338
7.5.1	Beatmungsdruck.	325	7.7.6	Limitationen und Kontra- indikationen	338
7.5.2	Volumenüberwachung	326	7.8	Weiterführende Literatur	338
7.5.3	Frequenzüberwachung	327			
7.5.4	Apnoeventilation	327			
8	Anfeuchtung und Erwärmung des Atemgases (Atemgaskonditionierung).	339			
8.1	Physikalische Grundlagen	339	8.3.1	Aktive Befeuchtungssysteme	343
8.2	Physiologie – Pathophysiologie. .	340	8.3.2	Passive Befeuchtungssysteme.	344
8.3	Methoden zur Atemgas- konditionierung	343	8.4	Weiterführende Literatur	346
9	Physikalische Therapie – Atemtherapie	348			
9.1	Inzentive Spirometrie (SMI = Sustained Maximal Inspiration)	348	9.2	Oszillierende PEP-Systeme	349
9.1.1	Funktionsprinzip	348	9.2.1	Definition.	349
			9.2.2	Aufbau und Funktionsprinzip.	349

9.3	Expiratory Positive Airway Pressure (EzPAP).....	351	9.4.2	Aufbau.....	353
			9.4.3	Funktionsprinzip.....	354
			9.4.4	Indikationen.....	355
9.3.1	Definition und Begriffserklärung ..	351	9.5	Beatmungsinhalation (IPPB = Intermittent Positive Pressure Breathing)	355
9.3.2	Aufbau.....	351			
9.3.3	Funktionsprinzip.....	351	9.5.1	Technik der Beatmungsinhalation .	355
9.3.4	Indikationen.....	353	9.5.2	Indikationen.....	356
9.4	Nasale High-Flow-Sauerstofftherapie (HFOT).....	353	9.6	Weiterführende Literatur.....	356
9.4.1	Definition	353			
10	Beatmungsstrategien bei verschiedenen Krankheitsbildern.....	357			
10.1	ARDS (= Acute Respiratory Distress Syndrome)	357	10.3.1	Pathophysiologie.....	393
10.1.1	Pathophysiologie und klinischer Verlauf.....	357	10.3.2	Beatmungsform – Beatmungsmuster.....	396
10.1.2	Beatmungsstrategien beim ARDS ..	365	10.3.3	Analgesedierung.....	398
10.1.3	Analgesedierung	382	10.4	Herzinsuffizienz.....	398
10.2	COPD und Asthma bronchiale... ..	384	10.4.1	Pathophysiologie.....	398
10.2.1	Definition und Pathophysiologie ..	384	10.4.2	Beatmungsstrategie bei Linksherzinsuffizienz und kardiogenem Lungenödem	399
10.2.2	Klinische Symptome.....	385	10.5	Pulmonalembolie – akute pulmonale Hypertonie	401
10.2.3	Klassifikation des Schweregrads der COPD	386	10.5.1	Pathophysiologie.....	401
10.2.4	Indikation zur maschinellen Atemhilfe	386	10.5.2	Beatmungsstrategie bei akuter pulmonaler Hypertonie und Rechtsherzinsuffizienz	401
10.2.5	Abbruch- bzw. Intubationskriterien bei NIV	387	10.5.3	Atemhilfen	402
10.2.6	Beatmungsform – Beatmungsmuster.....	388	10.5.4	Analgesedierung.....	403
10.2.7	Analgesedierung	392	10.6	Weiterführende Literatur.....	403
10.3	Schädel-Hirn-Trauma – erhöhter intrakranieller Druck	393			
11	Additive Therapie beim akuten Lungenversagen (ARDS)	408			
11.1	Lagerungstherapie – kinetische Therapie.....	408	11.1.4	Bauchlagerung versus kontinuierliche laterale Rotationstherapie ...	417
11.1.1	Oberkörperhochlagerung und Seitenlagerung.....	408	11.2	Inhalative Vasodilatoren.....	418
11.1.2	Bauchlagerung.....	408	11.2.1	Stickstoffmonoxid – NO	418
11.1.3	Kontinuierliche laterale Rotationstherapie (KLRT)	415	11.2.2	Prostanoide	423

11.3	Flüssigkeitsmanagement	426	11.3.3	Monitoring des Volumenstatus ...	428
11.3.1	Pathophysiologischer Hintergrund	426	11.3.4	Prognose – Letalität	428
11.3.2	Restriktives Flüssigkeitsmanagement	427	11.4	Weiterführende Literatur	428
12	Spezielle Behandlungsstrategien in der Therapie des akuten Lungenversagens	431			
12.1	Extrakorporale Gasaustauschverfahren	431	12.2	Hochfrequenzbeatmung (High Frequency Ventilation – HFV) ...	448
12.1.1	Definitionen	431	12.2.1	Definition	448
12.1.2	Extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO)	432	12.2.2	Formen der Hochfrequenzbeatmung	448
12.1.3	Pumpenfreie extrakorporale Lungenunterstützung zur CO ₂ -Elimination (Interventional Lung Assist [iLA])	441	12.3	Applikation von Surfactant	474
12.1.4	Extrakorporale Low-Flow-CO ₂ -Elimination am Nierenersatzverfahren	445	12.3.1	Klinische Auswirkungen einer Surfactant-Schädigung	474
12.1.5	Extrakorporale CO ₂ -Elimination und Evidenz	446	12.3.2	Klinische Wirkungen von exogen appliziertem Surfactant	474
12.1.6	Zusammenfassung: extrakorporale Gasaustauschverfahren	447	12.3.3	Surfactant-Präparate	475
			12.3.4	Dosierung	475
			12.4	Weiterführende Literatur	476
13	Weitere Therapieansätze in der Behandlung des akuten Lungenversagens	478			
13.1	Partielle Flüssigkeitsbeatmung (Partial Liquid Ventilation – PLV)	478	13.1.6	Nebenwirkungen	479
13.1.1	Definition	478	13.2	Tracheale Gasinsufflation (TGI) ..	479
13.1.2	Physikalisch-chemische Eigenschaften	478	13.2.1	Definition und Wirkprinzip	479
13.1.3	Formen der Flüssigkeitsbeatmung	478	13.2.2	Indikationen	481
13.1.4	Wirkprinzip	479	13.3	Weiterführende Literatur	481
13.1.5	Klinische Effekte	479			
14	Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie	482			
14.1	Anatomische und physiologische Besonderheiten des kindlichen Respirationstrakts	482	14.2	Indikationen für maschinelle Atemhilfen	486
14.1.1	Lungenvolumina und Atemfrequenz	483	14.2.1	Wahl der Tubusgröße für die endotracheale Intubation	487
14.1.2	Blutgase	486	14.2.2	Indikationen zur Intubation	488

14.3	Grundprinzipien der maschinellen Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie	488	14.4	Respiratoren für die maschinelle Beatmung in der Neonatologie .	502
14.3.1	Beatmungsparameter	488	14.4.1	Constant-Flow-Respirator	502
14.3.2	Beatmungsformen – Beatmungsmuster	495	14.4.2	Leckagekompensation	505
14.3.3	Grundeinstellung des Respirators ..	498	14.5	Weiterführende Literatur	505
14.3.4	Entwöhnung vom Respirator (Weaning)	501			
15	Technologie der Beatmungsgeräte	507			
15.1	Gasversorgung	507	15.6	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Atemgasdosierprinzip (Funktionsprinzip)	516
15.1.1	Zentrale Gasversorgung	507	15.6.1	Constant-Flow-System	516
15.1.2	Transportrespiratoren	508	15.6.2	Demand-Flow-System	517
15.2	Gasmischer	509	15.6.3	Intermittierendes Constant-Flow-System (Flow-Zerhacker-Prinzip) ..	518
15.2.1	Druckgasmischer	509	15.6.4	Atemgasdosierung über ansteuerbare Hochdruckdosierventile („High-Pressure-Servoventile“), ...	519
15.2.2	Strömungsmischer (Frischgasmischer)	509	15.6.5	Atemgasdosierung über Proportionalventile	520
15.2.3	Injektormischer	511	15.6.6	Narkosesysteme	523
15.3	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Steuerprinzip	512	15.7	Atemsysteme für die intraoperative Beatmung	526
15.3.1	Inspiratorische Steuerungen	512	15.7.1	Komponenten eines Narkoserespirators	526
15.3.2	Expiratorische Steuerungen	513	15.7.2	Klassifizierung der Atemsysteme ..	529
15.4	Triggerung	513	15.8	Niedrigflussnarkosen	550
15.4.1	Pneumatikabhängige Triggerung ..	514	15.8.1	Verfahrensspezifische Besonderheiten	550
15.4.2	Pneumatikunabhängige Triggerung	515	15.8.2	Praktische Durchführung von Niedrigflussnarkosen	555
15.5	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Antriebsprinzip	515	15.8.3	Xenonanästhesie	557
15.5.1	Antriebsarten (Energiequellen), ...	515	15.9	Weiterführende Literatur	559