

Inhaltsverzeichnis



1 Biologie der Zelle 2

1.1	Allgemeines	2
1.2	Anzahl, Größe, Form und Eigenschaften von Zellen	2
1.2.1	Anzahl, Größe und Form	2
1.2.2	Eigenschaften	3
1.3	Aufbau von Zelle und Zellorganellen	4
1.3.1	Grundbauplan	4
1.3.2	Zellmembran	5
1.3.3	Zytoplasma und Zellorganellen	6
1.3.4	Zellkern	10
1.4	Zellteilung (Mitose)	19
1.4.1	Ablauf der Mitose	20
1.5	Reduktions- oder Reifeteilung (Meiose)	23
1.5.1	1. Reifeteilung	23
1.5.2	2. Reifeteilung	24
1.6	Stoffaustausch der Zelle mit ihrer Umgebung	26
1.6.1	Zusammensetzung der extrazellulären Flüssigkeit	27
1.6.2	Zusammensetzung der intrazellulären Flüssigkeit	28
1.7	Membran- oder Ruhepotenzial einer Zelle	28
1.8	Stoff- und Flüssigkeitstransport	29
1.8.1	Passive Transportprozesse	30
1.8.2	Aktive Transportprozesse	33



2 Genetik und Evolution 40

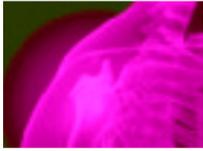
2.1	Genetik (Vererbungslehre)	40
2.1.1	Gene, Chromosomen und Genom	40
2.1.2	Allele	40
2.1.3	Dominanz, Rezessivität und Kodominanz	41
2.1.4	Phänotyp und Genotyp	41
2.1.5	Die Mendel-Gesetze	41

2.1.6	Autosomal-dominanter Erbgang	45
2.1.7	Autosomal-rezessiver Erbgang	48
2.1.8	Geschlechtsgebundener (gonosomaler) Erbgang	49
2.1.9	Mutationen	51
2.2	Evolution (Abstammungslehre)	53
2.2.1	Entwicklung der Evolutionslehre	53
2.2.2	Evolutionsfaktoren	54
2.2.3	Evolutionsbeweise	57



3 Gewebe 66

3.1	Allgemeines	66
3.2	Epithelgewebe	66
3.2.1	Oberflächenbildende Epithelien	66
3.2.2	Drüsen- und Sinnesepithelien	70
3.3	Binde- und Stützgewebe	71
3.3.1	Bindegewebe	71
3.3.2	Stützgewebe	77
3.4	Muskelgewebe	85
3.4.1	Glattes Muskelgewebe	85
3.4.2	Quergestreiftes Muskelgewebe	86
3.5	Nervengewebe	97
3.5.1	Neuron	97
3.5.2	Nervenimpulse (Aktionspotenziale)	100
3.5.3	Synapsen	102
3.5.4	Gliazellen (Neuroglia)	105
3.5.5	Nerven	106



4 Bewegungsapparat 114

4.1	Achsen, Ebenen und Orientierungsbezeichnungen	114
4.1.1	Körperachsen und Körperebenen	114
4.1.2	Lage- und Richtungsbezeichnungen	115
4.2	Allgemeine Anatomie des Bewegungsapparats	115
4.2.1	Knochen	116
4.2.2	Gelenke	117
4.2.3	Funktion und Bauprinzip des Skelettmuskels	123
4.2.4	Muskelsehnen	126
4.2.5	Hilfseinrichtungen der Muskeln und Sehnen	127
4.3	Spezielle Anatomie von Hals und Kopf	129
4.3.1	Hals (Collum)	129
4.3.2	Kopf (Caput)	131
4.4	Spezielle Anatomie des Rumpfes	141
4.4.1	Rumpfskelett	141
4.4.2	Rumpfmuskulatur	152
4.5	Spezielle Anatomie der oberen Extremität	164
4.5.1	Schultergürtel – Knochen, Gelenke, Muskeln	164
4.5.2	Freie obere Gliedmaße – Knochen, Gelenke, Muskeln	166
4.6	Spezielle Anatomie der unteren Extremität	178
4.6.1	Beckengürtel und Becken – Knochen, Gelenke, Muskeln	178
4.6.2	Freie untere Gliedmaße – Knochen, Gelenke, Muskeln	182



5 Herz und Gefäßsystem 206

5.1	Allgemeines	206
5.2	Herz (Cor)	207
5.2.1	Gestalt und Lage	207
5.2.2	Aufbau	208
5.2.3	Erregungsleitungssystem	214
5.2.4	Herzkranzgefäße	216
5.2.5	Systole und Diastole	217
5.2.6	Blutdruck	218
5.2.7	Herzzeitvolumen (HZV)	219

5.2.8	Herznerven	221
5.2.9	Herztöne und Herzgeräusche	221
5.2.10	Ruhe- und Aktionspotenzial am Herzen	222
5.2.11	Elektrokardiogramm (EKG)	223
5.2.12	Untersuchung des Herzens	227
5.3	Gefäßsystem – Bau und Funktion	228
5.3.1	Blutgefäße – Arterien, Venen und Kapillaren	228
5.3.2	Lymphgefäße	231
5.3.3	Großer und kleiner Kreislauf	233
5.3.4	Fetaler Kreislauf	234
5.3.5	Arteriell System	236
5.3.6	Venöses System	239
5.4	Gefäßsystem – physikalische und physiologische Grundlagen	244
5.4.1	Strömung, Druck und Widerstand im Gefäßsystem	244
5.4.2	Verteilung des Herzzeitvolumens (HZV)	245
5.4.3	Regulation der Organdurchblutung	245
5.4.4	Reflektorische Kreislauf- und Blutdruckregulation	247
5.4.5	Blutzirkulation in den Kapillaren	249
5.4.6	Venöser Rückstrom zum Herzen	250



6 Atmungssystem 260

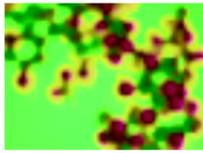
6.1	Allgemeines	260
6.2	Weg des Sauerstoffs zur Zelle: äußere und innere Atmung	260
6.3	Luftleitende Atmungsorgane	261
6.3.1	Nasenhöhle und Nasennebenhöhlen	262
6.3.2	Rachen (Pharynx)	264
6.3.3	Kehlkopf (Larynx)	264
6.3.4	Luftröhre und Bronchialbaum	269
6.4	Seröse Höhlen und Häute des Brust- und Bauchraums	272
6.5	Lungen (Pulmones)	274
6.5.1	Lungenfell (Pleura visceralis) und Rippenfell (Pleura parietalis)	274
6.5.2	Äußerer Aufbau der Lunge	275
6.5.3	Innerer Aufbau der Lunge	276
6.6	Belüftung der Lungen (Ventilation)	277
6.6.1	Lungen- und Atemvolumen	278
6.6.2	Atemzeitvolumen	280
6.6.3	Alveolar- und Totraumventilation	280

6.7	Gasaustausch und Blut-Luft-Schranke	281
6.7.1	Gasaustausch in der Lunge	282
6.7.2	Blut-Luft-Schranke	285
6.7.3	Sauerstoffmangel (Hypoxie, Anoxie)	286
6.7.4	Künstliche Beatmung	287
6.8	Atemregulation	287
6.8.1	Zentrale Atemregulation	287
6.8.2	Chemische Atemregulation	288
6.8.3	Unspezifische Atemreize	289
6.9	Atemmechanik	289
6.9.1	Intrapulmonaler Druck	289
6.9.2	Einatmung (Inspiration)	289
6.9.3	Ausatmung (Expiration)	290
6.9.4	Atmungswiderstände	291
6.9.5	Atemarbeit	292
6.9.6	Dynamischer Atemtest	292



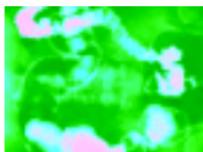
7 Blut, Immunsystem und lymphatische Organe 302

7.1	Allgemeines	302
7.2	Blut	302
7.2.1	Aufgaben des Blutes	302
7.2.2	Blutzellen	304
7.2.3	Blutgruppen und Bluttransfusionen	308
7.2.4	Blutplasma	311
7.2.5	Blutkörperchensenkungsgeschwindigkeit (BSG)	315
7.2.6	O ₂ - und CO ₂ -Transport im Blut	316
7.2.7	Anämien	318
7.2.8	Steuerung der Erythrozytenbildung	320
7.2.9	Blutstillung und Blutgerinnung	321
7.3	Immunsystem	324
7.3.1	Unspezifische Immunabwehr	324
7.3.2	Spezifische Immunabwehr	325
7.4	Lymphatische Organe (Immunorgane)	330
7.4.1	Thymus (Bries)	332
7.4.2	Lymphknoten (Nodus lymphaticus)	333
7.4.3	Milz (Lien)	335
7.4.4	Lymphatisches Gewebe der Schleimhäute	338



8 Endokrines System 350

8.1	Allgemeines	350
8.2	Hormone	351
8.2.1	Wirkungsmechanismus von Hormonen	351
8.2.2	Hauptbildungsorte von Hormonen	353
8.2.3	Steuerung der Hormonsekretion	355
8.3	Hypothalamus-Hypophysen-Rückkopplungssystem	355
8.4	Hirnanhangsdrüse (Hypophyse)	355
8.4.1	Neurohypophyse (Hypophysenhinterlappen)	356
8.4.2	Adenohypophyse (Hypophysenvorderlappen)	357
8.5	Zirbeldrüse (Corpus pineale, Epiphyse)	359
8.6	Schilddrüse (Glandula thyroidea)	360
8.6.1	C-Zellen der Schilddrüse	362
8.6.2	Nebenschilddrüsen (Epithelkörperchen, Glandulae parathyroideae)	362
8.7	Nebennieren (Glandulae suprarenales)	363
8.7.1	Nebennierenrinde	363
8.7.2	Nebennierenmark	366
8.8	Inselorgan der Bauchspeicheldrüse (Pancreas)	367
8.9	Geschlechtsorgane	369
8.10	Andere hormonbildende Gewebe und Einzelzellen	370



9 Verdauungssystem 376

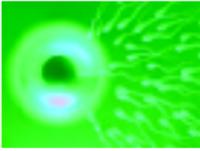
9.1	Allgemeines	376
9.2	Stoffwechsel, Energiebedarf und Nahrungsstoffe	376
9.2.1	Stoffwechsel	376
9.2.2	Energiebedarf	377
9.2.3	Nahrungsstoffe	379
9.2.4	Antioxidanzien (Radikalfänger)	384
9.2.5	Pflanzenwirkstoffe	385
9.2.6	Ballaststoffe	386
9.3	Verdauungsorgane	387
9.3.1	Mundhöhle (Cavitas oris)	387
9.3.2	Rachen (Pharynx)	397

9.3.3	Speiseröhre (Ösophagus)	400
9.3.4	Magen (Ventriculus, Gaster)	402
9.3.5	Dünndarm (Intestinum tenue, Enteron)	406
9.3.6	Dickdarm (Intestinum crassum)	411
9.3.7	Bauchfellverhältnisse und Mesenterien der Bauchorgane	416
9.3.8	Bauchspeicheldrüse (Pancreas)	418
9.3.9	Leber (Hepar)	420
9.3.10	Gallenblase (Vesica fellea) und Gallengang	424
9.4	Übersicht über die Verdauungsvorgänge	424
9.4.1	Fettverdauung	424
9.4.2	Kohlenhydratverdauung	426
9.4.3	Proteinverdauung	427



10 Nieren und ableitende Harnwege 438

10.1	Allgemeines	438
10.2	Nieren (Renes)	438
10.2.1	Aufgaben der Nieren	438
10.2.2	Übersicht über Bau und Funktion	438
10.2.3	Form und Lage	439
10.2.4	Nierenrinde (Cortex renalis) und Nierenmark (Medulla renalis)	440
10.2.5	Nierengefäße	443
10.2.6	Nierenkörperchen und Harnfilter	444
10.2.7	Glomeruläre Filtration	447
10.2.8	Nierenkanälchen und Sammelrohre	448
10.2.9	Zusammensetzung des Harns	452
10.3	Ableitende Harnwege	452
10.3.1	Nierenbecken (Pelvis renalis)	453
10.3.2	Harnleiter (Ureter)	453
10.3.3	Harnblase (Vesica urinaria)	455
10.3.4	Harnröhre (Urethra)	458



11 Geschlechtsorgane 466

11.1 Funktion und Aufbau der Geschlechtsorgane 466

11.2 Männliche Geschlechtsorgane 466

11.2.1 Übersicht 466

11.2.2 Hoden (Testes) 468

11.2.3 Nebenhoden (Epididymides) 470

11.2.4 Samenleiter (Ductus deferens) 472

11.2.5 Bläschendrüsen (Glandulae vesiculosae) oder Samenbläschen (Vesiculae seminales) 473

11.2.6 Vorsteherdrüse (Prostata) 473

11.2.7 Cowper-Drüsen (Glandulae bulbourethrales) 475

11.2.8 Zusammensetzung des Ejakulats 475

11.2.9 Kastration und Sterilisation 475

11.2.10 Äußere männliche Geschlechtsorgane 475

11.2.11 Erektion 477

11.2.12 Ejakulation 477

11.3 Weibliche Geschlechtsorgane 478

11.3.1 Übersicht 478

11.3.2 Eierstöcke (Ovarien) 479

11.3.3 Menstruationszyklus 484

11.3.4 Eileiter (Tuba uterina) 486

11.3.5 Gebärmutter (Uterus) 487

11.3.6 Scheide (Vagina) 488

11.3.7 Äußere weibliche Geschlechtsorgane 489

11.3.8 Weibliche Brust (Mamma) und Brustdrüse (Glandula mammaria) 490



12 Fortpflanzung, Entwicklung und Geburt 498

12.1 Allgemeines 498

12.2 Keimzellen 498

12.3 Befruchtung 499

12.3.1 Geschlechtsbestimmung 502

12.4 Eileitertransport und Furchung 503

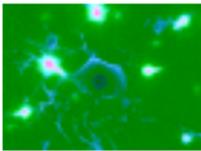
12.5	Implantation und Ausbildung der Plazenta	504
12.5.1	Aufbau der Plazenta	505
12.5.2	Nabelschnur (Funiculus umbilicalis)	508
12.6	Früh- und Embryonalentwicklung	508
12.6.1	Abkömmlinge der Keimblätter	509
12.6.2	Ausbildung der Körperform	510
12.7	Fetalentwicklung	511
12.7.1	Reifezeichen	513
12.7.2	Schwangerschaftsdauer und Errechnung des Geburtstermins	513
12.8	Geburt	514
12.8.1	Eröffnungsphase	515
12.8.2	Austreibungsphase	515
12.8.3	Phase nach dem Austritt	515
12.9	Postnatale Entwicklung	517
12.9.1	Körperlänge	517
12.9.2	Körpergewicht	518
12.9.3	Körperproportionen	518
12.9.4	Skelettwachstum	518
12.9.5	Pubertät	520
12.10	Anatomische Biotypologie	523
12.10.1	Leptosomer Typ	523
12.10.2	Pyknischer Typ	524
12.10.3	Athletischer Typ	524



13 **Zentrales und peripheres Nervensystem** 532

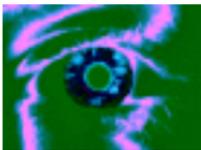
13.1	Gliederung und Aufgaben des Nervensystems	532
13.1.1	Gliederung	532
13.1.2	Aufgaben	533
13.2	Entwicklung des Nervensystems	533
13.3	Zentrales Nervensystem (ZNS)	534
13.3.1	Entwicklung und Einteilung	534
13.3.2	Gehirn (Encephalon)	536
13.3.3	Rückenmark (Medulla spinalis)	555
13.3.4	Bahnen der Willkürmotorik (Pyramidenbahn)	561
13.3.5	Extrapyramidal-motorisches System	567
13.3.6	Schädigung des zweiten motorischen Neurons (schlaffe Lähmung)	568
13.3.7	Schädigung des ersten motorischen Neurons (spastische Lähmung)	568

13.3.8	Rückenmarkreflexe	569
13.3.9	Hirn- und Rückenmarkshäute	572
13.3.10	Gehirn-Rückenmarksflüssigkeit und Ventrikelsystem	576
13.3.11	Blutversorgung des Gehirns	579
13.4	Peripheres Nervensystem (PNS)	584
13.4.1	Peripherer Nerv	585
13.4.2	Ganglien	585
13.4.3	Rückenmarksnerven (Spinalnerven)	585
13.4.4	Nervengeflechte (Plexus)	586
13.4.5	Hirnnerven	591



14 Vegetatives Nervensystem 604

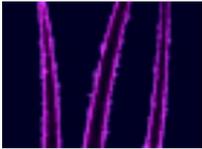
14.1	Funktion und allgemeiner Aufbau	604
14.1.1	Funktion	604
14.1.2	Allgemeiner Aufbau	606
14.2	Sympathisches Nervensystem	607
14.2.1	Funktion	607
14.2.2	Aufbau	608
14.2.3	Postsynaptische Rezeptoren an den Erfolgsorganen	610
14.3	Parasympathisches Nervensystem	611
14.3.1	Funktion	611
14.3.2	Aufbau	611
14.3.3	Kopfteil des Parasympathikus	612
14.3.4	Sakraler Parasympathikus	613
14.4	Darmwandnervensystem	615



15 Sinnesorgane 620

15.1	Rezeptoren und Sinneszellen	620
15.2	Auge	621
15.2.1	Augapfel (Bulbus oculi)	621
15.2.2	Optischer Apparat	631
15.2.3	Sehbahn	634

15.2.4	Hilfseinrichtungen	637
15.3	Ohr	641
15.3.1	Gehörorgan	641
15.3.2	Gleichgewichtsorgan	648
15.4	Geschmackssinn	651
15.5	Geruchssinn	652



16 Haut und Hautanhangsgebilde .. 664

16.1	Allgemeines	664
16.2	Haut (Cutis) und Unterhaut (Subcutis)	664
16.2.1	Hautschichten	664
16.2.2	Hautsinnesorgane	667
16.2.3	Aufgaben der Haut	667
16.3	Hautanhangsgebilde	668
16.3.1	Hautdrüsen	669
16.3.2	Haare	669
16.3.3	Nägel	670



Anhang 674

Abkürzungen	674
Messgrößen und Maßeinheiten	674
SI-Basiseinheiten	674
Vielfache und Bruchteile von Maßeinheiten (Zehnerpotenzen)	675
Konzentration und Umrechnungsbeziehungen	676
Glossar	678
Eigennamen in der Anatomie	689
Sachverzeichnis	692



Blut, Immunsystem und lymphatische Organe

7.1	Allgemeines	302
7.2	Blut	302
7.3	Immunsystem	324
7.4	Lymphatische Organe (Immunorgane)	330

7

7 Blut, Immunsystem und lymphatische Organe

7.1 Allgemeines

Die Zellen des Blutes und die Abwehrzellen als freie Bindegewebszellen sind zum Teil identischer Herkunft und leiten sich entwicklungsgeschichtlich beide aus dem Mesenchym her. Sie entstehen größtenteils in derselben Bildungsstätte, dem Knochenmark, in ihrem Aufenthalts- und Wirkort (Blut bzw. Bindegewebe) unterscheiden sie sich jedoch beträchtlich.

7

7.2 Blut

Man kann das Blut als Gewebe, als eine Art flüssiges Transportgewebe ansehen, dessen Interzellulärsubstanz das *Blutplasma* darstellt. Die zellulären Anteile dieses Gewebes sind

- rote Blutkörperchen (Erythrozyten),
- weiße Blutkörperchen (Leukozyten) und
- Blutplättchen (Thrombozyten) (Abb. 7.1).

Hämatokrit. Den prozentualen Anteil aller Blutzellen am Gesamtblutvolumen (100%) bezeichnet man als Hämatokrit (Abb. 7.3). Er liegt etwa bei 45% und ist gewöhnlich bei Männern geringfügig höher (47%) als bei Frauen (43%).

Die gesamte Blutmenge beim Menschen beträgt etwa 8% des Körpergewichtes, d. h. eine 70 kg schwere Person besitzt ungefähr 5,6 l Blut. 80% des gesamten Blutvolumens zirkulieren im großen Körperkreislauf, 20% im kleinen Lungenkreislauf.

7.2.1 Aufgaben des Blutes

Das Blut hat vielfältige Funktionen, die in unmittelbarem Zusammenhang mit seinen Bestandteilen und dem Gefäßsystem stehen. Während die Gefäße eine allgemeine Verteilerfunktion übernehmen (Wärmeregulation und Stoffverteilung), haben die geformten und nicht geformten Blutbestandteile zum Teil sehr spezifische Funktionen:

- Rote Blutkörperchen z. B. übernehmen den Transport der Atemgase von der Lunge zu den Geweben (Sauerstoff) und vom Gewebe zurück zur Lunge (Kohlendioxid).
- Weiße Blutkörperchen dienen der Abwehr von Krankheitserregern und körperfremden Stoffen (Immunabwehr). Diese Aufgaben verrichten sie größten-

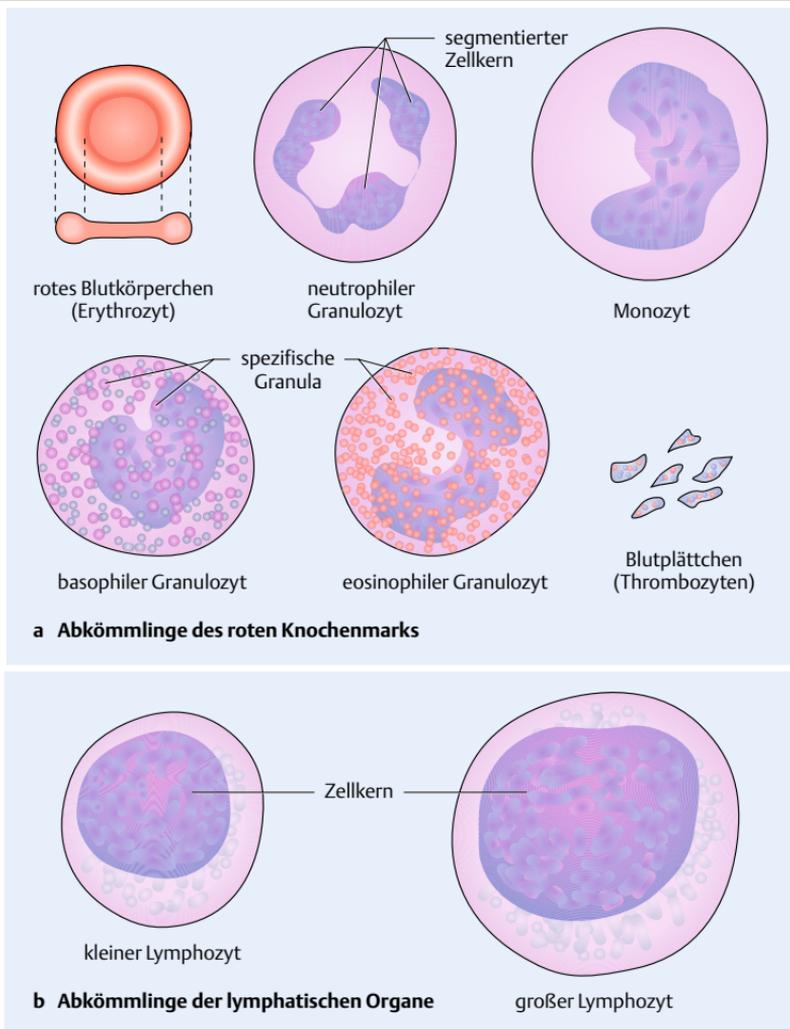


Abb. 7.1 **Blutzellen.** Blutzellen werden von einer gemeinsamen Stammzelle, dem Hämoytoblasten, im roten Knochenmark gebildet und nach einer bestimmten Zeit der Reifung in das periphere Blut ausgeschwemmt. Mit Ausnahme der Lymphozyten, die sich auch in lymphatischen Organen vermehren, werden alle Blutzellen zeitlebens im roten Knochenmark hergestellt.

teils außerhalb der Blutgefäße im Bindegewebe. Das Blut dient hierbei lediglich als Transportmittel von den Bildungsstätten (Knochenmark) zu den Wirkorten.

- Die Blutflüssigkeit, das Blutplasma, erfüllt unterschiedliche Transportfunktionen. Es übernimmt z. B. den Transport
 - von Nährstoffen vom Ort der Aufnahme (Darmzotten) zum Ort des Verbrauchs (Organe),
 - von Stoffwechselprodukten zu den Ausscheidungsorganen (Niere),
 - von körpereigenen Stoffen (Hormonen) zu ihren Wirkorten, aber auch
 - von Wärme aus stoffwechselaktiven Organen zu oberflächennahen Bereichen.
- Im Rahmen der Blutgerinnung sind bei Verletzungen von Gefäßen die im Blutplasma gelösten Gerinnungsfaktoren, z. B. das Fibrinogen, sowie die Blutplättchen von lebenswichtiger Bedeutung.

Darüber hinaus enthält das Blutplasma neben Wasser eine Vielzahl verschiedener Salze (Elektrolyte), Proteine (Albumine und Globuline), Lipide (Fettsäuren und Cholesterin), Kohlenhydrate (Glukose als Blutzucker) sowie zahlreiche Vitamine, Spurenelemente und Enzyme.

Die weitgehend gleichbleibende Zusammensetzung, ein relativ konstanter osmotischer Druck und ein nur geringfügig schwankender pH-Wert (7,2 – 7,4) sind weitere Besonderheiten des Blutes (sog. „stabiles inneres Milieu“).

7.2.2 Blutzellen

Für die geformten Bestandteile des Blutes lassen sich folgende Durchschnittswerte pro Mikroliter ($\mu\text{l} = \text{mm}^3$) angeben:

- Erythrozyten: 4,5 – 5,5 Mio.,
- Leukozyten: 4000 – 8000,
- Thrombozyten: 150 000 – 350 000.

Innerhalb der Leukozyten unterscheidet man weiter (Differenzialblutbild):

- neutrophile Granulozyten: 60 – 70%,
- eosinophile Granulozyten: 2 – 3%,
- basophile Granulozyten: 0,5 – 1%,
- Lymphozyten: 20 – 30%,
- Monozyten: 4 – 5%.

Erythrozyten

Erythrozyten sind runde, scheibenförmige Gebilde mit einem Durchmesser von etwa $7,5 \mu\text{m}$. Sie sind auf beiden Seiten eingedellt und haben auf diese Weise ein optimales Oberflächen/Volumen-Verhältnis (Abb. 7.1 a). Diese Form begünstigt die Sauerstoffaufnahme und -abgabe (kurze Diffusionsstrecken) und erleichtert ihre passive Verformbarkeit beim Passieren enger Kapillaren. Ihr gesamter Zellin-

halt besteht nahezu ausschließlich aus dem roten, eisenhaltigen Blutfarbstoff Hämoglobin, der den Sauerstoff reversibel binden kann. Er lässt sauerstoffangereichertes Blut (arterialisiertes Blut) hellrot, sauerstoffarmes Blut hingegen dunkelrot (venöses Blut) erscheinen.

Die Zahl der roten Blutkörperchen beträgt beim Mann durchschnittlich 5,3 Mio./ μl Blut und bei der Frau 4,6 Mio./ μl , wobei die Zahl vom Sauerstoffbedarf des Körpers und vom Sauerstoffangebot in der Lunge abhängt.

So nimmt z. B. in großen Höhen die Anzahl der Erythrozyten zu (Polyglobulie). Sind aufgrund krankhafter Prozesse ihre Bildung oder Lebensdauer unzureichend, spricht man von einer Anämie (S. 318). Häufigste Ursachen hierfür sind Eisenmangel sowie Mangel an Vitamin B₁₂ oder Folsäure.

Bildung, Lebensdauer und Abbau

Die Bildungs- und Reifungsstätte der Erythrozyten ist das rote Knochenmark, in dem sie aus kernhaltigen Vorstufen (Stammzellen) gebildet werden. Im Laufe ihrer Reifung verlieren sie Zellkern und Zellorganellen und werden in das periphere Blut ausgeschwemmt. Beim Menschen werden etwa 160 Millionen Erythrozyten pro Minute gebildet. Im Blut sind die jüngsten Erythrozyten (etwa 1%) an einer durch besondere Färbung darstellbaren körnigen Struktur zu erkennen (Retikulozyten). Nach Blutverlusten z. B. ist die Retikulozytenzahl im peripheren Blut erhöht.

Die Lebensdauer der roten Blutzellen beträgt durchschnittlich 120 Tage. Ihr Abbau erfolgt im Wesentlichen in der Milz und in der Leber. Aus den eisenfreien Hämoglobinanteilen entstehen Gallenfarbstoffe (Bilirubin). Das frei werdende Eisen wird gespeichert und erneut zum Aufbau von Hämoglobin verwendet.

In hypertonen Lösungen verlieren Erythrozyten Wasser und sie schrumpfen (Stechapfelform), in hypotonen Lösungen hingegen nehmen sie Wasser auf und platzen (Hämolyse). Hierbei wird Hämoglobin freigesetzt und die Zellen werden durchsichtig (lackfarben).

Leukozyten

Neben den roten Blutkörperchen enthält das Blut relativ farblose (weiße) Blutzellen, die Leukozyten (Abb. 7.1 a u. b). Zu ihnen zählt man

- die Granulozyten,
- die Lymphozyten und
- die Monozyten.

Ihre Lebenszeit ist, im Gegensatz zu derjenigen der Erythrozyten, sehr unterschiedlich und kann Stunden, aber auch Jahre betragen. Die weißen Blutkörperchen bilden zusammen mit den lymphatischen Organen (z. B. Milz, Thymus, Lymphknoten, Mandeln etc.) das Immunsystem, das man in ein unspezifisches und ein spezifisches Immunsystem gliedert (S. 324).

Die Anzahl der Leukozyten im Blut schwankt zwischen 4000 und 8000/ μl . Bei Entzündungen kann die Zahl deutlich über 10 000/ μl erhöht sein (Leukozytose). Sind die Leukozyten unter 2000/ μl vermindert, spricht man von einer Leukopenie (z. B. nach Schädigung der Bildungsstätten). Wie die roten Blutkörperchen, so werden auch die Leukozyten im roten Knochenmark gebildet und nach Heranreifung und Vermehrung in das periphere Blut ausgeschwemmt. Eine Ausnahme hierbei bilden die Lymphozyten, deren Stammzellen sich ebenfalls im Knochenmark befinden, die sich jedoch in anderen lymphatischen Organen (z. B. im Thymus oder in den Lymphknoten) vermehren und differenzieren (s. T-, B-Lymphozyten, S. 327).

7

Der weitaus größte Teil der Leukozyten benutzt das zirkulierende Blut nur als Transportsystem vom Bildungsort im Knochenmark zu den Funktionsorten. Ihre Tätigkeit im Rahmen der Immunabwehr entfalten die Leukozyten fast ausschließlich außerhalb des Gefäßsystems, d. h. im Bindegewebe und in den lymphatischen Organen. Dort können sie sich aufgrund ihrer amöboiden Eigenbeweglichkeit fortbewegen, nachdem sie die Wand der Kapillaren und der postkapillären Venolen durchwandert haben (Leukozytendiapedese).

Granulozyten

Je nach Anfärbbarkeit ihrer Granula (membranbegrenzte Zelleinschlüsse) unterscheidet man (Abb. 7.1 a)

- neutrophile Granulozyten,
- eosinophile Granulozyten und
- basophile Granulozyten.

Sie besitzen alle einen charakteristischen, mehrfach segmentierten Kern („segmentkernige Granulozyten“). Unreife Stadien hingegen erkennt man an ihren stabförmigen Kernen („stabkernige Granulozyten“).

Neutrophile Granulozyten. Diese Granulozyten werden aufgrund ihrer Eigenschaft zur Phagozytose auch als „Fresszellen“ bezeichnet. Sie gehören zu den Zellen des unspezifischen Immunsystems, die als Erste am Entzündungsort eintreffen. Ihre Granula enthalten eine Vielzahl lysosomaler Enzyme, die aufgenommene Krankheitserreger und Zelltrümmer abtöten und sie somit unschädlich machen. Dabei gehen die Granulozyten meist selbst zugrunde (Eiterbildung).

Eosinophile Granulozyten. Diese Zellen sind ebenfalls zur Phagozytose befähigt, v. a. von Antigen-Antikörper-Komplexen (s. S. 328). Sie sind an allergischen Reaktionen beteiligt, indem sie z. B. überschüssiges, von Mastzellen bzw. basophilen Granulozyten ausgeschüttetes Histamin binden und inaktivieren können. Ihre Hauptaufgabe besteht somit in der Begrenzung allergischer Reaktionen. Außerdem enthalten ihre Granula eine Reihe aggressiver Enzyme, die im Bedarfsfall freigesetzt werden und die Zielzellen schädigen.

Basophile Granulozyten. Sie machen im menschlichen Blut einen nur sehr geringen Teil aus. Ihre Granula enthalten hauptsächlich Histamin und Heparin. Während Histamin bei der Auslösung allergischer Sofortreaktionen beteiligt ist (Steigerung der Gefäßdurchlässigkeit, Kontraktion der glatten Muskulatur), wirkt Heparin der Blutgerinnung entgegen.

Lymphozyten

Die im strömenden Blut vorkommenden Lymphozyten (kleine Lymphozyten) haben etwa die Größe von Erythrozyten, während die sog. großen Lymphozyten sich vorwiegend in den lymphatischen Organen aufhalten (Abb. 7.1 b). Lymphozyten haben einen auffallend großen Zellkern und ein zellorganellenreiches Zytoplasma. Sie werden als Zellen des spezifischen Abwehrsystems ebenfalls im Knochenmark gebildet, gelangen danach über den Blutweg jedoch in die verschiedenen lymphatischen Organe, wo sie sich zu spezifischen Immunzellen entwickeln (s. Immunsystem, S. 324).

Monozyten

Die größten der weißen Blutzellen sind die Monozyten (Abb. 7.1 a). Sie haben einen ovalen bis nierenförmigen Zellkern und zahlreiche Lysosomen im Zytoplasma, werden wie die anderen Leukozyten im Knochenmark gebildet, halten sich aber nach ihrer Ausschleusung nur etwa 20–30 Stunden im Blut auf. Danach verlassen sie das Blutgefäßsystem und bilden sich im Gewebe zu Makrophagen um. Monozyten und Makrophagen haben vielfältige Aufgaben innerhalb des Abwehrsystems und sind v. a. an der unspezifischen Immunabwehr beteiligt. Dazu gehören Phagozytose und intrazelluläre Abtötung von Bakterien, Pilzen, Parasiten und geschädigten körpereigenen Zellen. Darüber hinaus sind sie aber auch an der spezifischen Immunabwehr beteiligt, indem sie Informationen über körperfremde Antigene an die Lymphozyten weitergeben (s. Antigenpräsentation, S. 325).

Thrombozyten

Die Thrombozyten oder Blutplättchen spielen eine wichtige Rolle bei der Blutgerinnung und der Blutstillung. Sie entstehen im Knochenmark aus Knochenmarksriesenzellen (Megakaryozyten) als Zytoplasmaabschnürungen und werden in Form unregelmäßig geformter Plättchen in das Blut ausgeschwemmt (Abb. 7.1 a). Ihr Zytoplasma ist kernlos und besitzt wenige Zellorganellen. Thrombozyten haben eine Lebensdauer von 5–10 Tagen und werden danach in der Milz abgebaut. Bei Verletzung eines Blutgefäßes lagern sie sich an der Gefäßwand ab, zerfallen und setzen Enzyme (z. B. Thrombokinasen) frei, die zusammen mit weiteren Faktoren (Thrombin, Fibrinogen) die Blutgerinnung auslösen.

7.2.3 Blutgruppen und Bluttransfusionen

Auf der Oberfläche der Erythrozyten befindet sich eine große Zahl unterschiedlicher zuckerhaltiger Membranbestandteile (Glykolipide bzw. -proteine), die sog. *Blutgruppenantigene*. Man nennt sie Antigene, da sie in einem fremden Organismus die Bildung von Antikörpern hervorrufen (s. Immunsystem, S. 324).

Beim Menschen sind mehr als 100 solcher vererbaren Antigene vorhanden, von denen v. a. das ABO- und das Rhesussystem klinische Bedeutung haben.

Blutgruppen

7

Innerhalb des ABO-Systems (0 = null) unterscheidet man 4 Blutgruppen:

- Erythrozyten mit dem Antigen A (Blutgruppe A),
- Erythrozyten mit dem Antigen B (Blutgruppe B),
- Erythrozyten mit Antigen A und Antigen B (Blutgruppe AB) sowie
- Erythrozyten mit keinem der beiden Antigene (Blutgruppe 0).

Außerdem befinden sich im Blutplasma *Antikörper* gegen das jeweils fehlende Antigen. Das heißt:

- Bei Personen mit der Blutgruppe A sind Antikörper gegen B (Anti-B) vorhanden.
- Dementsprechend enthält Plasma der Blutgruppe B Antikörper gegen A (Anti-A).
- Im Falle der Blutgruppe AB enthält das Plasma keinen der beiden Antikörper.
- Bei der Blutgruppe 0 sind sowohl Anti-A- als auch Anti-B-Antikörper vorhanden.

Anders als bei der normalen Antikörperbildung ist zur Bildung der Antikörper des ABO-Systems kein Kontakt mit dem fremden Antigen notwendig. Sie entwickeln sich im Verlauf der ersten Lebensmonate und werden aufgrund ihrer agglutinierenden Wirkung auch Agglutinine genannt, während die Antigene auf den Erythrozyten als Agglutinogene bezeichnet werden (Tab. 7.1).

Tab. 7.1 Blutgruppenantigene (Agglutinogene) und ihre zugehörigen Serumantikörper (Agglutinine)

Antigen auf den Erythrozyten (Blutgruppe)	Antikörper im Blutserum (Blutserum = Blutplasma ohne Fibrinogen)
A	Anti-B
B	Anti-A
AB	keine
0	Anti-A und Anti-B

Bluttransfusion

Kommt es bei einer Bluttransfusion zur Übertragung von gruppenungleichem Blut, verklumpen (agglutinieren) die Erythrozyten durch Reaktion der Blutgruppenantigene mit ihren entsprechenden Antikörpern. Dadurch werden die Erythrozyten geschädigt und sie hämolysieren. Ein solcher Transfusionszwischenfall ist besonders ausgeprägt, wenn das Blutplasma des Empfängers der Blutspende Antikörper gegen die Spendererythrozyten enthält. Sind im umgekehrten Fall im Spenderblut Antikörper gegen die Empfängererythrozyten vorhanden, ist die Reaktion weniger stark ausgeprägt, da die Antikörper in der Blutbahn des Empfängers sehr stark verdünnt werden.

Um solche Zwischenfälle zu vermeiden, muss vor jeder Transfusion die genaue Blutgruppenkonstellation von Empfänger und Spender bestimmt und mithilfe einer *serologischen Verträglichkeitsüberprüfung* kontrolliert werden. Hierbei werden jeweils einige Tropfen Blut des Empfängers und des Spenders bzw. der Blutkonserve mit jeweils 2 verschiedenen fertigen Testseren vermischt, die zum einen Antikörper gegen das Antigen A (Anti-A) und zum anderen Antikörper gegen das Antigen B (Anti-B) enthalten. Diese Methode ist nichts weiter als eine Überprüfung der Blutgruppen des ABO-Systems (Abb. 7.2). Um auch Antigene und Antikörper zu bestimmen, die vom ABO-System nicht erfasst werden (z. B. das Rhesussystem), wird für jede Blutkonserve die *große und kleine Kreuzprobe* zusätzlich durchgeführt:

- Bei der großen Kreuzprobe (Major-Reaktion) werden Spendererythrozyten (ohne Serum) mit dem Serum des Empfängers gemischt.
- Bei der kleinen Kreuzprobe (Minor-Reaktion) werden Spenderserum und Empfängererythrozyten auf ihre Verträglichkeit überprüft.

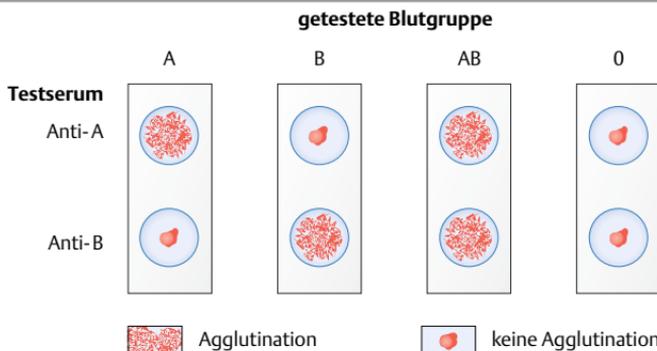


Abb. 7.2 **Blutgruppenbestimmung.** Vereinfachte Darstellung der Agglutinationsreaktion nach Zugabe verschiedener Testseren (Anti-A und Anti-B).