

# 12

## Blut und Immunsystem

### 12.1 Blut

#### 12.1.1 Aufgaben

Das Blut übernimmt im Körper drei wesentliche Aufgaben:

- **Transport:** Über das Blut gelangen Atemgase (Sauerstoff und Kohlendioxid), Nährstoffe, Stoffwechselprodukte, Elektrolyte und Hormone an ihre Zielorte. Außerdem dient es dem Wärmetransport.
- **Blutstillung:** Blut besitzt die Fähigkeit zu gerinnen. So kann es die Gefäßwand bei kleineren Verletzungen abdichten und den Blutverlust stoppen.
- **Erregerabwehr:** Einige Blutbestandteile sind Teil des Immunsystems. Sie sind in der Lage, Krankheitserreger, die in den Körper eingedrungen sind, unschädlich zu machen.

#### 12.1.2 Blutvolumen

Das Blutvolumen (Gesamtmenge an Blut, die sich im Körper befindet) beträgt bei einem Erwachsenen **6–8 % des Körpergewichts**. Damit verfügt beispielsweise ein Mensch mit einem Körpergewicht von 70 kg über etwa **5 l Blut**. Diese Werte gelten für Menschen mit einem normalen Fettanteil. Da Fettgewebe nur wenig durchblutet ist, liegt der Anteil des Blutes am Körpergewicht bei stark Übergewichtigen niedriger.

Männer haben im Verhältnis zu ihrem Körpergewicht ein größeres Blutvolumen als Frauen. Neben dem Geschlecht spielt auch das Alter eine Rolle. So verfügen:

- Frauen über ca. 60 ml Blut/kg Körpergewicht
- Männer über ca. 70 ml Blut/kg Körpergewicht
- Kleinkinder über ca. 85 ml Blut/kg Körpergewicht
- Neugeborene über ca. 90 ml Blut/kg Körpergewicht

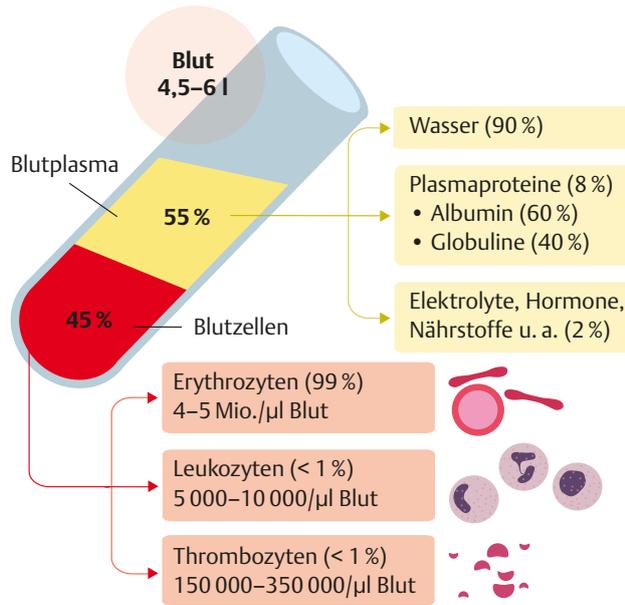
Entspricht das Blutvolumen diesen Normalwerten, spricht man von einer **Normovolämie**. Ein vermindertes Blutvolumen in den Gefäßen wird als **Hypovolämie** bezeichnet. Gründe hierfür können innere oder äußere Blutungen sein. Auch ein größerer Flüssigkeitsverlust, z. B. bei Durchfall oder bei Einnahme von entwässernden Medikamenten, kommt als Ursache einer Hypovolämie infrage. Die **Hypervolämie**, also ein erhöhtes Blutvolumen, tritt seltener auf. Sie entsteht im Rahmen einer Hyperhydratation (S. 279), z. B. durch Infusion einer zu großen Flüssigkeitsmenge.

#### **Patho** Blutverluste

*Geringe Blutverluste, z. B. eine Blutspende von ca. 500 ml, kann der Körper ohne Schwierigkeiten oder klinische Symptome ausgleichen. Problematisch wird es ab einem Verlust von ca. 30 % des Gesamtvolumens: Die Herzfrequenz steigt, der Blutdruck sinkt, die Urinausscheidung nimmt ab. Der Patient ist blass, unruhig, schwitzt kalt und bekommt Angst, er kann auch das Bewusstsein verlieren. Diese durch den Blutverlust bedingte Kreislaufsituation wird als **Volumenmangelschock** oder **hypovolämischer Schock** bezeichnet.*



Abb. 12.1 Die verschiedenen Bestandteile des Blutes.



Erythrozyten machen den Hauptanteil der Blutzellen aus, Wasser den Hauptanteil des Blutplasmas.

## 12.1.3 Zusammensetzung des Blutes

Das Blut besteht zu etwa 55% aus **Blutplasma** und zu etwa 45% aus **Blutzellen** (► Abb. 12.1). Zu den Blutzellen gehören:

- die **Erythrozyten** (rote Blutkörperchen; das griechische Wort „erythros“ bedeutet „rot“)
- die **Leukozyten** (weiße Blutkörperchen; das griechische Wort „leukos“ bedeutet „weiß“)
- die **Thrombozyten** (Blutplättchen; das griechische Wort „thrombos“ bedeutet „Klumpen, Pfropf“)

Zwischen den Leukozyten und den Erythro- und Thrombozyten bestehen zwei grundlegende Unterschiede:

Die **Leukozyten** besitzen einen **Zellkern** und sind damit Zellen im engeren Sinne. Außerdem sind sie in der Lage, das Blutgefäß zu verlassen und ins **Gewebe** überzutreten.

Die **Erythrozyten** und die **Thrombozyten** haben **keinen Zellkern** und sind damit streng genommen keine echten Zellen. Ihre Funktion kann man sich vorstellen wie die eines Briefumschlags: Sie bieten Stoffen, die nicht oder nur schlecht im Plasma transportiert werden können (z. B. Sauerstoff oder einige Gerinnungsfaktoren), die Möglichkeit, ihren Zielort zu erreichen. Erythrozyten und Thrombozyten können das Blutgefäß im Normalfall **nicht** verlassen.

### Patho Bluttransfusionen

Bei Transfusionen wird dem Patienten meist nur der Anteil des Blutes verabreicht, den er am dringendsten benötigt. Daher wird das Spenderblut unterschiedlich aufbereitet:

- **Erythrozytenkonzentrat (EK):** Aus dem gespendeten Blut werden die Erythrozyten gewonnen und weiterverarbeitet. EKs werden meist bei einem Hb < 6 g/dl verabreicht.
- **Fresh Frozen Plasma (FFP):** Das schockgefrorene Plasma enthält keine zellulären Bestandteile, aber Gerinnungsfaktoren (S. 344). Es wird v. a. bei Gerinnungsstörungen und akuten Blutungen gegeben.
- **Humanes Albumin:** Es wird aus Plasmakonzentrat gewonnen, aus dem alle weiteren Bestandteile entfernt werden. Albumin wird

bei Eiweißverlusten verabreicht, z. B. bei großflächigen Verbrennungen.

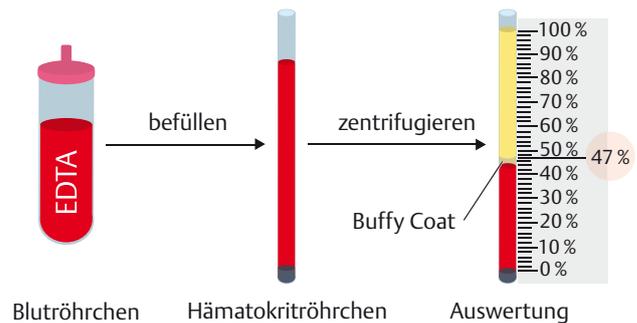
- **Thrombozytenkonzentrat (TK):** Thrombozyten werden aus dem Plasma isoliert. Der Einsatz von TK ist angezeigt bei einem ausgeprägten Mangel an Thrombozyten (Thrombozytopenie).

### Blitzlicht Pflege Empfindliche Konserven

In den meisten Häusern sind die Pflegefachpersonen dafür verantwortlich, dass die Blutkonserve vom Lieferservice angenommen und kontrolliert wird, ob es sich dabei tatsächlich um das laut Lieferschein bestellte Blutprodukt handelt. Gerade Erythrozytenkonzentrate sind sehr empfindlich, bei unvorsichtiger Behandlung können die Erythrozyten zerstört werden. Gehen Sie mit diesen Konserven deshalb besonders sorgsam um.

**Hämatokrit und Viskosität** • Der Anteil der Blutzellen am Blutvolumen wird als **Hämatokrit** (Hkt) bezeichnet (► Abb. 12.2). Leukozyten und Thrombozyten machen zusammen nur ca. 1% der Blutzellen aus, die Erythrozyten dagegen etwa 99%. Deshalb kann man den Hämatokrit mit dem Anteil der Erythrozyten am Blutvolumen gleichsetzen (► Tab. 12.1). Der Hämatokrit hat Auswirkungen auf die Fließfähigkeit des Blutes, sie nimmt mit steigendem Hämatokrit immer mehr ab. Diese „Zähigkeit“ des Blutes wird als **Viskosität** bezeichnet.

Abb. 12.2 Hämatokritbestimmung (Referenzmethode).



Ein mit EDTA-Blut gefülltes Hämatokritröhrchen wird zentrifugiert, sodass sich die festen Blutbestandteile absetzen. EDTA verhindert die Blutgerinnung. Anschließend wird der Hämatokritwert an der Auswertungsschablone abgelesen. Die Trennschicht zwischen dem Blutplasma und den abgesetzten Blutzellen (Buffy Coat) enthält Leukozyten und Blutplättchen. Heute wird der Hämatokrit üblicherweise von vollautomatischen Analysegeräten berechnet. Die Zentrifugation wird nur noch als Referenzmethode eingesetzt.

Tab. 12.1 Hämatokrit.

	Normalwert*	Referenzbereich*
Frauen	42 % (0,42)	37–47 % (0,37–0,47)
Männer	47 % (0,47)	40–52 % (0,40–0,52)
Neugeborene	60 % (0,60)	52–68 % (0,52–0,68)
Säuglinge älter 3 Monate und Kinder	36 % (0,36)	31–40 % (0,31–0,40)

\* Ob der Hämatokrit in Prozent oder ohne Einheit (hier in Klammern) angegeben wird, ist von Labor zu Labor unterschiedlich. Die Referenzbereiche geben an, wie weit der gemessene Wert vom Normalwert abweichen darf, ohne als krankhaft zu gelten.

## Patho Hämatokrit

Ein **erniedrigter Hämatokrit-Wert** kann ein Hinweis auf eine verminderte Bildung von Erythrozyten sein. Auch eine Hyperhydratation (S. 279) kann den Hämatokrit sinken lassen. Ein **erhöhter Hämatokrit-Wert** kann bei Flüssigkeitsmangel auftreten oder bei einer vermehrten Bildung von Erythrozyten (Polyglobulie), z. B. nach längerem Aufenthalt in großen Höhen oder bei einer krankhaften Erythrozyten-Neubildung im Knochenmark.

**Zellzahlen** • Die Erythrozyten machen nicht nur volumemäßig den größten Anteil der Blutzellen aus, sondern auch hinsichtlich ihrer Zahl. Die Zellzahlen liegen beim Gesunden **pro Mikroliter (µl) Blut** bei:

- 4–5,5 Mio Erythrozyten
- 4 000–10 000 Leukozyten
- 150 000–350 000 Thrombozyten



### WISSEN TO GO

#### Aufgaben und Zusammensetzung des Blutes

Das Blut **transportiert** Atemgase, Nährstoffe, Stoffwechselprodukte, Elektrolyte und Hormone zu den Zielorganen. Mit seiner Fähigkeit zur **Gerinnung** verschließt es bei kleineren Gefäßverletzungen die Wunde. Viele seiner Bestandteile sind außerdem an der **Immunabwehr** beteiligt.

Das **Blutvolumen** eines Erwachsenen beträgt 6–8 % des Körpergewichts (bei 70 kg also **ca. 5 l**). Das Blut besteht zu **55 %** aus **Blutplasma** und zu **45 %** aus **Blutzellen**. Man unterscheidet:

- die roten Blutkörperchen (**Erythrozyten**): 4–5,5 Mio./µl Blut (ca. 99 % aller Blutzellen)
- die weißen Blutkörperchen (**Leukozyten**): 4 000–10 000/µl Blut
- die Blutplättchen (**Thrombozyten**): 150 000–350 000/µl Blut

Der Anteil der Blutzellen am gesamten Blutvolumen ist der **Hämatokrit** (Hkt). Je höher der Hämatokrit ist, desto höher ist die **Viskosität** des Blutes, d. h., desto zäher fließt es.

## Blutplasma

Entfernt man die Blutzellen aus dem Blut, bleibt das **Blutplasma** übrig. Im Normalfall ist es klar und von goldgelber Farbe. Seine Gesamtmenge liegt bei 2,5–3,0 l.

Das Blutplasma besteht zu etwa 90 % aus **Wasser**, die restlichen 10 % sind gelöste Bestandteile, hauptsächlich **Proteine** (ca. 8 %) und **Elektrolyte** (ca. 2 %) (► Abb. 12.1). In geringerer Menge enthält das Blutplasma außerdem:

- Nährstoffe
- Stoffwechselprodukte
- Hormone
- gelöste Atemgase

## Plasmaproteine

Die meisten Plasmaproteine werden in der Leber gebildet (S. 236). Den größten Anteil an den Plasmaproteinen (ca. 60 %) macht das **Albumin** aus. Die nächstgrößere Gruppe (ca. 40 %) sind die **Globuline**. Plasmaproteine können aufgrund ihrer Größe die Blutgefäße normalerweise nicht verlassen.

**Albumin** • Es erfüllt im Blutplasma im Wesentlichen zwei Aufgaben. Es dient als **Transportprotein** für Stoffe, die nicht wasserlöslich sind (► Tab. 12.2), und ist hauptverantwortlich für die Aufrechterhaltung des **kolloidosmotischen Drucks**. Der kolloidosmotische Druck ist wichtig für die Mikrozirkulation (S. 148), also den Flüssigkeitsaustausch im Kapillargebiet. Darüber hinaus ist Albumin als Teil des **Proteinpuffers** auch an der Regulation des Blut-pH-Wertes beteiligt. Hierbei spielt allerdings das Hämoglobin der Erythrozyten eine größere Rolle. Albumin kommt im Blutplasma in einer Konzentration von 40–60 g/l vor.

Tab. 12.2 Funktionen des Albumins und der Globuline. Für die Globuline sind nur Beispiele genannt.

Plasmaprotein	Funktionen	Beispiele
Albumin	Transport	u. a. Hormone (z. B. Schilddrüsen- und Steroidhormone), Fettsäuren, Wirkstoffe von Medikamenten
	kolloidosmotischer Druck	Flüssigkeitsaustausch im Kapillargebiet
	Regulation des Blut-pH-Wertes	Teil des Proteinpuffers
α <sub>1</sub> -Globuline	Transport	u. a. Fette und Hormone (z. B. Kortisol, Progesteron)
	Blutgerinnung	Gerinnungsfaktor
α <sub>2</sub> -Globuline	Transport	freies Hämoglobin, Kupfer, Zink
	Blutgerinnung	Hemmung der Gerinnung, Fibrinolyse
β-Globuline	Transport	u. a. Fette und Eisen
	Blutgerinnung	Gerinnungsfaktor
	Entzündungsmarker	werden diagnostisch genutzt
γ-Globuline	Immunabwehr	Antikörper

# BLUT

Das **Blutvolumen** – die Gesamtmenge an Blut im Körper – macht bei einem Erwachsenen 6–8 % des Körpergewichts aus. Die genauen Werte sind abhängig von Geschlecht und Alter.

2,5–3,0 l

beim Erwachsenen

90 % Wasser

2 % Elektrolyte

8 % Proteine können aufgrund ihrer Größe die Blutgefäße nicht verlassen

55 %

## BLUTPLASMA

abzüglich der Gerinnungsfaktoren = **Blutserum**

60 %  
**Albumin**  
(40–60 g/l)

- dient als Transportprotein für nicht wasserlösliche Stoffe
- hauptverantwortlich für die Aufrechterhaltung des kolloidosmotischen Drucks

40 %  
**Globuline**  
(25–30 g/l)

- werden in 4 Gruppen eingeteilt
- unterschiedliche Funktionen

### WEISSE BLUTKÖRPERCHEN

Menge: 4 000–10 000/μl Blut

Durchmesser: je nach Zelltyp 6–20 μm

Lebensdauer: je nach Zelltyp Stunden bis mehrere Jahre

**Hauptaufgabe:** Immunabwehr

- besitzen einen Zellkern
- sind in der Lage, das Blutgefäß zu verlassen und ins Gewebe überzutreten

2 % **LEUKOZYTEN & THROMBOZYTEN**

(ca. 1 % aller Blutzellen)

### BLUTPLÄTTCHEN

Menge: 150 000–350 000/μl Blut

Durchmesser: 1–3 μm

Lebensdauer: 8–10 Tage

**Aufgabe:** Blutstillung

IM BLUT

IM GEWEBE

Hämatokrit (Hkt) = Anteil der Blutzellen am Blutvolumen

43 %

## ERYTHROZYTEN

(ca. 99 % aller Blutzellen)

- haben keinen Zellkern
- dienen dem Transport bestimmter Stoffe (v.a. O<sub>2</sub> bzw. Gerinnungsfaktoren) im Blut
- können das Blutgefäß im Normalfall nicht verlassen

IM BLUT

### ROTE BLUTKÖRPERCHEN

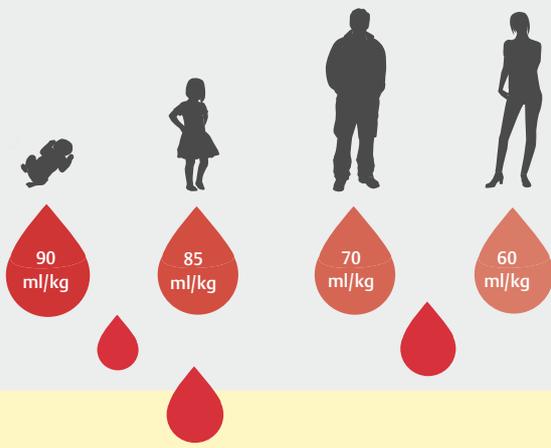
Menge: 4–5,5 Mio/μl Blut

Durchmesser: 7,5 μm

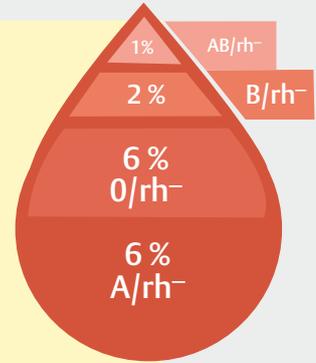
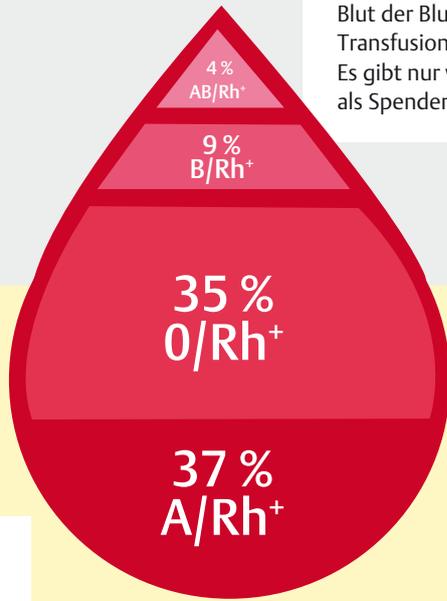
Lebensdauer: ca. 120 Tage

**Hauptaufgabe:** Transport von Atemgasen (O<sub>2</sub> und CO<sub>2</sub>)





Die **Blutgruppe** hängt von bestimmten Oberflächenmerkmalen der Erythrozyten (Blutgruppenantigenen) ab. Blut der Blutgruppe 0 mit dem Merkmal rh<sup>-</sup> ist bei Transfusionen mit allen anderen Blutgruppen kompatibel. Es gibt nur wenige Menschen dieser Blutgruppe. Sie sind als Spender sehr wichtig.



**α<sub>1</sub>-Globuline**

- v.a. Transportproteine
- einige sind Teil des Blutgerinnungssystems

**α<sub>2</sub>-Globuline**

**β-Globuline**

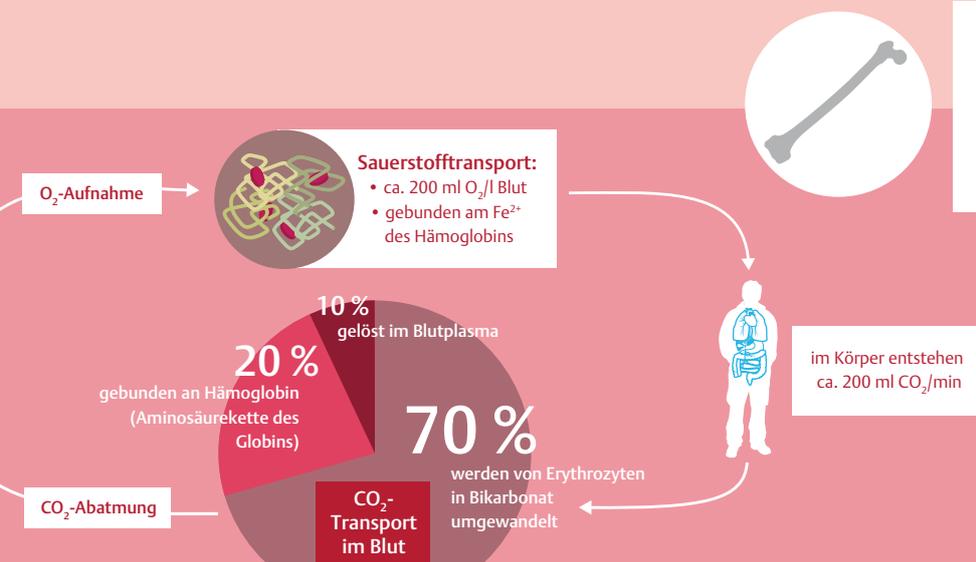
- auch als Immunglobuline (Ig) bezeichnet
- sind als Antikörper Teil des Immunsystems
- werden von Plasmazellen (einer Form der B-Lymphozyten) gebildet

**γ-Globuline**

Weitere Plasmaproteine sind Faktoren des Komplementsystems (zählt zum Immunsystem) und diejenigen Gerinnungsfaktoren und Gerinnungshemmer, die keine Globuline sind.

Granulozyten	Monozyten	Makrophagen	Lymphozyten	Mastzellen	dendritische Zellen
✓	✓	✗	✓	✗	✗
✓	✗	✓	✓	✓	✓

Vom Knochenmark werden täglich rund 200 Milliarden Erythrozyten und 500 Milliarden Thrombozyten gebildet. Die Anzahl der gebildeten Leukozyten kann nicht genau beziffert werden.



### Patho Albuminmangel

Enthält das Blutplasma zu wenig Albumin, spricht man von einer **Hypoalbuminämie**. Sie führt dazu, dass der kolloidosmotische Druck im Gefäß unter den Druck sinkt, der im Gewebe herrscht. Dadurch tritt vermehrt Wasser ins Gewebe über, und es bilden sich **Ödeme**. Sammelt sich die Flüssigkeit in der Bauchhöhle, spricht man von einem **Aszites** (S. 194). Ein Albuminmangel kann u. a. bei Erkrankungen der Leber, bei Unterernährung oder bei großflächigen Verbrennungen entstehen.

### Pharma Plasmaexpander

Genauso wie ein erniedrigter kolloidosmotischer Druck dazu führt, dass Flüssigkeit aus den Gefäßen austritt, sorgt ein erhöhter kolloidosmotischer Druck dafür, dass Flüssigkeit aus dem umliegenden Gewebe in die Blutgefäße gezogen wird. Dieses Prinzip kann bei Flüssigkeitsverlusten therapeutisch genutzt werden. Dazu wird dem Patienten eine Lösung mit großmolekularen Verbindungen (**Kolloiden**) infundiert. Die Kolloide erhöhen den osmotischen Druck im Gefäß. Da sich durch die Flüssigkeit, die dadurch aus dem Gewebe in das Blutgefäß strömt, die Plasmamenge erhöht, werden solche Infusionsflüssigkeiten auch als **Plasmaexpander** bezeichnet. Durch den Anstieg des Plasmavolumens stabilisiert sich der Kreislauf.

Bei Blutverlusten über 30 % sollten Erythrozytenkonzentrate (EKs) verabreicht werden, um den Verlust von roten Blutkörperchen auszugleichen und den Sauerstofftransport sicherzustellen.

**Globuline** • Ihre Konzentration im Blutplasma beträgt 25–30 g/l. Sie werden in vier Gruppen eingeteilt:

- $\alpha_1$ -Globuline
- $\alpha_2$ -Globuline
- $\beta$ -Globuline
- $\gamma$ -Globuline

Jede dieser Gruppen besteht wiederum aus mehreren verschiedenen Globulinen (► Tab. 12.2). Viele der  $\alpha_1$ -,  $\alpha_2$ - und  $\beta$ -Globuline sind wie Albumin **Transportproteine**, einige sind Teil des Blutgerinnungssystems. Auch die Globuline sind an der Aufrechterhaltung des kolloidosmotischen Drucks beteiligt, spielen dabei aber eine geringere Rolle als das Albumin.

Eine Sonderstellung nehmen die  **$\gamma$ -Globuline** (S. 359) ein: Sie werden auch als **Immunglobuline** (Ig) bezeichnet und sind als **Antikörper** Teil des Immunsystems. Sie werden **nicht** in der Leber gebildet, sondern von Plasmazellen, einer Form der B-Lymphozyten. Die B-Lymphozyten gehören zu den Leukozyten.

### !Merke 4×4-Regel

Wenn Sie sich merken möchten, wie hoch der Anteil der einzelnen Globulin-Gruppen an den Plasmaproteinen ist, hilft die 4×4-Regel:

- $\alpha_1$ -Globuline:  $1 \times 4 = 4\%$
- $\alpha_2$ -Globuline:  $2 \times 4 = 8\%$
- $\beta$ -Globuline:  $3 \times 4 = 12\%$
- $\gamma$ -Globuline:  $4 \times 4 = 16\%$

Zusammen ergibt das den Anteil der Gesamtglobuline von 40 %. Übrig bleiben 60 % für die Albumine.

**Weitere Plasmaproteine** • In wesentlich geringeren Konzentrationen als Albumin und Globuline finden sich im Blutplasma:

- die Faktoren des Komplementsystems (S. 350), das zum Immunsystem zählt, und
- diejenigen Gerinnungsfaktoren und Gerinnungshemmer (S. 344), die nicht zu den Globulinen zählen.

Entfernt man die Gerinnungsfaktoren aus dem Blutplasma, bleibt das **Blutserum** zurück.

### Elektrolyte

Nach den Plasmaproteinen stellen die Elektrolyte (S. 282) die zweitgrößte Gruppe der gelösten Bestandteile des Blutplasmas dar. Im Gegensatz zu den Plasmaproteinen können die Elektrolyte aus dem Blutgefäß ins Interstitium übertreten und umgekehrt. Damit ist gewährleistet, dass im gesamten Extrazellularraum – also in den Gefäßen und im Interstitium – nahezu dieselbe Elektrolytkonzentration herrscht.

Die Bikarbonat-Ionen ( $\text{HCO}_3^-$ ) des Blutplasmas bilden den **Bikarbonatpuffer** und damit das wichtigste Puffersystem zur Regulation des Blut-pH-Wertes (S. 284). Das Bikarbonat entsteht größtenteils in den Erythrozyten, die es aus Kohlendioxid bilden (► Abb. 12.5). Seine Konzentration wird über die Niere und die Lunge geregelt.

### Diagnostik Blut liefert wichtige Informationen

Blutuntersuchungen zählen zum diagnostischen Standardprogramm. Und das aus gutem Grund: Das Plasma steht im Kapillargebiet in engem Austausch mit dem interstitiellen Wasser und dieses wiederum mit der intrazellulären Flüssigkeit. Störungen von Organfunktionen führen deshalb häufig auch zu Veränderungen der Plasmazusammensetzung. Auch die Untersuchung der Blutzellen und der Zellzahl kann aufschlussreich sein. Sie lässt z. B. Rückschlüsse auf Infektionskrankheiten, Abbau- und Bildungsstörungen der Blutzellen zu. Dennoch muss man die Ergebnisse der Blutuntersuchung immer im Zusammenhang mit dem Befinden und den klinischen Symptomen des Patienten beurteilen.



### WISSEN TO GO

#### Blutplasma

Blut ohne Blutzellen wird als **Blutplasma** bezeichnet. Es besteht zu **90 %** aus **Wasser**, zu ca. **8 %** aus **Plasmaproteinen** und zu ca. **2 %** aus **Elektrolyten**. Seine Gesamtmenge beträgt 2,5–3 l.

Plasmaproteine sind **Albumin** (60 %) und **Globulinen** (40 %). Sie sind so groß, dass sie die Gefäße normalerweise nicht verlassen können, und sind hauptverantwortlich für den **kolloidosmotischen Druck**. Außerdem dienen sie Stoffen, die nicht wasserlöslich sind, als **Transportproteine**. Auch Bestandteile des Komplement- und des Gerinnungssystems zählen zu den Plasmaproteinen, machen aber nur einen geringen Anteil aus. Plasma ohne Gerinnungsfaktoren wird als **Blutserum** bezeichnet.

Die **Globuline** werden in vier Gruppen unterteilt ( $\alpha_1$ -Globuline,  $\alpha_2$ -Globuline,  $\beta$ -Globuline,  $\gamma$ -Globuline). Die  $\gamma$ -Globuline werden auch **Immunglobuline** (Ig) oder **Antikörper** genannt und sind Teil des Immunsystems.

Bis auf die  $\gamma$ -Globuline, die von bestimmten Leukozyten gebildet werden, werden die Plasmaproteine alle in der **Leber** hergestellt.

### Erythrozyten

#### Aufgaben

Die Hauptaufgabe der Erythrozyten ist der **Transport der Atemgase** (S. 189). Mit ihrem roten Blutfarbstoff (Hämoglobin) bilden sie außerdem den größten Teil des **Proteinpuffers** des Blutes, des zweitwichtigsten Puffersystems bei der Regulation des Blut-pH-Wertes.

## Form und Größe

Unter dem Mikroskop erscheinen die Erythrozyten rund und in der Mitte beiderseits eingedellt (bikonkave Form, ► **Abb. 12.8**). Diese Form nehmen sie aber nur in sehr langsam fließendem oder stehendem Blut an. Da sie sich **sehr leicht verformen** lassen, ändern die Erythrozyten im fließenden Blut ihre Form je nach Gefäßdurchmesser und Fließgeschwindigkeit. In Blutgefäßen mit einem sehr geringen Durchmesser verändern sie ihre Form so, dass sie es problemlos durchströmen können. In schnell fließendem Blut haben die Erythrozyten eher ein stromlinienförmiges, leicht dreieckiges Aussehen (► **Abb. 12.3**). Je langsamer das Blut fließt, desto mehr nähern sie sich der bikonkaven Form an. Bei einer sehr geringen Fließgeschwindigkeit besteht die Gefahr, dass sich die Erythrozyten zu Stapeln („Geldrollen“) zusammenlagern.

## Patho Abweichende Erythrozytenformen

Eine veränderte Form der Erythrozyten kann auf bestimmte Erkrankungen hinweisen, z. B.:

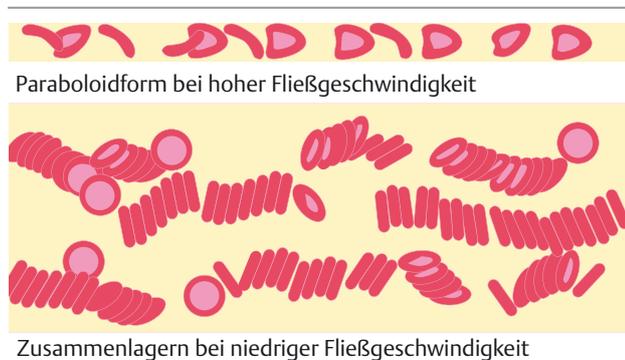
- **Kugelform** (Sphärozyten): Sie tritt z. B. bei der erblichen Kugelzellanämie (hereditäre Sphärozytose) auf. Wegen einer Störung des Zytoskeletts wird die Membran der Erythrozyten destabilisiert und die Erythrozyten nehmen eine kugelige Form an. Diese Form tritt auch bei einer hypotonen Umgebung oder am Lebensende der Erythrozyten auf.
- **Sichelzellen**: Sie haben die Form einer Mondsichel und kommen bei der Sichelzellanämie vor (s. u.). Grund ihrer abweichenden Form ist ein verändertes Hämoglobin.
- **Stechapfelform** (Echinozyten): Diese Form entsteht überwiegend unter Laborbedingungen. In hypertoner Umgebung schrumpfen die Erythrozyten und bilden dabei kleine Stacheln aus. Echinozyten sind nicht als Hinweis auf eine Erkrankung zu werten.

Trotz ihrer Verformbarkeit kann man durchschnittliche Werte für die Größe der Erythrozyten angeben:

- Dicke: 2 µm am Rand, 1 µm im Zentrum
- Durchmesser: 7,5 µm

Entsprechen die Erythrozyten diesen Angaben, liegt eine **Normozytose** vor. Bei einem Durchmesser unter 6 µm spricht man von einer **Mikrozytose**, bei einem Durchmesser über 8 µm von einer **Makrozytose**.

**Abb. 12.3** Form der Erythrozyten.



Je nach Fließgeschwindigkeit ändern die Erythrozyten ihre Form. In schnell fließendem Blut nehmen sie eine Paraboloidform an (oben). Je langsamer das Blut fließt, desto mehr runden sie sich wieder ab. Bei sehr langsamem Blutfluss können sie sich geldrollenartig zusammenlagern (unten). *Quelle: van den Berg F: Angewandte Physiologie, Band 2. Stuttgart: Thieme; 2005.*

## Aufbau

Erythrozyten besitzen weder einen Zellkern noch Mitochondrien oder weitere Zellorganellen. Daher sind sie für ihren Energiegewinn auf die anaerobe Glykolyse (S.30) angewiesen, d. h., dass sie für ihr Überleben Glukose benötigen. Die Lebensdauer eines Erythrozyten beträgt etwa 120 Tage.

Wichtigster Bestandteil der Erythrozyten ist das **Hämoglobin** (roter Blutfarbstoff, Hb). Es ist Voraussetzung dafür, dass die Erythrozyten überhaupt **Sauerstoff** transportieren können. Für den Transport des **Kohlendioxids** (genauer dessen Umwandlung in Bikarbonat) enthalten die Erythrozyten ein Enzym, die **Carboanhydrase**.

Die Erythrozyten verfügen außerdem über ein **Zytoskelett**, das mit der Zellmembran verbunden ist. In die Zellmembran sind neben **Ionenkanälen** auch Wasserkanäle eingebaut, die **Aquaporine**.



## WISSEN TO GO

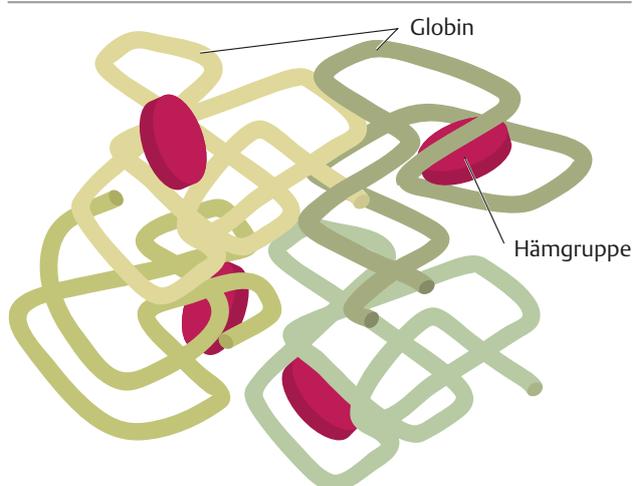
### Erythrozyten

Die Erythrozyten (rote Blutkörperchen) transportieren die **Atemgase** vom Gewebe zur Lunge bzw. umgekehrt. Ihr Durchmesser beträgt ca. 7,5 µm. Im stehenden Blut haben sie eine **bikonkave Form**, d. h., sie sind beidseitig eingedellt. Im fließenden Blut nehmen sie je nach Fließgeschwindigkeit und Gefäßdurchmesser auch andere Formen an. Erythrozyten sind **kernelos**. Ihre Lebensdauer liegt bei etwa **120 Tagen**.

## Hämoglobin

Der Name des roten Blutfarbstoffs „Hämoglobin“ setzt sich aus zwei Teilen zusammen: „Häm“ und „Globin“. Bei den **Globinen** handelt es sich um Aminosäureketten, die um je eine Hämgruppe gefaltet sind. Jedes Hämoglobinmolekül besitzt vier Globine und damit auch vier Hämgruppen (► **Abb. 12.4**). Jede **Hämgruppe** wiederum besteht aus einem zweiwertigen Eisen-Ion ( $Fe^{2+}$ ) und einem Farbstoffmolekül (Porphyrin).

**Abb. 12.4** Hämoglobin.



Jedes Hämoglobinmolekül besteht aus 4 Globinen und 4 Hämgruppen. Die Globine sind auf diesem Bild unterschiedlich eingefärbt, damit sie besser unterscheidbar sind. *Quelle: Koolman J, Röhm K: Taschenatlas Biochemie des Menschen. 5. Auflage. Stuttgart: Thieme; 2019.*

Tab. 12.3 Wichtige Erythrozytenindizes.

Parameter		Bedeutung	Normalwert*	Bestimmung	Verwendung
Hb	Hämoglobinkonzentration	Gehalt an Hämoglobin pro Volumeneinheit (meist Deziliter) Blut	Männer 13–18 g/dl Frauen 11,7–16 g/dl	photometrische Messung in einer EDTA-Vollblut-Probe	Nachweis und Verlaufsbeurteilung von Anämien, Polyglobulien und Polyzythämien
MCV	mittleres korpuskuläres Volumen	durchschnittliches Erythrozytenvolumen	80–100 fl	$= \frac{\text{Hämatokrit [l/l]}}{\text{Erythrozytenzahl } (10^6/\mu\text{l})}$	Einteilung von Anämien nach Zellgröße (normo-, mikro- oder makrozytär)
MCH	mittlerer korpuskulärer Hämoglobingehalt	durchschnittlicher Hb-Gehalt eines einzelnen Erythrozyten	26–34 pg	$= \frac{\text{Hämoglobin [g/l]}}{\text{Erythrozytenzahl } (10^{12}/\mu\text{l})}$	Einteilung von Anämien nach Hb-Gehalt (normochrom, hypochrom, hyperchrom)

\* Die Angaben der Normalwerte sind nicht einheitlich. Ausschlaggebend für die Beurteilung der Werte sind die vom jeweiligen Labor angegebenen Referenzwerte.

### Patho Hämoglobinopathien

Krankheiten, denen eine Veränderung des Hämoglobins zugrunde liegt, bezeichnet man als Hämoglobinopathien. Eine der häufigsten Hämoglobinopathien ist die **Sichelzellanämie**, bei der – je nach Schweregrad der Erkrankung – das normale Hämoglobin durch das Sichelzelloxyhämoglobin ersetzt ist. Bei **niedrigem Sauerstoff-Partialdruck** verklumpt das Sichelzelloxyhämoglobin, die roten Blutkörperchen nehmen eine sichelförmige Gestalt an und sind weniger verformbar. Dadurch bleiben die Sichelzellen in kleinen Blutgefäßen hängen und verstopfen sie. Die entstehenden Durchblutungsstörungen können lebensgefährlich werden. Die Sichelzellanämie ist erblich.

### Patho Methämoglobin

Befindet sich in der Hämgruppe anstelle eines zweiwertigen Eisen-Ions ein **dreiwertiges Eisen-Ion** ( $\text{Fe}^{3+}$ ), spricht man von Methämoglobin. Methämoglobin bindet ebenfalls Sauerstoff, gibt ihn aber wesentlich schlechter wieder ab. Ein Methämoglobinanteil von bis zu 15% ist unbedenklich, bei einem höheren Methämoglobinanteil kommt es zu einem Sauerstoffmangel. Ein Methämoglobingehalt von über 70% ist in der Regel tödlich. Methämoglobin entsteht normalerweise nur in geringen Mengen im Körper und wird durch ein Enzym wieder in Hämoglobin umgewandelt. Erhöhte Werte beruhen meist auf Vergiftungen mit starken Oxidationsmitteln wie z. B. Anilinfarbstoffen, Nitroglycerin, Sulfonamiden, Chinin.

Das **Eisen-Ion** ist die Bindungsstelle für den **Sauerstoff**, wobei jedes Eisen-Ion ein Sauerstoffmolekül binden kann. Ein Hämoglobinmolekül kann also maximal vier Sauerstoffmoleküle transportieren.

Der Sauerstoff gelangt über Diffusion aus den Alveolen in die Erythrozyten, bindet dort an die Eisen-Ionen und gelangt so in die Kapillargebiete der Organe. Im arteriellen Blut sind im Normalfall etwa 98% der Bindungsstellen für Sauerstoff besetzt, man spricht auch von einer **Sauerstoffsättigung** von 98%. Da im Gewebe ein niedrigerer Sauerstoff-Partialdruck herrscht als im Blut, löst sich der Sauerstoff von den Eisen-Ionen. Er verlässt den Erythrozyten, gelangt ins Blut und tritt durch die Kapillarwand ins Gewebe über. Damit ist die Bindungsstelle des Hämoglobins wieder frei. Insgesamt verbraucht der Körper allerdings nur ca. 25% des transportierten Sauerstoffs, sodass die Sauerstoffsättigung im venösen Blut noch bei etwa 75% liegt.

Welche Menge Sauerstoff insgesamt im Blut an Hämoglobin gebunden ist, kann mithilfe folgender Angaben berechnet werden:

- Ein Liter Blut enthält ca. 150 g Hämoglobin.
- 1 g Hämoglobin kann 1,34 ml Sauerstoff binden (sog. Hüfner-Zahl).

Damit werden pro Liter Blut ca. 200 ml Sauerstoff transportiert. Bei einer Gesamtblutmenge von 5 l kann also rund 1 l Sauerstoff gebunden werden.

Je nachdem, ob Sauerstoff gebunden ist oder nicht, ändert das Hämoglobin seine Farbe: Wenn Sauerstoff an die Eisen-Ionen gebunden ist, wirkt es hellrot, ist kein Sauerstoff gebunden, dunkelrot.

### Diagnostik Erythrozytenindizes

Außer dem Hämatokrit und der Erythrozytenzahl können beim roten Blutbild noch weitere Werte untersucht bzw. errechnet werden (► Tab. 12.3). Sie sind vor allem bei der Diagnostik der verschiedenen Arten der Anämie wichtig.

### Patho Anämien

Liegt der **Hämoglobingehalt unterhalb des Normbereichs**, spricht man von einer Anämie (Blutarmut). Anzeichen für eine Anämie sind eine blasse Haut und blasse Schleimhäute. Wegen des verminderten Sauerstofftransports kommt es bei den Betroffenen außerdem zu Müdigkeit, Leistungsabfall und einem erhöhten Puls. Häufig treten auch Kopfschmerzen, Schwindelgefühl und Ohrensausen auf.

Anämien können viele Ursachen haben. Um herauszufinden, um welche Form der Anämie es sich handelt, werden u. a. die in ► Tab. 12.3 genannten Werte bestimmt:

Bei der **hypochromen mikrozytären Anämie** ist der Hb-Gehalt verringert und die Erythrozyten sind kleiner als gewöhnlich (MCH und MCV sind vermindert). Ihre Gesamtzahl ist unverändert. Die häufigste Ursache dieser Anämieform ist ein **Eisenmangel** (präziser:  $\text{Fe}^{2+}$ -Mangel). Die Eisenmangelanämie ist die häufigste Anämieform überhaupt.

Bei der **normochromen normozytären Anämie** ist die Erythrozytenzahl verringert, der Hb-Gehalt und die Größe des einzelnen Erythrozyten sind dagegen im Normbereich (MCH und MCV sind unverändert). Ursachen können entweder ein Verlust an Erythrozyten durch Blutungen oder verstärkten Erythrozytenabbau (Hämolyse) sein oder ihre **verminderte Bildung** (aplastische Anämie durch Zerstörung des Knochenmarks oder renale Anämie bei chronischer Nierenkrankung mit verminderter EPO-Bildung).

Bei der **hyperchromen makrozytären Anämie** sind der Hb-Gehalt und die Größe des einzelnen Erythrozyten erhöht (MCH und MCV sind erhöht). Zugrunde liegt eine Bildungsstörung der Erythrozyten, weswegen das unveränderte Hämoglobin auf weniger Zellen verteilt wird, die dann größer sind. Ursache ist häufig ein Vitamin-B<sub>12</sub>- oder Folsäuremangel. Die vergrößerten Erythrozyten werden als Megalozyten bezeichnet, ihre Vorläuferzellen im Knochenmark als Megaloblasten. Diese Form der Anämie wird deshalb auch **megaloblastäre Anämie** genannt.



## WISSEN TO GO

### Hämoglobin

Für seinen Transport ist der **Sauerstoff** im Erythrozyten an den roten Blutfarbstoff (**Hämoglobin**, Hb) gebunden. Ein Hämoglobinmolekül besteht aus **4 Untereinheiten**, die sich jeweils aus **1 Globin** (Aminosäurekette) und **1 Hämgruppe** zusammensetzen. Jede Hämgruppe enthält ein **Eisen-Ion** (Fe<sup>2+</sup>), an das der Sauerstoff bindet. Wie viele dieser Bindungsstellen im arteriellen Blut durch ein Sauerstoffatom besetzt sind, wird mit der **Sauerstoffsättigung** angegeben. Deren Normalwert liegt bei **98 %**, d.h., dass an nur 2 % der Hämgruppen kein Sauerstoff gebunden ist. Die Sauerstoffsättigung im venösen Blut liegt bei ca. 75 %.

### Carboanhydrase

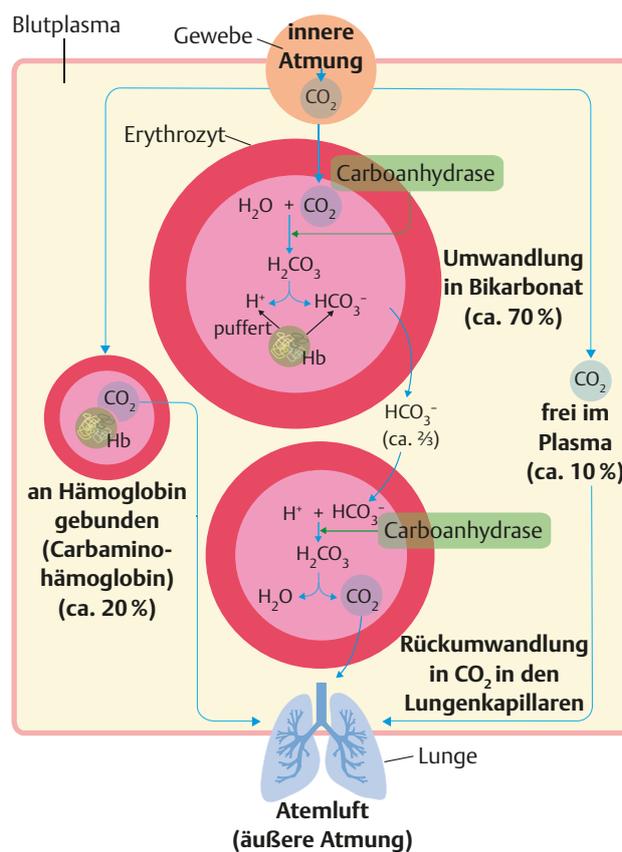
In Ruhe entstehen im Körper pro Minute etwa 200 ml Kohlendioxid. Davon werden nur rund 20% an Hämoglobin gebunden, wobei das Kohlendioxid **nicht** an das Eisen-Ion, sondern an die Aminosäureketten des Globins bindet. Hämoglobin, das Kohlendioxid gebunden hat, wird als **Carbaminohämoglobin** bezeichnet. Etwa 10% des Kohlendioxids werden in gelöster Form im Blutplasma transportiert. Den weitaus größten Teil (ca. 70%) wandeln die Erythrozyten in Bikarbonat um, das sie anschließend teilweise ans Blut abgeben. Das Enzym, das sie dafür benötigen, ist die **Carboanhydrase**.

Kohlendioxid entsteht bei der inneren Atmung (S.166) als Stoffwechselprodukt in den Zellen, die es an das Interstitium abgeben. Von dort gelangt es über die Kapillarmembran zunächst ins Blutplasma und anschließend durch die Erythrozytenmembran in das Innere der roten Blutkörperchen. Hier trifft es auf die Carboanhydrase. Sie wandelt das Kohlendioxid in ein **Bikarbonat-** und ein **Wasserstoff-Ion** um, wobei als Zwischenstufe Kohlensäure entsteht (► Abb. 12.5). Der Erythrozyt gibt etwa zwei Drittel des Bikarbonats ans Plasma ab. Das Wasserstoff-Ion bleibt im Erythrozyten, wo es durch das Hämoglobin abgepuffert wird. Auch das restliche Drittel des Bikarbonats verbleibt im Erythrozyten.

Im Kapillargebiet der Lunge nehmen die Erythrozyten Bikarbonat aus dem Plasma auf und wandeln es – wieder mithilfe der Carboanhydrase – in Kohlendioxid um. Weil der Partialdruck von Kohlendioxid in den Kapillaren höher ist als in den Alveolen, diffundiert das Kohlendioxid durch die Erythrozytenmembran, das Blutplasma und die Blut-Luft-Schranke in die Alveolen und wird abgeatmet.

Genauso wie nur ein Teil des Sauerstoffs verbraucht wird, wird auch nur ein Teil des Bikarbonats wieder in Kohlendioxid umgewandelt und abgeatmet. Der Rest bleibt im Plasma und bildet dort den Bikarbonatpuffer.

Abb. 12.5 Transport von Kohlendioxid im Blut.



Zum Transport wird der überwiegende Teil des Kohlendioxids in den Erythrozyten in Bikarbonat umgewandelt. Vor der Abatmung über die Lunge erfolgt die Rückumwandlung in Kohlendioxid. Der freie Transport im Plasma und die Bindung an Hämoglobin (Hb) machen nur einen geringen Teil des Kohlendioxidtransports aus.



## WISSEN TO GO

### Carboanhydrase

Auch beim Transport von **Kohlendioxid** spielen die Erythrozyten eine Rolle: CO<sub>2</sub> gelangt aus dem Gewebe über das Blutplasma in die Erythrozyten. Dort wandelt das Enzym **Carboanhydrase** das Kohlendioxid in **Bikarbonat** und Protonen um. Ein Großteil des Bikarbonats verlässt den Erythrozyten und gelangt ins Plasma, wo es Bestandteil des Bikarbonatpuffers ist. In den Lungenkapillaren tritt das Bikarbonat wieder in die Erythrozyten über, wird von der Carboanhydrase in Kohlendioxid zurückverwandelt und abgeatmet.

### Blutgruppensysteme

Die wichtigsten Blutgruppensysteme sind das ABO- und das Rhesus-System. Die Blutgruppenzugehörigkeit hängt davon ab, welche **Blutgruppenantigene** (bestimmte Proteine oder Lipidverbindungen) auf der **Oberfläche der Erythrozyten** vorhanden sind. Die Blutgruppen sind besonders bei **Bluttransfusionen** von Bedeutung, da bei nicht passenden Blutgruppen das Spender- und das Empfängerblut verklumpen können (**Agglutination**).