

Inhaltsverzeichnis

1	Anatomie des Respirationstrakts	19
1.1	Luftleitungssystem	20
	Weiterführende Literatur	26
1.2	Gasaustauschendes System	23
2	Physiologie des Respirationstrakts	27
2.1	Äußere und innere Atmung	27
2.2	Zusammensetzung der Atemgase	27
2.3	Respiratorischer Quotient	27
2.4	Atemmechanik	28
2.4.1	Definition	28
2.4.2	Zwerchfell	29
2.5	Übertragungen der Volumenänderungen des Thoraxraums auf die Lunge	30
2.6	Unterschiede zwischen Spontanatmung und Beatmung	30
2.6.1	Druck-Zeit-Diagramm	30
2.7	Druckgrößen in der Atemphysiologie und Beatmungstherapie	31
2.7.1	Druckgrößen	31
2.7.2	Partialdruck	32
2.7.3	Transmurale Druckdifferenz	35
2.7.4	Alveolardruck (= intrapulmonaler Druck)	35
2.7.5	Intrapleuraler Druck (= intrathorakaler Druck)	35
2.7.6	Transpulmonaler Druck	36
2.7.7	Transthorakaler Druck	38
2.7.8	Transrespiratorischer Druck	38
2.7.9	Volumenmessbedingungen	39
2.7.10	Umrechnung zwischen den einzelnen Volumenmessbedingungen	40
2.8	Atemmechanische Größen	41
2.8.1	Physikalische Grundlagen	41
2.8.2	Resistance – Maß für den Strömungswiderstand	42
2.8.3	Atemsynchrone Resistanceänderungen	44
2.8.4	Compliance – Maß für die Lungendehnbarkeit	46
2.8.5	Atemarbeit	56
2.9	Pulmonaler Gasaustausch	60
2.9.1	Ventilation	61
2.9.2	Diffusion	62
2.9.3	Perfusion	65
2.10	Nachweis von Gasaustauschstörungen	66
2.11	Alveoloarterielle Sauerstoffpartialdruckdifferenz	67
2.12	Oxygenierungsindex	69
2.13	Ventilations-/Perfusionsverhältnis	69
2.14	Lungendurchblutung	71
2.14.1	Verteilung der Lungendurchblutung	73
2.14.2	Regulation der Lungendurchblutung	75
2.14.3	Hypoxische pulmonale Vasokonstriktion (HPV)	79
2.15	Totraum – Totraumventilation ..	80
2.15.1	Totraumquotient	80
2.15.2	Totraumventilation	81
2.15.3	Alveoläre Totraumventilation	82

2.16	Intrapulmonaler Rechts-Links-Shunt	84	2.23	Differenzialdiagnose zwischen obstruktiven und restriktiven Ventilationsstörungen	114
2.16.1	Hepatopulmonales Syndrom – Sonderform eines intrapulmonalen Rechts-Links-Shunts	89	2.24	Präoperative pulmonale Risikoeinschätzung	116
2.17	Kompartimentmodell der Lunge	89	2.24.1	Präoperative Funktionsdiagnostik und Risikoeinschätzung vor all-gemeinchirurgischen Eingriffen . . .	117
2.18	Sauerstofftransport im Blut	93	2.24.2	Präoperative Funktionsdiagnostik und Risikoeinschätzung vor lungenchirurgischen Eingriffen	118
2.18.1	Sauerstoffsättigung	93	2.25	Allgemeinanästhesie und Lungenfunktion	122
2.18.2	Sauerstoffbindungskurve	94	2.25.1	Faktoren der pulmonalen Gasaustauschstörung	122
2.18.3	Sauerstoffbindungskapazität	96	2.25.2	Prävention intraoperativer Atelektasen	126
2.18.4	Sauerstoffgehalt	96	2.25.3	Messung der FRC beim beatmeten Patienten	128
2.18.5	Arteriovenöse O ₂ -Gehaltsdifferenz (Ca-vDO ₂)	97	2.26	Atemphysiologische Kenngrößen beim Erwachsenen	130
2.18.6	Sauerstofftransportkapazität (Sauerstoffangebot)	98	2.27	Atemregulation	131
2.18.7	Sauerstoffverbrauch (Sauerstoffaufnahme)	99	2.27.1	Physiologische Regelmechanismen	131
2.18.8	Gemischt-venöse Sauerstoffsättigung (SvO ₂)	100	2.27.2	Pathologische Atmungstypen	132
2.18.9	Zentralvenöse Sauerstoffsättigung (ScVO ₂)	100	2.28	Grundlagen des Säure-Basen-Haushalts	134
2.18.10	Sauerstoffextraktionsrate	101	2.28.1	Mathematische Grundlagen	134
2.18.11	Beziehung zwischen O ₂ -Angebot und O ₂ -Aufnahme – DO ₂ /VO ₂ -Verhältnis	103	2.28.2	Definitionen und Normalbereiche	134
2.18.12	Kohlendioxidtransport im Blut	105	2.28.3	Beurteilungen von Störungen des Säure-Basen-Haushalts	136
2.19	Statische Lungenvolumina	106	2.28.4	Physiologische Gegenregulationsmechanismen	137
2.20	Verschlussvolumen (Closing Volume) – Verschlusskapazität (Closing Capacity)	109		Weiterführende Literatur	139
2.21	Dynamische Atemvolumina	110	3	Respiratorische Insuffizienz	141
2.22	Atemflusswerte (Fluss-Volumen-Diagramm)	111	3.1	Respiratorisches System	141
2.22.1	Quotient der Atemgasflüsse	112	3.2	Atempumpe	141
2.22.2	Konfiguration des Fluss-Volumen-Diagramms	113	3.2.1	Stille Hypoxämie	142
			3.3	Definition und Klinik der respiratorischen Insuffizienz	143

3.4	Pathophysiologie der postoperativen pulmonalen Funktionseinschränkung	145	3.6	Kenngrößen für die Indikation zur maschinellen Atemhilfe bei akuter respiratorischer Insuffizienz	149
3.4.1	Prophylaxe perioperativer pulmonaler Komplikationen.....	147		Weiterführende Literatur	150
3.5	Pathomechanismen der postoperativen und posttraumatischen respiratorischen Insuffizienz	148			
4	Beatmungstechnik	151			
4.1	Atemzyklus	151	4.4	Seitengetrennte Beatmung (ILV = Independent Lung Ventilation)	298
4.1.1	Phasenvariable	151	4.4.1	Definition.....	298
4.2	Grafische Darstellung des Atemzyklus	153	4.4.2	Indikationen	299
4.2.1	Druck-Zeit-Diagramm bei volumenkontrollierter Beatmung .	153	4.4.3	Wirkprinzip.....	299
4.2.2	Druck-Zeit-Diagramm bei druckkontrollierter Beatmung	156	4.5	Nicht-invasive Beatmung (NIV = Non-invasive Ventilation)	301
4.2.3	Flow-Zeit-Diagramm	157	4.5.1	Definition.....	301
4.2.4	Volumen-Zeit-Diagramm	162	4.5.2	Vorteile der NIV (im Vergleich zur invasiven Beatmung)	301
4.2.5	Druck-Volumen-Schleife (Pressure-Volume-Loop).....	163	4.5.3	Nachteile der NIV (im Vergleich zur invasiven Beatmung)	301
4.3	Beatmungsmuster – Beatmungsformen	168	4.5.4	Voraussetzungen für NIV.....	301
4.3.1	Definition: Beatmungsmuster	168	4.5.5	Indikationen	302
4.3.2	Systematik der Beatmungsformen (Atemhilfen)	171	4.5.6	Kontraindikationen	303
4.3.3	Auswahl der Atemhilfe (Beatmungsform)	181	4.5.7	Nebenwirkungen	304
4.3.4	Kontrollierte Beatmungsformen (CMV = Controlled Mechanical Ventilation = Continuous Mandatory Ventilation).....	182	4.5.8	Beatmungszugang („Interface“) . . .	304
4.3.5	Maßnahmen zur Verbesserung der Oxygenierung	195	4.5.9	Adaptationsphase	306
4.3.6	Augmentierende Beatmungsformen	220	4.5.10	Auswahl der Atemhilfe und praktische Durchführung	307
4.3.7	Kombination von augmentierenden Beatmungsformen	264	4.5.11	S/T-Modus	311
4.3.8	Zusätzliche Beatmungsoptionen ..	267	4.5.12	Erfolgskriterien der NIV.....	312
			4.5.13	Abbruch- bzw. Intubationskriterien bei NIV	312
			4.5.14	Prädiktoren des NIV-Versagens . . .	313
			4.5.15	Weaning und NIV	313
			4.5.16	Sedierung.....	313
			4.5.17	Monitoring.....	314
			4.5.18	Helium-Sauerstoff-Mischung	314
			4.5.19	Intermittierende kontrollierte nächtliche Selbstbeatmung (ISB) – Heimbeatmung.....	314
			4.5.20	Wirkprinzip.....	314
			4.5.21	Klinische Effekte.....	315

4.6	Patient-Respirator-Asynchronie	316	4.6.4	Patient-Respirator-Asynchronie unter augmentierter Spontanatmung	318
4.6.1	Synonyma	316	4.6.5	Klinische Folgen	323
4.6.2	Definition	316	4.6.6	Diagnose	324
4.6.3	Patient-Respirator-Asynchronie unter kontrollierter Beatmung	316	4.6.7	Therapeutische Maßnahmen	324
				Weiterführende Literatur	327
5	Entwöhnung vom Respirator (Weaning)				333
5.1	Definition	333	5.4.2	Hechelindex (Rapid Shallow Breathing Index [RSBI])	351
5.2	Pathophysiologie der Entwöhnung vom Respirator	334	5.4.3	Atemwegsokklusionsdruck (P _{0,1})	351
5.2.1	Voraussetzung für eine erfolgreiche Entwöhnung (allgemeine Weaning-Strategien)	334	5.4.4	Maximale inspiratorische Kraft (MIP)	352
5.2.2	Determinanten der erforderlichen Atemarbeit	334	5.4.5	Tension-Time-Index (TTI)	353
			5.4.6	Ösophagusdruckamplitude	353
			5.4.7	Zwerchfellsonografie	353
			5.4.8	Automatische Tubuskompensation (ATC)	355
5.3	Methoden der Entwöhnung vom Respirator (respiratorbezogene Weaning-Strategien)	345	5.5	Weaning-Protokolle	355
5.3.1	Methoden der Entwöhnung vom Respirator	345	5.5.1	Nicht-invasive Beatmung als Weaning-Strategie	360
5.3.2	Diskontinuierliches Weaning	345	5.6	Automatische Entwöhnung vom Respirator – Closed-Loop-Beatmungsverfahren	361
5.3.3	Kontinuierliches Weaning	346	5.6.1	Automatische Entwöhnung vom Respirator	361
5.4	Entwöhnungsindizes – Monitoring der inspiratorischen Atemmuskelanstrengung	350	5.6.2	Smart Care/PS	363
5.4.1	Entwöhnungsindizes („Predictors of Weaning Outcome“)	350	5.6.3	Adaptive Support Ventilation (ASV)	364
				Weiterführende Literatur	369
6	Nebenwirkungen der maschinellen Beatmung				372
6.1	Kardiovaskuläre Nebenwirkungen	372	6.1.4	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Nachlast des rechten Ventrikels	375
6.1.1	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Vorlast des rechten und linken Ventrikels	372	6.2	Renale Nebenwirkungen	377
6.1.2	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung auf die Nachlast des linken Ventrikels	374	6.3	Hepatale Nebenwirkungen und Splanchnikusdurchblutung	377
6.1.3	Pathophysiologische Auswirkungen der Beatmung bei suffizientem und insuffizientem Myokard	375	6.4	Zerebrovaskuläre Nebenwirkungen	378

6.5	Pulmonale Nebenwirkungen ...	381	6.6	Pneumothorax und Thoraxdrainage	396
6.5.1	Beatmungsinduzierte Lungenschädigung	381	6.6.1	Pneumothorax	396
6.5.2	Beatmungsinduzierte diaphragmale Dysfunktion	393	6.6.2	Thoraxdrainage.....	398
6.5.3	Sauerstofftoxizität	395		Weiterführende Literatur	400
7	Beatmungsmonitoring				402
7.1	Pulsoxymetrie	402	7.6.4	Apnoeventilation	416
7.1.1	Funktionsprinzip	403	7.6.5	Inspiratorische Sauerstoffkonzentration	416
7.1.2	Grenzen und Fehlermöglichkeiten der Pulsoxymetrie	403	7.6.6	Atemgastemperatur.....	416
7.2	Zeitbasierte Kapnometrie/ Kapnografie.....	404	7.7	Alarmmeldungen.....	416
7.2.1	Funktionsprinzip	404	7.8	Elektrische Impedanztomografie (EIT)	417
7.2.2	Physiologisches Kapnogramm	404	7.8.1	Definition.....	417
7.3	Volumenbasierte Kapnometrie/ Kapnografie.....	407	7.8.2	Funktionsprinzip	418
7.4	Erweitertes Monitoring	413	7.8.3	Visualisierung der Lungendehnung („Lung-Stretch“)	422
7.5	Monitoring der Atemmechanik .	413	7.8.4	Visualisierung von tidaler Rekrutierung.....	424
7.6	Maschinenmonitoring (Respiratormonitoring)	413	7.8.5	Visualisierung der regionalen Compliance („Pixel-Compliance“) .	425
7.6.1	Beatmungsdruck.....	413	7.8.6	Klinische Anwendung	426
7.6.2	Volumenüberwachung	414	7.8.7	Regionale versus globale Druck-Volumen-Beziehung.....	429
7.6.3	Frequenzüberwachung	415	7.8.8	Limitationen und Kontraindikationen	431
				Weiterführende Literatur	431
8	Anfeuchtung und Erwärmung des Atemgases (Atemgaskonditionierung).....				432
8.1	Physikalische Grundlagen	432	8.3	Methoden zur Atemgaskonditionierung.....	436
8.2	Physiologie – Pathophysiologie.	433	8.3.1	Aktive Befeuchtungssysteme	436
			8.3.2	Passive Befeuchtungssysteme.....	438
				Weiterführende Literatur	441
9	Physikalische Therapie – Atemtherapie				443
9.1	Inzentive Spirometrie (SMI = Sustained Maximal Inspiration).	443	9.2	Oszillierende PEP-Systeme	444
9.1.1	Funktionsprinzip	443	9.2.1	Definition.....	444
			9.2.2	Aufbau und Funktionsprinzip.....	444

9.3	Expiratory Positive Airway Pressure (EzPAP)	446	9.4.4	Funktionsprinzip	451	
	9.3.1	Definition und Begriffserklärung ..	446	9.4.5	Indikationen	453
	9.3.2	Aufbau	447	9.4.6	Klinische Anwendung	453
	9.3.3	Funktionsprinzip	447	9.4.7	ROX-Index	454
	9.3.4	Indikationen	449	9.5	Beatmungsinhalation (IPPB = Intermittent Positive Pressure Breathing)	456
9.4	Nasale High-Flow-Sauerstofftherapie (HFOT)	449	9.5.1	Technik der Beatmungsinhalation .	456	
	9.4.1	Synonyma	449	9.5.2	Indikationen	457
	9.4.2	Definition	449		Weiterführende Literatur	457
	9.4.3	Aufbau	449			
10	Beatmungsstrategien bei verschiedenen Krankheitsbildern	459				
10.1	ARDS (= Acute Respiratory Distress Syndrome)	459	10.3.2	Beatmungsform – Beatmungsmuster	518	
	10.1.1	Pathophysiologie und klinischer Verlauf	459	10.3.3	Analosedierung	520
	10.1.2	Beatmungsstrategien beim ARDS ..	469	10.4	Herzinsuffizienz	521
	10.1.3	Analosedierung	501	10.4.1	Pathophysiologie	521
10.2	COPD und Asthma bronchiale ..	505	10.4.2	Beatmungsstrategie bei Linksherzinsuffizienz und kardiogenem Lungenödem	522	
	10.2.1	Definition und Pathophysiologie ..	505	10.5	Pulmonalembolie – akute pulmonale Hypertonie	524
	10.2.2	Klinische Symptome	505	10.5.1	Pathophysiologie	524
	10.2.3	Klassifikation des Schweregrads der COPD	506	10.5.2	Beatmungsstrategie bei akuter pulmonaler Hypertonie und Rechtsherzinsuffizienz	525
	10.2.4	Indikation zur maschinellen Atemhilfe	506	10.5.3	Atemhilfen	525
	10.2.5	Abbruch- bzw. Intubationskriterien bei NIV	507	10.5.4	Analosedierung	526
	10.2.6	Beatmungsform – Beatmungsmuster	509	10.6	Volatile Sedierung	527
	10.2.7	Analosedierung	514	10.6.1	Funktionsprinzip	527
10.3	Schädel-Hirn-Trauma – erhöhter intrakranieller Druck	515	10.6.2	Klinische Anwendung	530	
	10.3.1	Pathophysiologie	515	10.6.3	Dosierung	531
					Weiterführende Literatur	531
11	Additive Therapie beim akuten Lungenversagen (ARDS)	538				
11.1	Lagerungstherapie – kinetische Therapie	538	11.1.2	Bauchlagerung	538	
	11.1.1	Oberkörperhochlagerung und Seitenlagerung	538	11.1.3	Kontinuierliche laterale Rotationstherapie (KLRT)	546
			11.1.4	Bauchlagerung versus kontinuierliche laterale Rotationstherapie	548	

11.2	Inhalative Vasodilatoren	549	11.3.2	Restriktives Flüssigkeitsmanagement	559
11.2.1	Stickstoffmonoxid – NO	549	11.3.3	Monitoring des Volumenstatus . . .	560
11.2.2	Prostanoide	554	11.3.4	Prognose – Letalität	561
11.3	Flüssigkeitsmanagement	558		Weiterführende Literatur	561
11.3.1	Pathophysiologischer Hintergrund	558			
12	Spezielle Behandlungsstrategien in der Therapie des akuten Lungenversagens				564
12.1	Extrakorporale Gasaustauschverfahren	564	12.2	Hochfrequenzbeatmung (High Frequency Ventilation [HFV]) . . .	589
12.1.1	Definitionen	564	12.2.1	Definition	589
12.1.2	Extrakorporale Membranoxygenierung (ECMO)	565	12.2.2	Formen der Hochfrequenzbeatmung	590
12.1.3	Pumpenfreie extrakorporale Lungenunterstützung zur CO ₂ -Elimination (Interventional Lung Assist [iLA])	580	12.3	Applikation von Surfactant	623
12.1.4	Extrakorporale Low-Flow-CO ₂ -Elimination am Nierenersatzverfahren	585	12.3.1	Klinische Auswirkungen einer Surfactant-Schädigung	623
12.1.5	Extrakorporale CO ₂ -Elimination und Evidenz	586	12.3.2	Klinische Wirkungen von exogen appliziertem Surfactant	623
12.1.6	Zusammenfassung: extrakorporale Gasaustauschverfahren	587	12.3.3	Surfactant-Präparate	624
			12.3.4	Dosierung	624
				Weiterführende Literatur	625
13	Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie				628
13.1	Anatomische und physiologische Besonderheiten des kindlichen Respirationstrakts	628	13.3.1	Beatmungsparameter	635
13.1.1	Lungenvolumina und Atemfrequenz	630	13.3.2	Beatmungsformen – Beatmungsmuster	643
13.1.2	Blutgase	632	13.3.3	Grundeinstellung des Respirators .	647
13.2	Indikationen für maschinelle Atemhilfen	633	13.3.4	Entwöhnung vom Respirator (Weaning)	650
13.2.1	Wahl der Tubusgröße für die endotracheale Intubation	634	13.4	Respiratoren für die maschinelle Beatmung in der Neonatologie .	651
13.2.2	Indikationen zur Intubation	635	13.4.1	Constant-Flow-Respirator	651
13.3	Grundprinzipien der maschinellen Beatmung in der Neonatologie und Pädiatrie	635	13.4.2	Leckagekompensation	654
				Weiterführende Literatur	655

14	Technologie der Beatmungsgeräte	656		
14.1	Gasversorgung	656	14.6	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Atemgasdosierprinzip (Funktionsprinzip)
14.1.1	Zentrale Gasversorgung.....	656		665
14.1.2	Transportrespiratoren.....	657	14.6.1	Constant-Flow-System
14.2	Gasmischer	658	14.6.2	Demand-Flow-System
14.2.1	Druckgasmischer.....	658	14.6.3	Intermittierendes Constant-Flow-System (Flow-Zerhacker-Prinzip) ..
14.2.2	Strömungsmischer (Frischgasmischer)	658	14.6.4	Atemgasdosierung über ansteuerbare Hochdruckdosierventile („High-Pressure-Servoventile“). . . .
14.2.3	Injektormischer.....	661	14.6.5	Atemgasdosierung über Proportionalventile.....
14.3	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Steuerprinzip	661	14.6.6	Narkosesysteme.....
14.3.1	Inspiratorische Steuerungen	662	14.7	Atemsysteme für die intraoperative Beatmung
14.3.2	Expiratorische Steuerungen.....	662		679
14.4	Triggerung	663	14.7.1	Komponenten eines Narkose-respirators
14.4.1	Pneumatikabhängige Triggerung ..	663	14.7.2	Klassifizierung der Atemsysteme ..
14.4.2	Pneumatikunabhängige Triggerung	664	14.8	Niedrigflusnarkosen
14.5	Klassifizierung der Respiratoren nach dem Antriebsprinzip	665		705
14.5.1	Antriebsarten (Energiequellen)....	665	14.8.1	Verfahrensspezifische Besonderheiten
			14.8.2	Praktische Durchführung von Niedrigflusnarkosen
				Weiterführende Literatur
				711 714
15	Hyperbare Oxygenierung	715		
15.1	Physikalische Grundlagen	715	15.4	Nebenwirkungen und Komplikationen der HBO-Therapie
15.1.1	Gesetz von Dalton	715		720
15.1.2	Gesetz von Henry	715	15.4.1	Kompressionsphase
15.1.3	Gesetz von Boyle-Mariotte.....	717	15.4.2	Isopressionsphase
15.2	Pathophysiologische und biochemische Grundlagen	717	15.4.3	Dekompressionsphase
15.2.1	Dekompressionskrankheit (Caisson-Krankheit)	719	15.5	Kontraindikationen für eine HBO-Therapie
15.3	Indikationen für eine HBO-Therapie	720		721
			15.6	Behandlungsschemata
				721
			15.7	Technische Anlagen
				722
				Weiterführende Literatur
				722
	Sachverzeichnis			724