



Reinhard Larsen

Wissens-Check: Anästhesie für die Fachpflege

Zum Wiederholen:
Kompakt und übersichtlich

EBOOK INSIDE

 Springer

Wissens-Check: Anästhesie für die Fachpflege

Reinhard Larsen

Wissens-Check: Anästhesie für die Fachpflege

Zum Wiederholen: Kompakt und übersichtlich

Reinhard Larsen
Homburg, Saarland, Deutschland

ISBN 978-3-662-59493-3 ISBN 978-3-662-59494-0 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59494-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über ► <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Fotonachweis Umschlag: © AntonioDiaz/stock.adobe

Planung/Lektorat: Ulrike Hartmann

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Vorwort

Dieses Buch ist eine kompakte und prägnante Darstellung der gesamten praktischen Anästhesie für die Fachpflege. Es enthält zum einen das erforderliche Wissen für die Prüfungsvorbereitung, zum anderen das Handwerkszeug und die Leitlinien für die praktische Tätigkeit der bereits qualifizierten Pflegekräfte im OP und am Patienten. Auf theorielastige Inhalte und Basiswissen wurde dagegen verzichtet.

Um die Freude an der Wiederholung nicht zu beeinträchtigen und das Verständnis für Zusammenhänge zu verbessern, wird der weithin übliche Telegrammstil von Repetitorien bzw. Wiederholungsbüchern vermieden. Stattdessen werden die Leser in straffer Form, aber dennoch umfassend und in aller Klarheit, durch die allgemeine und spezielle Anästhesie geleitet.

Es ist mir ein besonderes Anliegen, Frau Ulrike Hartmann und Frau Sirka Nitschmann vom Springer Verlag für ihr niemals nachlassendes Engagement, ihre kompetente fachlich-didaktische Beratung und die immer vergnügliche Zusammenarbeit herzlich zu danken.

Reinhard Larsen
Homburg
im Mai 2020

Inhaltsverzeichnis

I Grundlagen

1	Autonomes Nervensystem (ANS)	3
2	Herz, Kreislauf und Hämodynamik	9
3	Atmung	17
4	Blutgase: O ₂ und CO ₂	23
5	Säure-Basen-Haushalt (SBH)	29
6	Blutgerinnung	35

II Anästhetika und Adjuvanzien

7	Inhalationsanästhetika	47
8	Intravenöse Anästhetika und Benzodiazepine	57
9	Opioide	65
10	Muskelrelaxanzien	73
11	Lokalanästhetika	83
12	Kardiovaskuläre Medikamente	93

III Anästhesie: Basics und Tools

13	Präoperative Einschätzung, Vorbereitung und Prämedikation	105
14	Narkosegeräte und Narkosesysteme	117
15	Atemwegsmanagement	123
16	Intraoperative Beatmung	141
17	Überwachung des anästhesierten Patienten	145

18	Intraoperativer Flüssigkeitersatz	157
19	Blutprodukte und Blutersatz	163
20	Der Anästhesiearbeitsplatz	177
21	Der Patient im Einleitungsraum	183
22	Lagerung zur Operation	189

IV Anästhesieverfahren

23	Allgemeinanästhesie	195
24	Spinalanästhesie	205
25	Periduralanästhesie	221
26	Regionale Nervenblockaden	233

V Patienten mit Begleiterkrankungen

27	Kardialer Risikopatient	249
28	Der pulmonale Risikopatient	263
29	Diabetes mellitus	271
30	Leber- und Nierenerkrankungen	277
31	Störungen des Wasser- und Elektrolythaushalts	281
32	Neurologische Erkrankungen und Suchtstörungen	291
33	Obstruktive Schlafapnoe (OSA)	299

VI Besondere Altersgruppen: Jung und Alt

34	Kinderanästhesie	305
35	Geriatrische Patienten	341

VII Spezielle Anästhesie

36	Allgemein- und Viszeralchirurgie.....	351
37	Adipositas permagna und Adipositaschirurgie	365
38	Gynäkologie	371
39	Schwangerschaft und Geburtshilfe	375
40	HNO	397
41	MKG- und Zahnchirurgie	407
42	Augenoperationen	413
43	Urologie	417
44	Orthopädie und Unfallchirurgie.....	425
45	Polytrauma und Schockraumversorgung	433
46	Gefäßchirurgie – Aorta, periphere Gefäße und Karotis.....	443
47	Herzchirurgie.....	451
48	Thoraxchirurgie	471
49	Neurochirurgie	481
50	Ambulante Anästhesie	497

VIII Notfälle und Zwischenfälle

51	Narkosezwischenfälle und Komplikationen	505
52	Schock.....	515
53	Reanimation im OP	519

IX Nach der Narkose

54 **Aufwachzone**..... 531

55 **Postoperative Schmerztherapie**..... 545

Serviceteil

Stichwortverzeichnis..... 559

Grundlagen

Inhaltsverzeichnis

- Kapitel 1 Autonomes Nervensystem (ANS) – 3
- Kapitel 2 Herz, Kreislauf und Hämodynamik – 9
- Kapitel 3 Atmung – 17
- Kapitel 4 Blutgase: O_2 und CO_2 – 23
- Kapitel 5 Säure-Basen-Haushalt (SBH) – 29
- Kapitel 6 Blutgerinnung – 35



Autonomes Nervensystem (ANS)

Inhaltsverzeichnis

- 1.1 In Kürze – Grundlagen – 4
- 1.2 Autonomes bzw. vegetatives Nervensystem – 4
 - 1.2.1 Sympathisches Nervensystem – 5
 - 1.2.2 Pharmakologie des sympathischen Nervensystems – 6
 - 1.2.3 Parasympathisches Nervensystem – 6
 - 1.2.4 Pharmakologie des parasympathischen Nervensystems – 7

1.1 In Kürze – Grundlagen

Autonomes Nervensystem

Nervensystem, dass nicht dem Willen unterliegt, sondern autonom funktioniert.

Andere Bezeichnungen für das autonome Nervensystem sind: vegetatives Nervensystem oder viszerales Nervensystem.

■ Neuron

Das Neuron ist die Nervenzelle mit ihren Fortsätzen, den Dendriten und den Neuriten. Die Nervenzelle verfügt über 2 grundlegende Eigenschaften:

- Sie ist erregbar
- Sie leitet Erregungen weiter

Die Dendriten sind Fortsätze der Nervenzellen, die Erregungen empfangen, Neuriten sind dagegen Fortsätze, die (elektrische) Erregungen weiterleiten, entweder an eine andere Nervenzelle oder an ein Erfolgsorgan, z. B. Muskel, Drüse usw.

■ ■ Arten von Neuronen

- Sensible (= afferente)
- Motorische (= efferente)
- Sympathische
- Parasympathische

■ Synapse

In der Synapse wird die elektrische Erregung mit Hilfe eines Transmitters von einem Neuron auf ein anderes übertragen. In der Synapse werden die Erreger nicht nur übertragen, sondern auch integriert, d. h. verstärkt oder abgeschwächt und auf einen anderen Weg umgeschaltet.

■ Transmitter – Botenstoffe im Nervensystem

Einzelne Neurone sind durch den **synaptischen Spalt** voneinander getrennt. Den synaptischen Spalt kann die Erregung nicht di-

rekt überspringen, sondern nur mit Hilfe des Transmitters. Der **Transmitter** befindet sich in präsynaptischen Bläschen, aus denen er durch den eintreffenden Erregungsimpuls freigesetzt wird. Der Transmitter fließt dann durch den Spalt zur Synapse und überträgt den elektrischen Impuls.

Die wichtigsten Neurotransmitter im ZNS und im peripheren Nervensystem

- Acetylcholin
- Katecholamine: Dopamin, Adrenalin, Noradrenalin
- Serotonin und Histamin
- GABA (Gamma-Aminobuttersäure), Aspartat, Glutamat, Glycin
- Adenosintriphosphat (ATP)
- Neurokinine A und B, Substanz P
- Endorphine, Enkephaline und Dynorphin

1.2 Autonomes bzw. vegetatives Nervensystem

Das autonome – oder auch vegetative bzw. viszerale – Nervensystem innerviert Herz, Blutgefäße, Drüsen und die glatte Muskulatur aller Organe, jedoch nicht die quergestreifte Muskulatur. Es steuert die Körperfunktionen autonom, d. h. unabhängig vom Willen und vom Bewusstsein.

Für die Anästhesie ist das autonome Nervensystem von besonderer Bedeutung, weil seine Funktionen durch die meisten Anästhesiesubstanzen, aber auch durch den operativen Eingriff erheblich beeinflusst werden können.

■ Anteile

Das autonome Nervensystem besteht aus drei Anteilen:

- Sympathikus
- Parasympathikus
- Enterisches System

Die Wirkungen von Sympathikus und Parasympathikus sind häufig entgegengesetzt: der Sympathikus aktiviert in der Regel die Organfunktion, der Parasympathikus setzt sie herab:

- **Sympathikus** = Kampf und Flucht
- **Parasympathikus** = Ruhe und Verdauung

Enterisches Nervensystem Das enterische Nervensystem ist ein komplexes Geflecht aus Neuronen, das den Magen-Darm-Trakt durchzieht und u. a. die Darmmotilität, die Sekretion und Absorption, die gastrointestinale Durchblutung und die immunologischen Funktionen des Magen-Darm-Trakts steuert.

Autonomes Nervensystem

— Steuerzentren

- Parasympathikus und Sympathikus werden von Zentren im Gehirn gesteuert. Höchstes Zentrum ist das limbische System, niedrigstes das Rückenmark
- Das limbische System steuert den emotionalen Antrieb
- Der Hypothalamus ist das wichtigste Steuerzentrum vegetativer Funktionen
- Das Rückenmark steuert spinale Reflexe
- In den Zielorganen werden die Befehle per Signal ausgeführt
- Die vegetativen Bahnen bestehen aus 2 Neuronen

— Vegetative Nervenbahnen

- Bestehen aus 2 hintereinander geschalteten Neuronen:
 - Die Zellkörper des 1. sympathischen Neurons liegen im thorakolumbalen Rückenmark, die Zellkörper des 1. parasympathischen Neurons im Hirnstamm und im sakralen Rückenmark
 - Die Zellkörper des 2. Neurons liegen in den sympathischen und

parasympathischen Ganglien (= vegetative Ganglien)

- Die sympathischen Ganglien liegen in der Nähe des Rückenmarks, die parasympathischen in der Nähe oder Wand ihrer Zielorgane

1.2.1 Sympathisches Nervensystem

Das sympathische Nervensystem enthält nur efferente Fasern, d. h. Fasern, die den Impuls von den Steuerzentren zu den Zielorganen leiten. **Noradrenalin** ist der Überträgerstoff für den Impuls von den postganglionären Neuronen auf die peripheren Zielorgane (Effektoren). Postganglionäre Ganglien werden deshalb auch als **adrenerg** bezeichnet. Zu den sympathischen Ganglien gehört auch das **Nebennierenmark**. Hier werden die Katecholamine Noradrenalin und Adrenalin gebildet und freigesetzt. Sie vermitteln die „Kampf- oder Fluchtreaktion“, d. h. sie aktivieren den Kreislauf und den Stoffwechsel.

■ Adrenerge Rezeptoren

- α_1 - und α_2 -Rezeptoren
- β -Rezeptoren: 3 Typen: β_1 , β_2 und β_3

■ Postganglionäre adrenerge Überträgerstoffe

- Noradrenalin
- Adrenalin
- Dopamin

■ Präganglionärer adrenerger Überträgerstoff

- Acetylcholin (!)

Noradrenalin und Adrenalin – Rezeptorwirkungen

- **Herz:** β_1 -Rezeptoren steigern die Herzfrequenz, die Kontraktionskraft und die Leitungsgeschwindigkeit nehmen zu,

1

ebenso die allgemeine Erregbarkeit, die Erschlaffungszeit wird verkürzt

— **Blutgefäße:**

- α_1 -Rezeptoren: Vasokonstriktion, Blutdruckanstieg
- β_2 -Rezeptoren: Vasodilatation (Transmitter nur Adrenalin)

— **Lunge:** β_2 -Rezeptoren bewirken Bronchodilatation (v. a. Adrenalin)

— **Magen-Darm-Trakt:** Sphinkterkontraktion, Abnahme der Motilität

— **Pankreas:**

- α_2 -Rezeptoren vermindern die Insulinsekretion
- β_2 -Rezeptoren steigern sie

— **Leber:** β_2 -Rezeptoren steigern die Glykogenolyse (der Blutzucker steigt an), vermindern die Glukoneogenese (Glukoseneubildung)

— **Nieren:** β_1 -Rezeptoren steigern die Reninsekretion

— **Nebennierenmark:** steigert die Katecholaminsekretion (Adrenalin und Noradrenalin)

— **Harnblase:**

- α_1 -Rezeptoren: Kontraktion des Harnblasensphinkter
- β_2 -Rezeptoren: Erschlaffung des M. detrusor

— **Uterus:**

- α_1 -Rezeptoren kontrahieren den Uterus
- β_2 -Rezeptoren hemmen die Wehentätigkeit

— **Geschlechtsorgane:** Ejakulation

— **Haut:** steigert die Schweißsekretion (Transmitter ist hier das Acetylcholin!)

— **Braunes Fettgewebe** (nur Neugeborene): Thermogenese

1.2.2 Pharmakologie des sympathischen Nervensystems

- Sympathikomimetika stimulieren den Sympathikus
- Sympathikolytika hemmen den Sympathikus

Sympathikomimetika

Sympathikomimetika sind adrenerge Agonisten, d. h. sie wirken wie ein natürlicher Transmitter des sympathischen Nervensystems.

- Synthetisches Adrenalin = Suprarenin, Epinephrin
- Synthetisches Noradrenalin = Arterenol
- Synthetisches Dopamin
- Dobutamin
- Mischpräparate, z. B. Akrinor
- Phenylephrin (Neosynephrin)
- Ephedrin

■ ■ Anwendung

- Steigerung des Blutdrucks
- Stützung der Herzfunktion

Sympathikolytika

Sie hemmen die sympathischen Transmitter an den Erfolgsorganen. Je nach Rezeptorwirkung werden unterschieden:

- β -Blocker: werden eingesetzt bei Hypertonie und KHK
- α -Blocker: werden eingesetzt, um den Blutdruck zu senken

1.2.3 Parasympathisches Nervensystem

- Die Zellkörper des Parasympathikus liegen im Hirnstamm und im sakralen Rückenmark
- Wichtigster parasympathischer Nerv ist der **N. vagus**
- Überträgerstoff im parasympathischen Nervensystem ist das **Acetylcholin**
- Parasympathische Neurone werden auch als **cholinerg** bezeichnet
- Statt parasympathische Innervation wird auch der Begriff **vagale Innervation** verwendet, wenn Vagusfasern das betreffende Organ innervieren
- Der Parasympathikus gilt als Nervensystem des Schutzes und des Ausgleichs. Er dominiert in Phasen der **Ruhe und Entspannung**

■ ■ Wirkungen von Acetylcholin

- **Herz:** Bradykardie, verlangsamt die Erregungsleitung, vermindert die Kontraktionskraft der Vorhöfe
- **Blutgefäße:** Dilatation
- **Lunge:** Bronchokonstriktion
- **Magen-Darm-Trakt:** die Motilität und der Tonus nehmen zu (!): gesteigerte Drüsensekretion, Übelkeit, Erbrechen, Krämpfe
- **Pankreas:** Insulinsekretion und die exokrine Sekretion gesteigert
- **Harnblase:** Kontraktion des M. detrusor, Relaxation des Sphinkters, Entleerung der Blase
- **Auge:** Kontraktion des Ziliarmuskels, Miosis; keine Wirkung auf den Sphinkter pupillae
- **Schweißdrüsen:** generalisierte Sekretion
- **Geschlechtsorgane:** Erektion

1.2.4 Pharmakologie des parasympathischen Nervensystems

- Parasympathikolytika oder Vagolytika hemmen die Aktivität des Parasympathikus
- Parasympathikomimetika stimulieren den Parasympathikus

Parasympathikomimetika

Zwei Gruppen werden unterschieden:

- Direkt wirkende Parasympathikomimetika: Acetylcholin, Pilocarpin, Muskarin, Arecholin
- Indirekt wirkende: Cholinesterasehemmer wie Physostigmin, Neostigmin, Pyridostigmin
- **Anwendung**
 - Antagonisierung von ND-Muskelrelaxanzien (► Kap. 10)
 - Darm- oder Blasenatonie (Carbachol, z. B. Doryl)
 - Myasthenia gravis
 - Glaukom

Parasympathikolytika

■ Atropin

Atropin, ein Belladonna-Alkaloid der *Tollkirsche*, ist der Prototyp eines Parasympathikolytikums.

- Atropin verdrängt Acetylcholin vom Rezeptor und setzt den Tonus des Parasympathikus oder Vagotonus herab
- Antagonist: Cholinesterasehemmer

■ ■ Wirkungen

- Erweitert die Pupillen (Mydriasis)
- Hemmt die Drüsen im Respirationstrakt, trocknet die Schleimhäute aus
- Dilatiert die Bronchien (aber nicht so stark wie Adrenalin)
- Steigert die Herzfrequenz
- Hemmt die Peristaltik im gesamten Magen-Darm-Trakt
- Hemmt die Schweißdrüsensekretion → trockene, gerötete Haut
- Steigert in hohen Dosen die Körpertemperatur, besonders bei Kindern (Atropinfieber)
- ZNS: stimuliert bereits in klinischen Dosen das ZNS. Überdosierung oder Tollkirschenvergiftung führt zu Unruhe, Erregbarkeit, Verwirrtheit, Halluzinationen, Delir, zentraler Atemlähmung

■ ■ Anwendung in der Anästhesie

Nicht routinemäßig, sondern nur bei speziellen Indikationen:

- Vagal bedingte Bradykardie
- Antagonisierung von ND-Muskelrelaxanzien
- Zusammen mit Anticholinesterasen zur Hemmung der Speichel- und Bronchialsekretion, z. B. bei Bronchoskopien

■ ■ Kontraindikationen

- Fieber
- Hyperthyreose



Herz, Kreislauf und Hämodynamik

Inhaltsverzeichnis

- 2.1 In Kürze – Anatomie des Herzens – 10**
- 2.2 Funktionen des Herzens – 10**
 - 2.2.1 Herzaktion, Herzzyklus – 10
 - 2.2.2 Wie wird die Herzfunktion gesteuert? – 11
- 2.3 Kreisläufe und Hämodynamik – 13**
 - 2.3.1 Anatomische Einteilung des Kreislaufs – 13
 - 2.3.2 Funktionelle Einteilung des Kreislaufs – 13
 - 2.3.3 Blutvolumen – 14
 - 2.3.4 Blutdrücke – 14
 - 2.3.5 Regulation des Herzzeitvolumens (HZV) – 15
 - 2.3.6 Venöser Rückstrom – 15
 - 2.3.7 Lungenkreislauf – 16

2.1 In Kürze – Anatomie des Herzens

2

■ Terminologie

Cor, lateinisch: Herz

Kardial: Adjektiv, das sich auf das Herz bezieht, z. B. kardial wirksame Medikamente

■ Aufbau des Herzens

Das Herz besteht aus 2 Vorhöfen und 2 Ventrikeln:

- Der **rechte Ventrikel** pumpt *venöses* Blut über die A. pulmonalis in den Lungenkreislauf
- Der **linke Ventrikel** pumpt *arterielles* Blut über die Aorta in den Körperkreislauf

Vorhöfe und Ventrikel werden durch Klappen voneinander getrennt.

- **2 AV-Klappen** leiten das Blut aus den Vorhöfen in die Ventrikel:
 - Trikuspidalklappe: drei-segelige Klappe zwischen rechtem Vorhof und rechtem Ventrikel
 - Mitralklappe: zwei-segelige Klappe: zwischen linkem Vorhof und linkem Ventrikel
- **2 Taschenklappen** leiten das Blut aus den Ventrikeln in den großen und kleinen Kreislauf:
 - Pulmonalklappe: Taschenklappe zwischen rechtem Ventrikel und A. pulmonalis
 - Aortenklappe: Taschenklappe zwischen linkem Ventrikel und Aorta

■ Herzmuskel

- Er besteht aus Vorhofmuskulatur, Kammermuskulatur und dem Erregungsbildungs- und dem Erregungsleitungssystem
- Er ist quergestreift und besitzt *Automatie*, d. h. er kann spontan ein Aktionspotenzial bilden und sich rhythmisch kontrahieren, und zwar ohne Nervenimpulse oder stoffliche Einflüsse

- Jeder Kontraktion geht ein Aktionspotenzial voran. Das Aktionspotenzial entsteht im Sinusknoten und läuft über das Herz
- Die Kontraktion benötigt Kalziumionen und Energie

2.2 Funktionen des Herzens

2.2.1 Herzaktion, Herzzyklus

Herzzyklus

Die Phase vom Ende einer Kontraktion bis zum Ende der nächsten Kontraktion wird als Herzzyklus bezeichnet.

Der Zyklus besteht aus 2 Phasen:

- **Systole**: Kontraktionsphase, in der das Blut aus dem Herzen gepumpt wird
- **Diastole**: Erschlaffungsphase, in der sich das Herz erneut mit Blut füllt

■ Systole

Funktion: Austreibung von Blut in den Körperkreislauf und in den Lungenkreislauf. Besteht aus 2 Phasen:

- **Anspannungsphase (isometrische Kontraktion)**: Alle Klappen sind geschlossen, der Druck im Ventrikel steigt durch die Kontraktion von 8 auf ca. 80 mmHg an
- **Auswurfphase (Ejektionsphase)**: Sobald der Druck im linken Ventrikel den Aortendruck ca. 80 mmHg und der Druck im rechten Ventrikel den Pulmonalarterien- druck, ca. 8 mmHg, überschreiten, öffnen sich die Aorten- und die Pulmonalklappe. Die Drücke steigen weiter an:
 - auf ca. 120 mmHg in der Aorta
 - auf ca. 20 mmHg in der A. pulmonalis

Ein Teil des Bluts – das Schlagvolumen (ca. 90 ml) – wird ausgeworfen, der Rest bleibt im Ventrikel zurück. Das

Herz schlägt also niemals leer, sondern behält eine Restfüllung

■ Diastole

Funktion: Füllung der Ventrikel. Sie besteht ebenfalls aus 2 Phasen:

- **Erschlaffungs- oder Entspannungsphase:** Alle Herzklappen sind geschlossen, die Muskulatur erschlafft, der Ventrikel-Druck fällt unter den Druck in den Vorhöfen, die Segelklappen (Mitrals und Trikuspidalis) öffnen sich und die Füllungsphase beginnt
- **Füllungsphase:** Die Ventilebene (Klappen-ebene) stülpt sich über das Blut in den Vorhöfen, dadurch werden die Kammern mit 70 % des Vorhofbluts gefüllt. Danach kontrahieren sich die Vorhöfe kurz und die restlichen 30 % strömen in die Kammern. Insgesamt fließen so etwa 90 ml Blut in die Kammern

■ Herzvolumina

Im Verlauf der Herzaktion befinden sich jeweils unterschiedliche Blutmengen in den Ventrikeln:

- **Enddiastolisches Volumen:** Blutvolumen in den Ventrikeln am Ende der Diastole, ca. 120–130 ml
- **Endsystolisches Volumen:** In den Ventrikeln am Ende der Kontraktion zurückbleibendes Blutvolumen, ca. 50–60 ml
- **Auswurf- oder Ejektionsfraktion (EF):** Anteil des enddiastolischen Volumens, das mit jedem Herzschlag ausgeworfen wird. Es beträgt 50–70 %, d. h. 50–70 % des enddiastolischen Volumens werden mit jedem Herzschlag ausgeworfen ($EF = 0,5–0,7$), der Rest bleibt in den Ventrikeln zurück

- Bei einer EF von $\leq 30\%$ oder $\leq 0,3$ liegt eine schwere Funktionsstörung des linken Ventrikels vor.

■ Funktion der Herzklappen

Die Klappen lenken als Ventile den Blutstrom in *eine* Richtung und verhindern den Rückfluss von Blut in der Diastole. Sie öffnen und schließen sich passiv durch die entstehenden Druckunterschiede während der Herzaktion.

- In der **Systole** öffnen sich die Aorten- und die Pulmonalklappe; die Trikuspidalklappe und die Mitralklappe bleiben geschlossen
- In der **Diastole** öffnen sich die Trikuspidal- und die Mitralklappe; die Aortenklappe und die Pulmonalklappe bleiben geschlossen

■ Arbeit des Herzens

Das Herz leistet beim Pumpen v. a. Druck-Volumen-Arbeit:

- $\text{Arbeit} = \text{Druck} \times \text{Volumen}$
- $\text{Herzarbeit} = \text{systolischer Druck} \times \text{Schlagvolumen}$

2.2.2 Wie wird die Herzfunktion gesteuert?

Die Blutmenge, die vom Herzen pro Minute gepumpt wird – das **Herzminutenvolumen** – hängt vom **Bedarf der Organe** ab.

- In Ruhe pumpt das Herz etwa 4–6 l Blut/min
- Bei körperlicher Belastung nimmt das Herzzeitvolumen zu, um den erhöhten Sauerstoff- und Substratbedarf der Muskulatur zu decken

Die Anpassung des Herzminutenvolumens an den jeweiligen Bedarf wird durch 2 Mechanismen gesteuert:

- Frank-Starling-Mechanismus oder Autoregulation
- Reflexkontrolle durch das vegetative (autonome) Nervensystem

Frank-Starling-Mechanismus

Je stärker das Herz während der Diastole gefüllt und damit gedehnt wird, desto größer ist die in die Aorta ausgeworfene Blutmenge. Das Herz kann somit höchst unterschiedliche Volumina pumpen, je nachdem, wie groß der jeweilige venöse Rückstrom ist.

■ Venöser Rückstrom

Der venöse Rückstrom bestimmt ganz wesentlich, wieviel Blut das Herz pro Minute auswirft, also das Herzminutenvolumen.

Nimmt der venöse Rückstrom zu, werden die Herzmuskelfasern in der Diastole stärker gedehnt. Aufgrund der größeren Vordehnung kann sich der Muskel stärker kontrahieren und mehr Blut auswerfen. Der Herzmuskel hat sich damit automatisch an die erhöhte Blutmenge angepasst.

Ein vermehrter venöser Rückstrom hat zwei weitere Effekte:

- Die Herzfrequenz nimmt zu, weil die Vorhöfe durch den Rückstrom stärker gedehnt werden (positive Chronotropie)
- Die Kontraktionskraft des Myokards nimmt ebenfalls zu, bedingt durch Veränderungen im Herzstoffwechsel (positive Inotropie)

Kontrolle des Herzens durch das autonome Nervensystem

Das Herz wird parasympathisch und sympathisch innerviert.

Innervation des Herzens

- **Parasympathikus:** Er versorgt nur die Vorhöfe, und zwar mit Fasern aus dem **N. vagus**:
 - Rami cardiaci thoracici
 - Rami cardiaci cervicales superior und inferior
- **Sympathikus:** Er innerviert die Vorhöfe und die Kammern mit Fasern aus dem Grenzstrang:

- N. cardiaci cervicales superior, medius und inferior (N. accelerantes, „Beschleuniger“)

■ Sympathikuswirkungen

- Aktiviert die β_1 -Rezeptoren, seine natürlichen Überträgerstoffe sind Noradrenalin und Adrenalin
- Steigert die Herzfrequenz (positive Chronotropie) durch Stimulation des Sinusknotens (maximal 250/min)
- Erhöht die Überleitungsgeschwindigkeit im AV-Knoten (positive Dromotropie)
- Steigert die Kontraktionskraft (positive Inotropie) um bis zu 100 %
- Beschleunigt die Erschlaffung des Herzmuskels (positive Lusitropie)
- Steigert die Herzarbeit

■ Parasympathikus- oder Vaguswirkungen

- Stimuliert die muscarinartigen Acetylcholinrezeptoren des Herzens
- Verlangsamt die Herzfrequenz durch Stimulation des Sinusknotens (bis auf 20/min bei maximaler Stimulation)
- Verzögert die Überleitung, im Extremfall bis zum AV-Block
- Vermindert die Kontraktionskraft des Herzens

Automatie des Herzens

Das Herz besitzt eine Automatie, d. h. es erregt sich selbst und leitet die Erregung an die Herzmuskelzellen weiter, die sich anschließend kontrahieren. Selbsterregend ist der Sinusknoten, aber auch der AV-Knoten. Normalerweise wird die Selbsterregung des AV-Knotens durch den Sinusknoten unterdrückt. Fällt der Sinusknoten aus, wird der AV-Knoten zum Schrittmacher des Herzens.

■ Der anatomische Weg der Erregung

- Die Selbsterregung des Herzens beginnt im Sinusknoten, dem eigentlichen **Schrittmacher** des Herzens. Der Sinusknoten

- liegt in der Hinterwand des rechten Vorhofs
- Vom Sinusknoten läuft die Erregung zum AV-Knoten und wird dort etwas verzögert
- Vom AV-Knoten läuft die Erregung über das AV-Bündel (His-Bündel) auf die Kammern
- Von den Kammern läuft die Erregung über den linken und rechten Tawara-Schenkel zum Purkinje-Fasernetz
- Vom Purkinje-Fasernetz wird der Impuls über den gesamten Ventrikel geleitet

■ Elektrokardiogramm

Die Erregungsvorgänge des Herzens führen zu elektrischen Strömen, die sich über den gesamten Körper ausbreiten und als Spannungsdifferenzen über Elektroden mit einem Elektrokardiographen gemessen und aufgezeichnet werden können.

2.3 Kreisläufe und Hämodynamik

Die Hämodynamik beschreibt den Fluss des Bluts im Kreislauf und die dabei einwirkenden Kräfte und Faktoren:

- Blutvolumen
- Blutdruck
- Strömung
- Widerstand

2.3.1 Anatomische Einteilung des Kreislaufs

Der Blutkreislauf besteht aus 2 miteinander verbundenen Systemen: Körperkreislauf und Lungenkreislauf.

■ Körperkreislauf (großer Kreislauf)

- **Aufbau:** linker Ventrikel, Aorta, Arterien, Kapillarnetz, Venen, rechter Vorhof. Enthält ca. 15 % des Gesamtblutvolumens

- **Richtung des Blutstroms:** Das Blut fließt vom linken Ventrikel in die Aorta, von dort zu den Arterien der Organe und Gewebe, dann in das Kapillarnetz und zurück über die Organvenen und die obere und untere Hohlvene in den rechten Vorhof
- **Funktion:** Versorgt die Organe mit Sauerstoff und Nährstoffen und transportiert die Abbauprodukte (Metabolite) und Kohlendioxid (CO₂)

■ Lungenkreislauf

- **Aufbau:** rechter Ventrikel, A. pulmonalis, Lungenkapillarnetz, Lungenvenen, linker Vorhof. Enthält etwa 85 % (!) des Gesamtblutvolumens
- **Richtung des Blutstroms:** Der rechte Ventrikel pumpt das Blut in die Pulmonalarterien. Von dort strömt es in das Kapillarnetz der Lunge und fließt dann über die Pulmonalvenen zurück in das Herz, und zwar in den linken Vorhof
- **Funktion:** transportiert das venöse Blut zur Lunge. Hier wird das Kohlendioxid aus dem Stoffwechsel ausgeatmet und Sauerstoff aufgenommen, das Blut also arterialisiert

2.3.2 Funktionelle Einteilung des Kreislaufs

Aufgrund der unterschiedlichen Drücke werden unterschieden:

- **Hochdrucksystem:** Hierzu gehören der linke Ventrikel während der Systole und das arterielle System des Körperkreislaufs
Mittlere Blutdrücke: 60–100 mmHg
- **Niederdrucksystem:** Es umfasst alle Körpervenen, das rechte Herz, die Lungengefäße und den linken Vorhof während der Diastole
Mittlerer Blutdruck: bis etwa 20 mmHg

2.3.3 Blutvolumen

Das Blutvolumen beträgt insgesamt 5–10 % des Körpergewichts. Das **zentrale Blutvolumen** ist die Blutmenge zwischen der Pulmonalklappe und der Aortenklappe.

- **Hypovolämie:** vermindertes Blutvolumen, bedingt durch Verluste
- **Hypervolämie:** erhöhtes Blutvolumen, z. B. durch Überinfusion, Salz-Wasser-Retention beim Nierenversagen

Der **Hämatokrit** bezeichnet den Anteil der Zellen (ganz überwiegend Erythrozyten) im Blut in Prozent.

Das Blutplasma hat die gleiche Zusammensetzung wie die interstitielle Flüssigkeit, allerdings ist der Eiweißanteil mit 7 % wesentlich höher.

2.3.4 Blutdrücke

Der Blutdruck ist die Kraft, die das Blut auf einen beliebigen Abschnitt der Gefäßwand ausübt.

Arterieller Blutdruck

Arterieller Blutdruck

Druck im Bereich der Aortenwurzel. Diesen Druck muss der linke Ventrikel in der Austreibungsphase überwinden, damit das Blut in den Körperkreislauf ausgeworfen wird.

Die Höhe des arteriellen Blutdrucks hängt vom peripheren Gesamtwiderstand, vom elastischen Gesamtwiderstand der zentralen Arterien und von der Größe des Herzzeitvolumens ab.

- Der **systolische Blutdruck** ist der maximale Blutdruck während der Systole des Herzens
Normalwert in der Aorta 120 mmHg

- Der **diastolische Blutdruck** ist der Blutdruck am Ende der Diastole
Normalwert in der Aorta: 80 mmHg
- Die **Blutdruckamplitude** ist die Differenz zwischen systolischem und diastolischem Druck
Normalwert 40 mmHg
- Der **mittlere arterielle Blutdruck** ist das Produkt aus Herzzeitvolumen (HZV) und totalem peripheren Widerstand:
 $MAP = HZV \times TPR$

Venendruck

Das gesamte Blut des Körpers sammelt sich in den Venen und strömt aufgrund eines Druckgefälles in den rechten Vorhof. Der Venendruck hängt in erster Linie von der *Blutfüllung* des Niederdrucksystems ab.

- **Zentraler Venendruck (ZVD):** Druck in den großen herznahen Venen. Kann dem rechten Vorhofdruck (RAP) gleichgesetzt werden
Normalwert des RAP: 3–5 mmHg
Der zentrale Venendruck muss niedriger sein als der periphere Venendruck, damit das venöse Blut zum Herzen fließen kann
- Normalerweise liegt der periphere Venendruck ca. 4–9 mmHg über dem zentralen Venendruck

Orthostase

Beim Aufstehen aus der liegenden Position (Orthostase) kommt es zu hydrostatischen Druckänderungen. Hierdurch „versacken“ kurzzeitig 400–600 ml Blut in den Venen der Beine.

Folgen: Venöser Rückstrom, zentraler Venendruck, Schlagvolumen und systolischer Blutdruck nehmen vorübergehend ab, bis vasomotorische und kardiale Reaktionen den mittleren arteriellen Druck wieder auf die Ausgangswerte anheben. Bei einigen Menschen reicht die Gegenregulation nicht aus: Es kommt zu Schwindelgefühl und Ohrensausen oder sogar zur Synkope (Ohnmachtsanfall), die durch Anheben der Beine häufig therapiert werden kann.

Zu beachten: Anästhetika und Opiode beeinträchtigen die Orthostasereaktion bei der Patientenlagerung!

Blutströmung

Der Blutstrom bezeichnet die Blutmenge (ml oder Liter), die innerhalb einer bestimmten Zeit durch einen bestimmten Abschnitt des Kreislaufs fließt. Er hängt von 2 Faktoren ab:

- Der **Druckdifferenz** zwischen den beiden Gefäßenden (treibende Kraft)
- Dem **Gefäßwiderstand**; er ist dem Blutfluss entgegengerichtet

Gefäßwiderstand

Die Blutgefäße setzen dem Blutstrom einen Widerstand entgegen. Dieser Widerstand nimmt mit abnehmendem Gefäßdurchmesser zu: Je kleiner die Gefäße, desto größer der Widerstand:

- Der Widerstand ist am größten in den Arteriolen und kleinen Arterien (Widerstandsgefäße). Erst in diesem Gefäßabschnitt fällt der Blutdruck deutlich ab
- Der **totale periphere Widerstand (TPR)** ist die Summe aller Widerstände, die überwunden werden müssen, damit das Blut strömt

2.3.5 Regulation des Herzzeitvolumens (HZV)

Herzzeitvolumen

Das Herzzeitvolumen (HZV) ist die Blutmenge, die vom linken Ventrikel pro Minute in die Aorta gepumpt wird. Der Herzindex (HI oder Cardiac Index, CI) bezeichnet das HZV pro m² Körperoberfläche (KOF)

Das Herzzeitvolumen ist die entscheidende Größe für die Sauerstoff- und Substratversorgung der Organe und Gewebe.

- **Normalwert:** 4–6 l/min oder Herzindex: 2,4–4,2 l/min pro m² KOF

Die Höhe des HZV hängt von der Höhe des **venösen Rückstroms** ab: je größer der Rückstrom, desto größer das HZV und umgekehrt. Venöser Rückstrom und HZV sind normalerweise gleich groß.

- Die Blutmenge, die vom Herzen *automatisch* aufgrund eines gesteigerten venösen Rückstroms gepumpt werden kann, beträgt 13–15 l/min
- Letztlich wird aber das HZV von der Aktivität des *Stoffwechsels* gesteuert: Je höher der Stoffwechsel, desto größer der Sauerstoff- und Nährstoffbedarf und desto höher auch das Herzzeitvolumen
- Durch Sympathikusstimulation (körperliche Aktivität) oder durch Zufuhr sympathikomimetischer Medikamente (z. B. Adrenalin, Noradrenalin, Dobutamin) wird die Kontraktionskraft gesteigert und das HZV nimmt zu

2.3.6 Venöser Rückstrom

Venöser Rückstrom

Rückfluss des gesamten venösen Bluts zum rechten Herzen. Wird durch Venenklappen in Richtung Herz gelenkt. Die Klappen verhindern, dass der Blutfluss sich umkehrt

Treibende Kräfte sind:

- **Muskelpumpe:** Sie presst die Venen Richtung Herz aus
- **Ventilebenenmechanismus:** Die Herzklappenebene wird durch die Kontraktion gesenkt. Hierdurch wird auch der Druck in den herznahen Venen erniedrigt und das Blut angesaugt
- **Atmung:** Bei der Inspiration nimmt das intrathorakale Volumen zu, der Druck in den intrathorakalen Venen wird subatmosphärisch („negativ“) und das Blut

wird in Richtung Herz gesogen. Die Kontraktion des Zwerchfells erhöht den intraabdominellen Druck, hierdurch werden die intraabdominalen Venen ausgepresst

- **Pulswelle:** Bei gemeinsam verlaufenden Arterien und Venen wird die arterielle Pulswelle auf die Venen übertragen und die Venen werden ebenfalls ausgepresst

2.3.7 Lungenkreislauf

Der Lungenkreislauf gehört zum *Niederdrucksystem*. Der Motor bzw. die Pumpe des Lungenkreislaufs ist der *rechte* Ventrikel. Er pumpt das venöse Blut durch die Pulmonalklappen in die A. pulmonalis, von

dort über die Pulmonalarterien zu den Alveolen. In den Alveolen findet der Gasaustausch statt.

Das HZV des rechtens Ventrikels ist genau so groß wie das des linken Ventrikels.

Die Strömungswiderstände im Lungenkreislauf sind erheblich geringer als im Körperkreislauf, entsprechend sind auch die Drücke wesentlich niedriger.

■ Drücke im Lungenkreislauf

- A. pulmonalis: systolisch 20–25 mmHg, diastolisch 9–12 mmHg; Mitteldruck ca. 14 mmHg
- Pulmonalvenen ca. 7 mmHg
- Linker Vorhof ca. 6 mmHg



Atmung

Inhaltsverzeichnis

- 3.1 In Kürze – Anatomie und Funktionen der Lunge – 18**
- 3.2 Atemmechanik – 18**
 - 3.2.1 Lungenvolumina – 20**
- 3.3 Alveoläre Ventilation – 20**
- 3.4 Pulmonaler Gasaustausch – 21**
 - 3.4.1 Zusammensetzung der Atemluft und Partialdrücke – 21**
- 3.5 Steuerung der Atmung – 22**
- 3.6 Pathologische Atemtypen – 22**

3.1 In Kürze – Anatomie und Funktionen der Lunge

3

Atmung

Atmung ist der Gasaustausch in der Lunge, d. h., die Aufnahme von Sauerstoff (O_2) in das Blut und die Ausatmung von Kohlendioxid (CO_2) in die Umgebungsluft.

- **Atemwege:** die Luftleiter
 - Obere Atemwege
 - Trachea
 - Bronchialsystem: rechter und linker Hauptbronchus, Lappenbronchien, Segmentbronchien
- **Lungenflügel:** 2 Flügel, Oberfläche ca. 100 m^2 , Gewicht ca. 800 g
 - Rechter Lungenflügel: Volumen 1,5 l; 3 Lappen: Ober-, Mittel- und Unterlappen, 10 Segmente
 - Linker Lungenflügel: Volumen 1,4 l; nur 2 Lappen: Oberlappen und Unterlappen, 9 Segmente
- **Alveolen:** Ort des Gasaustausches. Insgesamt ca. 300 Mio.
 - Bronchioli respiratorii münden in die Sacculi (Säckchen) alveolares
 - Die Alveolen sind durch Interalveolarsepten voneinander getrennt
 - Die Septen enthalten die Kapillaren und elastische Fasern
- **Gefäßversorgung**
 - **Lungenarterien:** Sie leiten das *venöse* Blut des rechten Herzens zur Lunge
 - Truncus pulmonalis
 - Rechte und linke Lungenarterie
 - Lappenarterien
 - Segmentarterien
 - **Bronchialarterien** (Vasa privata): Sie versorgen das Lungengewebe mit *arteriellem* Blut
 - **Lungenvenen** (Vasa publica): Sie leiten das arterielle Blut aus der Lunge zum linken Herzen

- **Bronchialvenen** (Vasa privata): Sie leiten das venöse Blut aus dem Lungengewebe in die V. azygos und V. hemiazygos

– Innervation der Lunge

- Plexus pulmonalis mit parasympathischen Fasern aus dem N. vagus und mit sympathischen Fasern aus den thorakalen Ganglien

– Funktionen der Lunge

- Ventilation: Belüftung und Entlüftung der Lunge
- Pulmonaler Gasaustausch: Aufnahme von Sauerstoff und Ausscheidung von Kohlendioxid durch Diffusion in den Alveolen
- Regulation des pH-Werts im arteriellen Blut (als respiratorische Komponente des Säure-Basen-Haushalts)

3.2 Atemmechanik

Die Atemmechanik umfasst die physikalischen Abläufe bei der Inspiration und bei der Expiration.

Bei der **Inspiration** wird die Atemluft in die Lunge *gesaugt*. Der Sog entsteht durch Kontraktion der Atemmuskulatur (Zwerchfell, Interkostalmuskulatur). Die Kontraktion der Atemmuskulatur, v. a. des Zwerchfells, erweitert den Thorax. Die Lunge wird passiv mitgezogen.

Bei der **Expiration** erschlafft die Atemmuskulatur; die elastischen Fasern ziehen die Lungen zusammen und die Luft wird aus den Alveolen herausgepresst.

Die Inspiration ist ein aktiver Vorgang, die Expiration ist passiv und erfolgt durch die Rückstellkräfte der Lunge.

An der Atmung beteiligte Muskeln

– Inspirationsmuskulatur

- Zwerchfell: Die Kontraktion erweitert den Thorax nach unten in den Bauchraum („Bauchatmung“)

- Externe Interkostalmuskulatur: Ihre Kontraktion erweitert den Thorax nach außen („Brustkorbatmung“)
- Inspiratorische Atemhilfsmuskulatur: Sie wird nur bei angestrenzter Atmung eingesetzt
 - M. sternocleidomastoideus (Kopfnicker oder Kopfwender an der Halsseite)
 - M. serratus (Sägemuskel am Rücken)
 - M. pectoralis (Brustmuskel)
 - Mm. scaleni (Treppenmuskeln an der Vorderseite des Halses)

■ Expirationsmuskulatur

- Interne Interkostalmuskulatur
- Expiratorische Hilfsmuskulatur: Bauchmuskeln

■ Intraalveolärer (intrapulmonaler) Druck

Der intraalveoläre Druck schwankt während des Atemzyklus.

Bei der **Inspiration** sinkt der Druck in den Alveolen 1–3 mmHg unter den Umgebungsdruck und es entsteht ein Sog („negativer“ Druck¹).

Bei der **Expiration** steigt der Druck in den Alveolen um 1–3 mmHg über den Umgebungsdruck an. Dadurch strömt die Luft aus der Lunge heraus, wird also herausgepresst.

■ Druck im Pleuraspalt (intrapleuraler Druck)

Die Lunge ist von der Thoraxwand durch einen mikroskopisch kleinen Spalt getrennt, den Pleuraspalt. Im Spalt herrscht ein geringer negativer Druck (–0,5 kPa in Atemruhelage). Er verhindert, dass sich die

Lunge von der Pleura der Thoraxwand löst und kollabiert. Bei der Inspiration nimmt der intrapleurale Druck (Sog) zu.

Pneumothorax Dringt Luft in den Pleuraspalt, kollabiert die Lunge teilweise oder vollständig durch den entstehenden Überdruck.

■ Surfactant

Die Alveolen sind mit einem dünnen Film, dem Surfactant, ausgekleidet. Er setzt die Oberflächenspannung herab und verhindert den Kollaps der Alveolen.

■ Dehnbarkeit von Lunge und Thorax (Compliance)

Lunge und Thorax sind *elastisch*: Sie dehnen sich bei Krafteinwirkungen. Die Dehnbarkeit wird als Compliance bezeichnet. Die Compliance beschreibt die Volumenzunahme der Lunge pro Einheit des Druckanstiegs, z. B. pro mmHg Druckanstieg nimmt das Lungenvolumen um ca. 130 ml zu.

Lungenemphysem oder Lungenödem Bei beiden Erkrankungen wird die Lunge steifer, die Compliance nimmt ab und es muss ein größerer Druck (Sog) erzeugt werden, um das gleiche Volumen einzuzatmen.

■ Atemwegswiderstand

Bei der Atmung muss der Strömungswiderstand in den Atemwegen überwunden werden, damit die Luft strömen kann.

- Der Atemwegswiderstand ist am größten im Bereich der oberen Atemwege, Trachea, Hauptbronchien sowie Lappen- und Segmentbronchien (70 %), am kleinsten dagegen in den kleinen Atemwegen (20 %)
- Nimmt das Lungenvolumen zu, sinkt der Atemwegswiderstand und umgekehrt
- Bronchospasmus Anfallartige Kontraktion der Bronchialmuskulatur. Sie bewirkt einen starken Anstieg des Atemwegswiderstand und der Atemarbeit (z. B. Asthma bronchiale).

1 Negativer Druck = Druck, der niedriger ist als der jeweilige Umgebungsdruck bzw. Atmosphärendruck

3.2.1 Lungenvolumina

Die meisten Lungenvolumina werden spirometrisch bestimmt.

3

Lungenvolumina

- **Atemzugvolumen:** das mit einem Atemzug ein- und ausgeatmete Volumen
Normwert: 0,5 l oder 7 ml/kg (Erwachsene)
- **Inspiratorisches Reservevolumen:** Volumen, das nach einer normalen Inspiration zusätzlich eingeatmet werden kann
Normwert: ca. 3 l
- **Expiratorisches Reservevolumen:** Volumen, das nach einer normalen Expiration zusätzlich ausgeatmet werden kann
Normwert: ca. 1,1 l
- **Residualvolumen:** Restvolumen in der Lunge, das auch noch einer maximalen Expiration nicht ausgeatmet werden kann. Hält die Alveolen gebläht und verhindert ihren Kollaps
Normwert: ca. 1200 ml
- **Funktionelle Residualkapazität (FRK):** Summe aus Residualvolumen und expiratorischem Reservevolumen, also die Luft, die nach einer normalen Expiration noch in der Lunge vorhanden ist. Die FRK verhindert stärkere Schwankungen der Blutgase während des Atemzyklus
Normwert: ca. 2,3 l
- **Inspirationskapazität:** Summe von Atemzugvolumen und inspiratorischem Reservevolumen. Sie umfasst das Volumen, das nach einer normalen Inspiration noch eingeatmet werden kann
- **Vitalkapazität:** Summe aus Atemzugvolumen, inspiratorischem Reservevolumen und expiratorischem Reservevolumen, d. h. die Luftmenge, die nach einer maximalen Inspiration maximal ausgeatmet werden kann
Normwert: ca. 5 l

- **Totalkapazität:** Luftvolumen, dass sich nach einer maximalen Inspiration in der Lunge befindet

■ Totraumvolumen

- Totraumvolumen: Luft im Atemsystem, die nicht am Gasaustausch teilnimmt
- Zum Totraum gehören die luftleitenden Atemwege von der Nase bis zu den Bronchiolen
- Das Totraumvolumen beträgt etwa 150 ml, d. h. von 500 ml Atemzugvolumen gelangen nur 350 ml in die Alveolen und nehmen am eigentlichen pulmonalen Gasaustausch teil

3.3 Alveoläre Ventilation

Ventilation

Ventilation ist die Belüftung der **Alveolen** mit Frischgas (Sauerstoff) und ihre Entlüftung von verbrauchtem Gas aus dem Stoffwechsel (CO_2). Motor der Ventilation ist die Atemmuskulatur. Sie wird vom Atemzentrum gesteuert.

■ Teilprozesse der Ventilation

- Inspiration
- Wechsel von der Inspiration zur Expiration
- Expiration
- Expiratorische Pause
- Wechsel von der Expiration zur Inspiration

Kenngrößen der alveolären Ventilation

- Atemfrequenz, f : 16–20/min
- Atemzugvolumen, V_T : 500 ml
- Atemminutenvolumen, AMV: pro Minute eingeatmete Luftmenge: ca. 7,5 l/min

Berechnung: $AMV = \text{Atemfrequenz} \times \text{Atemzugvolumen}$

- Alveoläres Minutenvolumen = Atemfrequenz $\times$ (Atemzugvolumen – Totraumvolumen): ca. 4,2 l/min

Zu beachten: Bei niedrigen Atemzugvolumina und hoher Atemfrequenz nimmt die alveoläre Ventilation *ab*, weil hierdurch die Totraumventilation zunimmt.

■ Veränderungen der Ventilationsparameter

- **Bradypnoe:** Atemfrequenz $< 10/\text{min}$
- **Tachypnoe:** Atemfrequenz $> 20/\text{min}$
- **Hypoventilation:** erniedrigtes Atemminutenvolumen; führt zum Anstieg des $p\text{aCO}_2$ und des ausgeatmeten CO_2
- **Hyperventilation:** gesteigertes Atemminutenvolumen. Hierdurch fällt der arterielle $p\text{CO}_2$ (Hypokapnie) ab. Außerdem steigen der alveoläre und der arterielle $p\text{O}_2$ an

3.4 Pulmonaler Gasaustausch

Der Austausch von Sauerstoff und Kohlendioxid erfolgt in den Alveolen. In Ruhe muss die Lunge etwa 350 ml O_2/min aufnehmen und ca. 260 ml CO_2/min ausatmen.

Der Austausch der beiden Gase erfolgt in den Alveolen durch Diffusion. Die Diffusion beider Gase hängt von ihrem Partialdruck (p) bzw. dem Partialdruckunterschied zwischen Blut und Atemluft ab, weiterhin von der Diffusionsfläche und der Diffusionsstrecke.

Belüftung und Durchblutung der Lunge müssen aufeinander abgestimmt sein, damit die Gase genügend ausgetauscht werden.

3.4.1 Zusammensetzung der Atemluft und Partialdrücke

■ Inspirationsluft

Die eingeatmete Luft ist ein Gemisch aus mehreren Gasen und Wasserdampf. Die einzelnen Gase liegen im Gemisch in unterschiedlicher Konzentration und mit unterschiedlichen Partialdrücken (Teildrücken, p) vor.

Jedes Gas im Gemisch übt seinen Partialdruck unabhängig von der Anwesenheit der anderen Gase aus.

Die Höhe des Partialdrucks und der spezifische Löslichkeitskoeffizient des Gases bestimmen die physikalisch im Blut gelöste (nicht gebundene!) Menge im Blut.

Zusammensetzung der Inspirationsluft

- Stickstoff, N_2 : 79 %, $p\text{N}_2$ 600 mmHg
- Sauerstoff, O_2 : 20,9 %, $p\text{O}_2$ 159 mmHg
- Andere Gase: 0,1 %
davon Kohlendioxid, CO_2 : 0,04 %, $p\text{CO}_2$ 0,3 mmHg

■ Alveolarluft

Der Partialdruck der Gase ist in den Alveolen niedriger als in der eingeatmeten Luft, weil die Luft mit Totraumluft vermischt wird.

Außerdem wird die Atemluft auf dem Weg zu den Alveolen mit Wasserdampf gesättigt.

Zusammensetzung der Alveolarluft

- Stickstoff: 74,9 %, $p\text{N}_2$ 569 mmHg
- Sauerstoff: 13,6 %, $p\text{O}_2$ 104 mmHg
- Kohlendioxid: 5,3 %, $p\text{CO}_2$ 40 mmHg
- Wasserdampf: 6,2 %, $p\text{H}_2\text{O}$ 47 mmHg

■ Expirationsluft

Die ausgeatmete Luft ist ein Gemisch aus Totraumluft und Alveolarluft.

Zusammensetzung der Expirationsluft

- Stickstoff 74,5 %, pN_2 566 mmHg
- Sauerstoff 15,7 %, pO_2 120 mmHg
- Kohlendioxid: 3,6 %, pCO_2 27 mmHg
- Wasserdampf: 6,2 %, pH_2O 47 mmHg

3.5 Steuerung der Atmung

Die Atmung wird von den sog. Atemzentren in der Medulla oblongata des Gehirns gesteuert. Dabei wird jeder Atemzug durch einen Nervenimpuls vom Gehirn zu den Atemmuskeln ausgelöst.

- Die Atmung wird von den Atemzentren so gesteuert, dass die beiden Blutgase – O_2 und CO_2 – in einem engen Bereich konstant bleiben.
- **Faktoren, die den Atemantrieb steigern:**
 - Stärkster Atemantrieb ist ein Anstieg des arteriellen pCO_2 : Atemfrequenz und Atemtiefe nehmen hierdurch zu
 - Auch ein Anstieg der Wasserstoffionen im Blut (Abfall des pH-Werts) steigert

die Atmung, allerdings nicht so stark wie der pCO_2 -Anstieg

- Der arterielle pO_2 steigert die Atmung erst, wenn er auf unter 50 mmHg abgefallen ist
- **Weitere Faktoren**, die den Atemantrieb steigern:
 - Körperliche Aktivität
 - Starke Schmerzen
 - Fieber
 - Heftige Erregung

In Hypothermie atmet der Patient weniger, weil der O_2 -Bedarf und die CO_2 -Produktion abnehmen.

3.6 Pathologische Atemtypen

- **Kussmaul-Atmung:** vertiefte, rhythmische Atmung bei metabolischer Azidose (z. B. diabetische Ketoazidose)
- **Cheyne-Stokes -Atmung:** periodisch an- und abschwellende Atemtiefe mit hyper- und hypoventilatorischen Phasen und Atempausen durch Schädigung des Atemzentrums
- **Biot-Atmung:** tiefe Atmung mit plötzlichen Atempausen bei erhöhtem Hirndruck oder Schädel-Hirn-Trauma
- **Schnappatmung:** einzelne tiefe Atemzüge mit großen Atempausen: agonal bei Erstickten oder Kreislaufstillstand



Blutgase: O₂ und CO₂

Inhaltsverzeichnis

- 4.1 In Kürze – Grundlagen – 24**
- 4.2 Sauerstoff – 24**
 - 4.2.1 Aufnahme von Sauerstoff in das Blut – 24
 - 4.2.2 Transport des Sauerstoffs im Blut – 24
 - 4.2.3 O₂-Gehalt, O₂-Status des Bluts und O₂-Angebot an die Organe – 25
- 4.3 Kohlendioxid (CO₂) – 26**
 - 4.3.1 Transport von Kohlendioxid im Blut – 26