



# Bau und Funktion von Zellorganellen

*Olaf Fritsche*

### 4.1 Eukaryotische Zellen sind durch Membranfaltung und Fraß von Zellen entstanden

Die ältesten Hinweise auf eukaryotische Zellen sind rund 1,5 Mrd. Jahre alt, wohingegen Belege für Prokaryoten etwa 3,8 Mrd. Jahre zurückreichen. Da beide Zelltypen viele fundamentale Gemeinsamkeiten aufweisen (beispielsweise die Speicherung des Erbguts in DNA und den gemeinsamen genetischen Code), ist anzunehmen, dass sich Eukaryoten aus prokaryotischen Vorläuferzellen entwickelt haben.

Im Vergleich zur Procyte zeichnet sich die Eucyte durch zwei wesentliche Merkmale aus:

- Ein **Endomembransystem**, das einen Zellkern und ein endoplasmatisches Retikulum stellt.
  - **Organellen**, vor allem Mitochondrien und Chloroplasten.
- Für die Entstehung beider Merkmale gibt es Theorien, die durch Vergleiche rezenter (heute lebender) Zellen und Zellorganellen weitgehend gestützt werden (Abb. 4.1).

Das Endomembransystem mitsamt Zellkern ist demnach vermutlich aus Einstülpungen der Zellmembran entstanden. Außerdem hat sich wohl das Cytoskelett weiter ausgebildet, um die immer größer werdende Zelle zu stabilisieren und gezielte interne Transportvorgänge zu ermöglichen.

Mitochondrien und Chloroplasten sind nach der Endosymbiontentheorie Nachkommen von einstmals frei lebenden Prokaryoten, die von größeren Zellen durch Phagocytose aufgenommen, aber nicht verdaut wurden. Stattdessen kam es zu einer Symbiose genannten Beziehung, bei der beide Partner einen Vorteil hatten: Der frühere Prokaryot genießt den Schutz der großen Zelle und wird von dieser weitgehend versorgt. Dafür liefert er ihr energiereiche Verbindungen.

Im Laufe der Zeit blieben bei **Mitochondrien** und **Chloroplasten** einige Merkmale ihrer Urahnen erhalten (Abb. 4.2), während andere verloren gegangen sind. So ist ein großer Teil ihrer Gene in das Kerngenom gewandert, wodurch die Organellen nicht mehr alleine lebensfähig sind. Einige Proteine wie die ATP-Synthasen von Mitochondrien und Chloroplasten sind Mosaik aus Untereinheiten, von denen manche im Kern codiert sind, während die Gene von anderen noch auf der Organellen-DNA liegen.

An den Chloroplasten und den von ihnen abgeleiteten anderen Plastiden kann man sehen, dass in einigen Linien des Artenstammbaums nicht nur ein einziges Endosymbiose-Ereignis stattgefunden hat, sondern zwei und manchmal sogar drei (Abschn. 33.2). Selbst heute gibt es mehrere Beispiele für extrem enge Symbiosen, bei denen ein Partner in der Zelle des anderen lebt und die wie eine Zwischenstufe einer weiteren Endosymbiose wirken (Abb. 4.3).

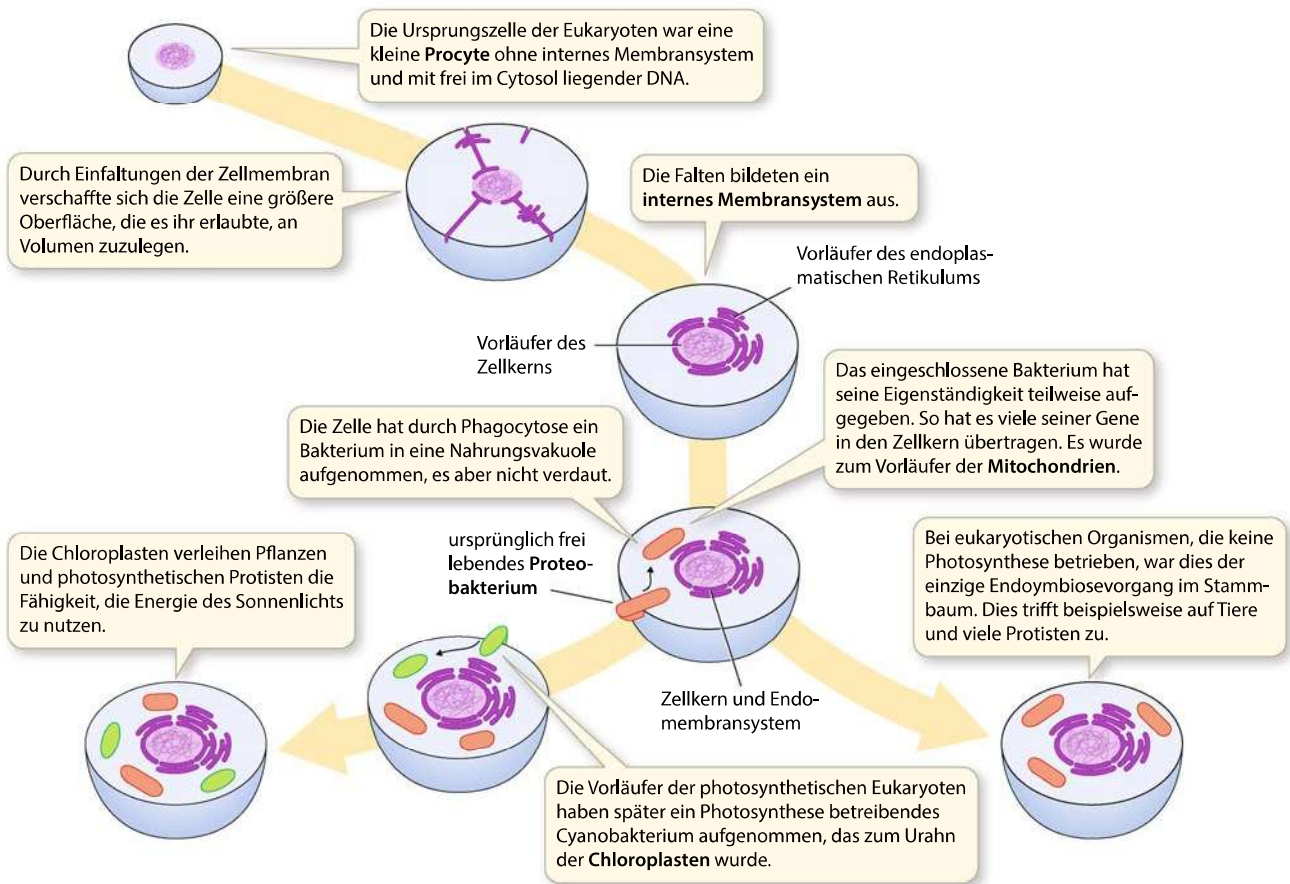
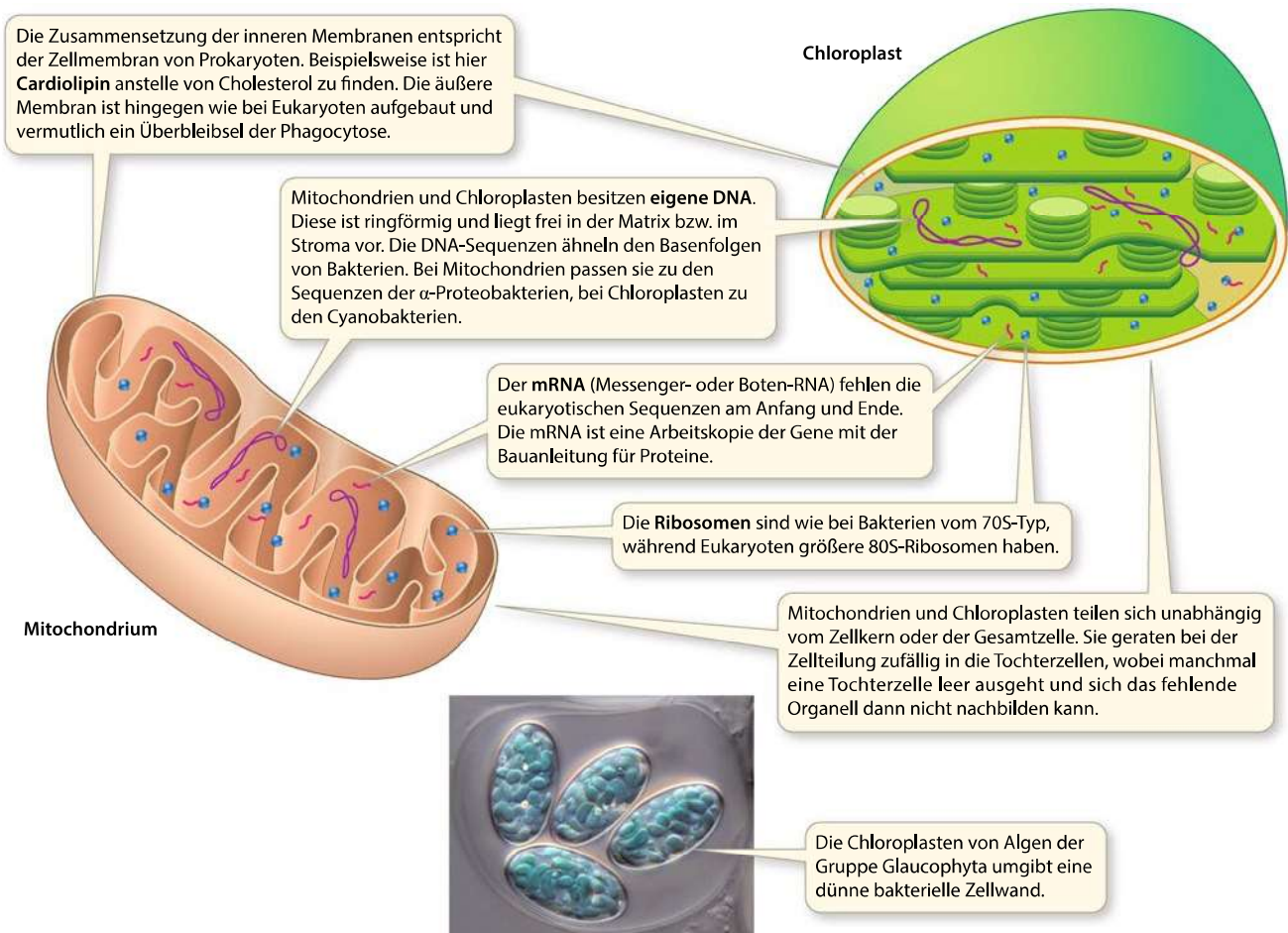
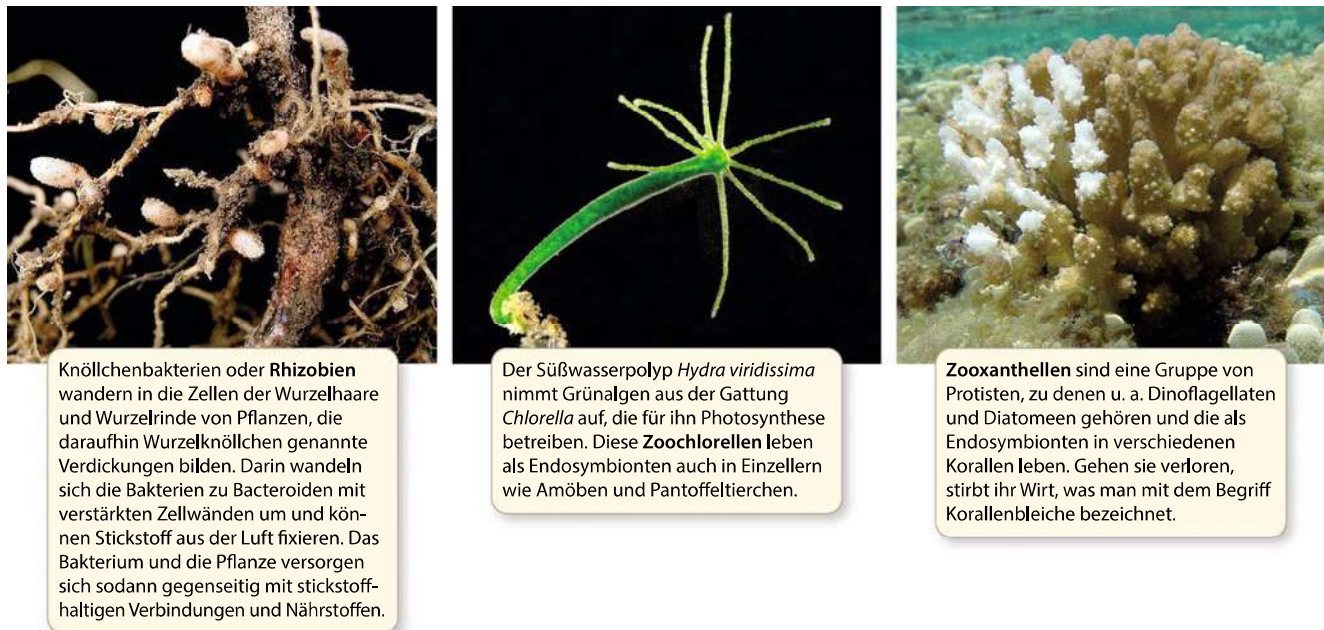


Abb. 4.1 Ein aktuelles Modell zur Entstehung der heutigen eukaryotischen Zelltypen aus prokaryotischen Vorläuferzellen durch Endosymbiose

## 4.1 • Eukaryotische Zellen sind durch Membranfaltung und Fraß von Zellen entstanden



■ **Abb. 4.2** Merkmale, die auf den prokaryotischen Ursprung von Mitochondrien und Chloroplasten hindeuten



■ **Abb. 4.3** Auch bei rezenten Arten gibt es enge Symbiosen, bei denen der kleinere Partner im Organismus des größeren lebt

## 4.2 Verdauung findet zum Teil in speziellen Organellen statt

Zellen, die sich von organischen Materialien ernähren, stehen vor dem Problem, dass die Verdauungsenzyme ihre eigenen Strukturen angreifen könnten. Eukaryoten haben dafür zwei Lösungsstrategien entwickelt:

- Die Verdauung ist in spezialisierte Organellen ausgelagert. Dadurch haben die Enzyme keinen Kontakt zu den übrigen Zellstrukturen.
- In den Organellen herrscht ein saures Milieu, das die Verdauungsenzyme für ihre Aktivität benötigen. Geraten die Enzyme durch eine beschädigte Membran in das pH-neutrale Cytosol, gehen sie in einen inaktiven Zustand über.

Tiere und viele Protisten nutzen **Lysosomen** für die Verdauung (Abb. 4.4; Abschn. 12.13). Ihre Biomembran ist auf der Innenseite mit zahlreichen Kohlenhydratketten ausgekleidet zum Schutz der Membranlipide und -proteine vor den Enzymen. Lysosomen sind mit 0,1 µm bis etwa 1 µm relativ klein.

Pflanzenzellen besitzen keine Lysosomen. Sie verdauen Makromoleküle stattdessen in der **Zentralvakuole**.

Biochemische Reaktionen, bei denen gefährliche Peroxide wie Wasserstoffperoxid (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) entstehen, laufen in **Peroxisomen** ab (Abb. 4.5). Diese kommen bei fast allen Eukaryoten

vor. Zur Entgiftung enthalten die Organellen große Mengen von Peroxidasen genannten Enzymen wie Katalase, die das Wasserstoffperoxid in Wasser und Sauerstoff zerlegen. Vor allem Fettsäuren und Alkohol werden in Peroxisomen abgebaut.

**Glyoxysomen** sind spezialisierte Peroxisomen, die bei jungen, wachsenden Pflanzen und bei filamentösen Pilzen (Schimmelpilzen) gespeicherte Lipide zu Kohlenhydraten umwandeln. Die Kohlenhydrate wandern in die Wachstumszentren (Abschn. 13.7).

Manche Einzeller haben besondere Verfahren zur Verdauung entwickelt. Beim Pantoffeltierchen *Paramecium* (Abschn. 33.17) kann man den Fortschritt sogar unter dem Mikroskop verfolgen (Abb. 4.6). Es nimmt seine Nahrung über den Cytostom genannten Zellmund in eine Nahrungsvakuole auf. Nach dem Ansäuern und der Aufnahme der Enzyme wandert die Verdauungsvakuole auf einer elliptischen Bahn durch die ganze Zelle bis zum Zellafter, wo sie die unverdaulichen Bestandteile per Exocytose ausstößt.

Dinoflagellaten fressen auch Beute, die größer ist als sie selbst (Abb. 4.7; Abschn. 33.15). Dazu durchstoßen sie entweder mit einem Plasmastrang deren Zellhülle und saugen sie aus, oder sie stülpen einen als Pseudopodium bezeichneten schlauchförmigen Teil ihrer eigenen Zelle aus, umhüllen damit die Beute und bilden so eine Fraßvakuole, die außerhalb der festen Zellhülle liegt.

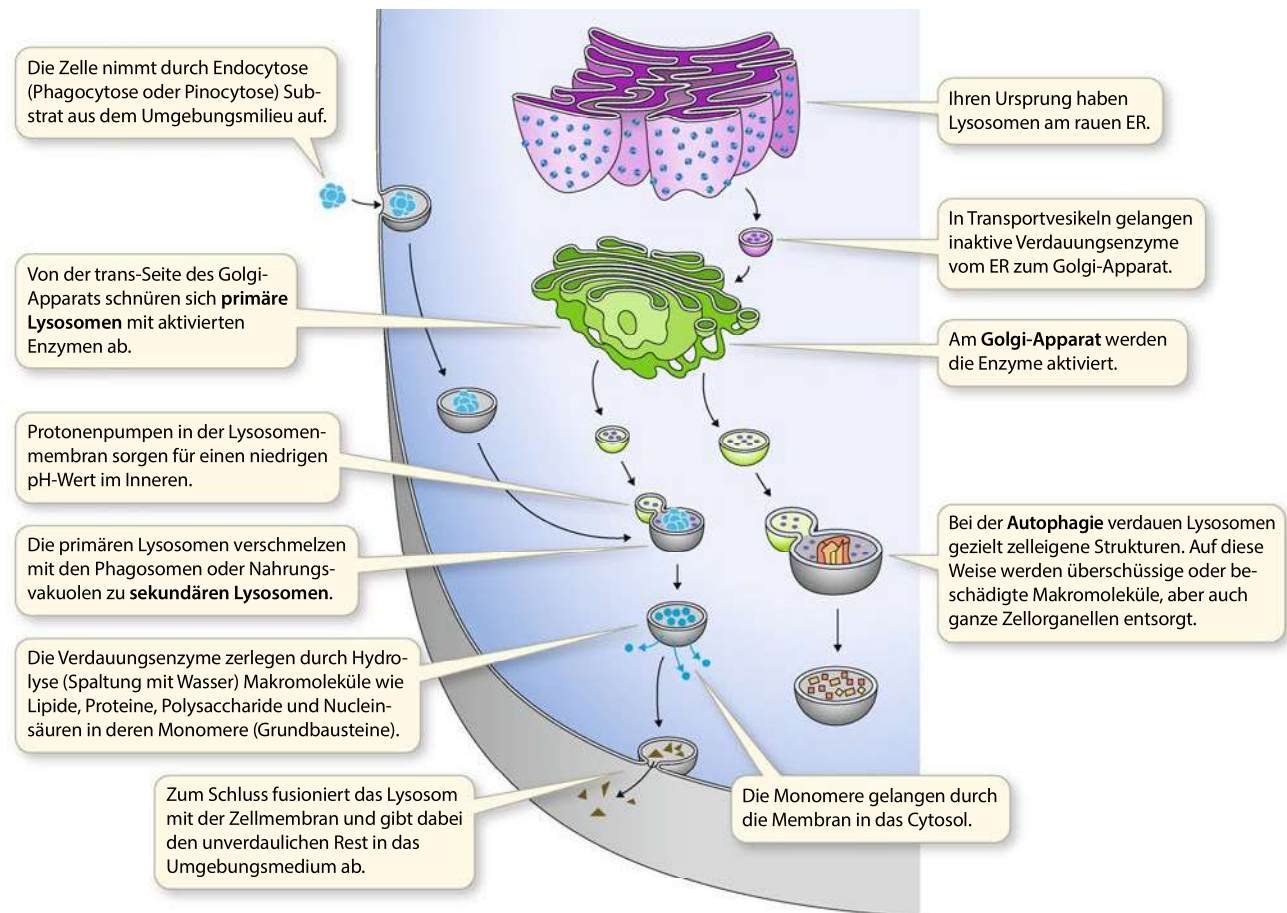
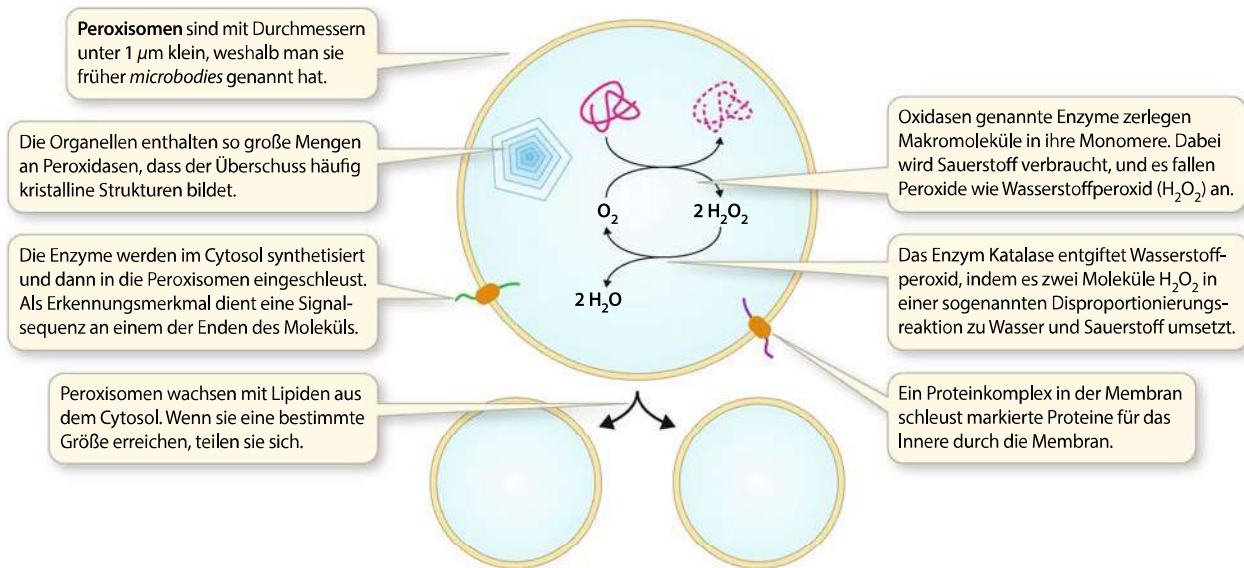
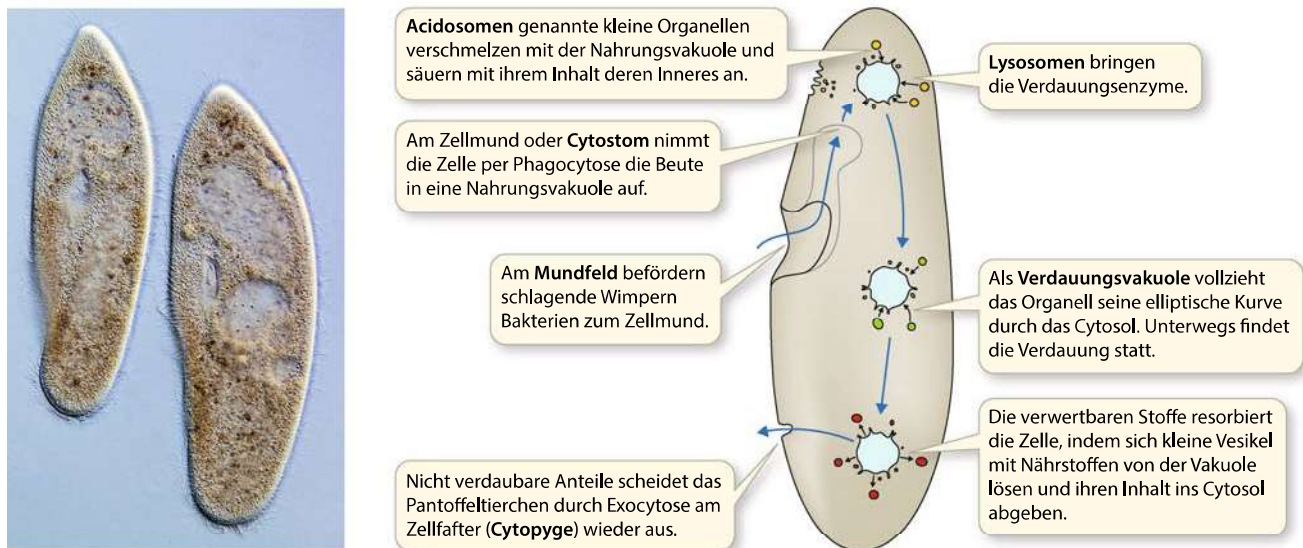


Abb. 4.4 Tiere und viele Protisten verdauen Substrate, die sie durch Phagocytose aufgenommen haben, mithilfe von Lysosomen

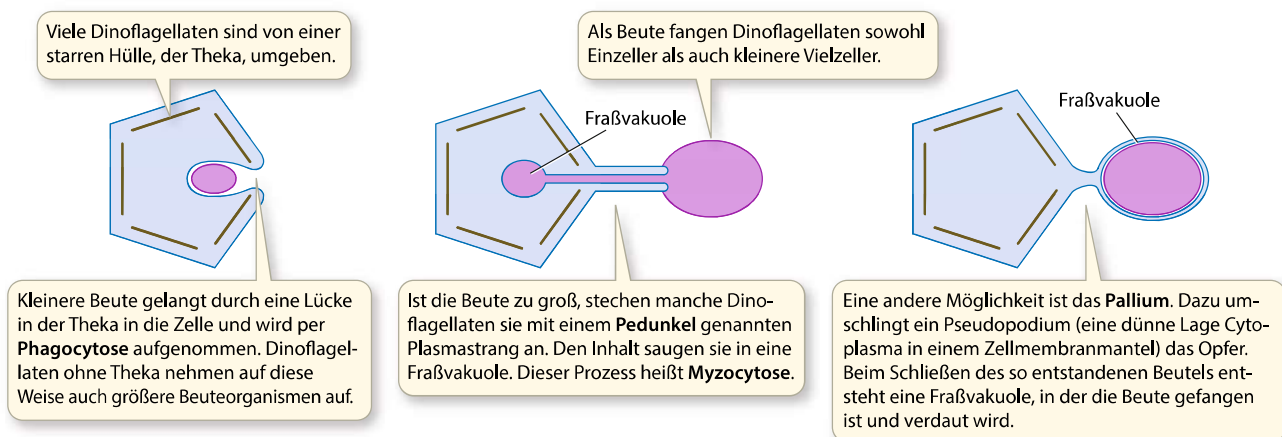
## 4.2 • Verdauung findet zum Teil in speziellen Organellen statt



■ **Abb. 4.5** Peroxisomen sind auf Prozesse spezialisiert, bei denen reaktionsfreudige Peroxide anfallen, die sonst zelleigene Moleküle zerstören könnten



■ **Abb. 4.6** Beim Pantoffeltierchen vollführt die Verdauungsvakuole eine Cyclose genannte Wanderung durch die Zelle



■ **Abb. 4.7** Um auch größere Beute verdauen zu können, müssen Dinoflagellaten ihre Fraßvakuole manchmal auslagern

### 4.3 Mitochondrien stellen den Großteil der Energie bereit

Mitochondrien sind typische eukaryotische Organellen (Abb. 4.8, 4.9), bei Prokaryoten kommen sie nicht vor. Nach der Endosymbiontentheorie sind die Mitochondrien vielmehr aus Proteobakterien hervorgegangen, die vom Urahnen der Eukaryoten aufgenommen, aber nicht verdaut wurden. Heute besitzen fast alle Eucyten Mitochondrien. Zu den wenigen Ausnahmen zählt der Einzeller *Monocercomonoides*. Ihm fehlen nicht nur die Mitochondrien, sondern auch die mitochondriellen Gene. Vermutlich besaßen die Zellen ursprünglich Mitochondrien, haben sie aber früh verloren. Bei Säugetieren weisen bei-

spielsweise Erythrocyten (rote Blutkörperchen) keine Mitochondrien auf.

Die Anzahl der Mitochondrien pro Zelle ist vom Zelltyp abhängig. Zellen mit einem hohen Energieumsatz (z. B. Muskel- und Nervenzellen) besitzen mehrere Tausend Exemplare, andere Zellen enthalten wenige Mitochondrien, manche Einzeller nur ein einziges Mitochondrium. In den meisten Zellen bilden die Mitochondrien ein dynamisches Netzwerk, in dem sie sich stellenweise verbinden, miteinander verschmelzen und sich voneinander trennen. Bei Hefezellen finden beispielsweise durchschnittlich zwei Fusions- oder Teilungsprozesse pro Minute statt.

Die wesentliche Aufgabe der Mitochondrien besteht darin, den hauptsächlichen Energieträger der Zelle – das Adenosin-triphosphat (ATP) – zu regenerieren. Daher nennt man die

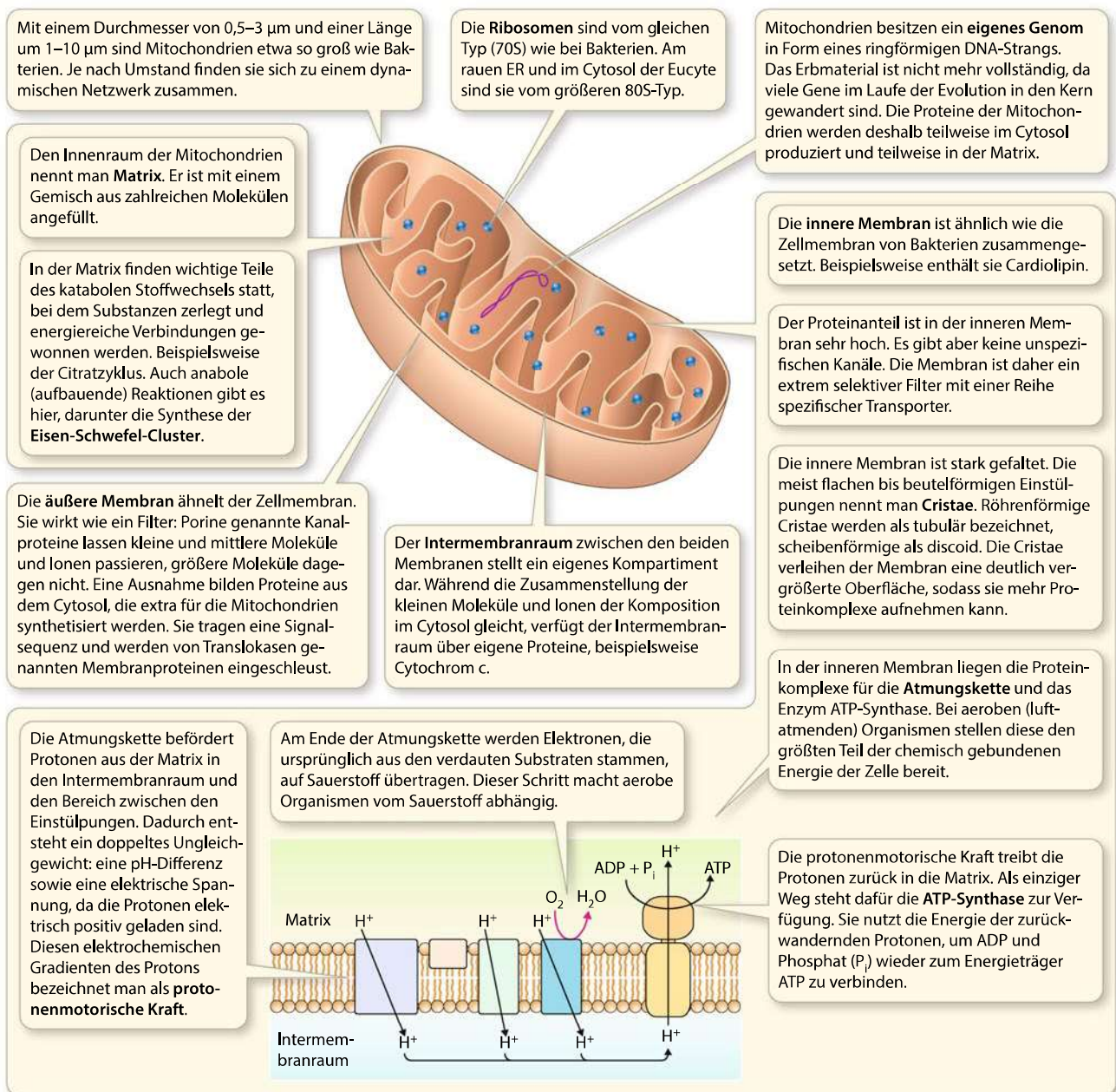
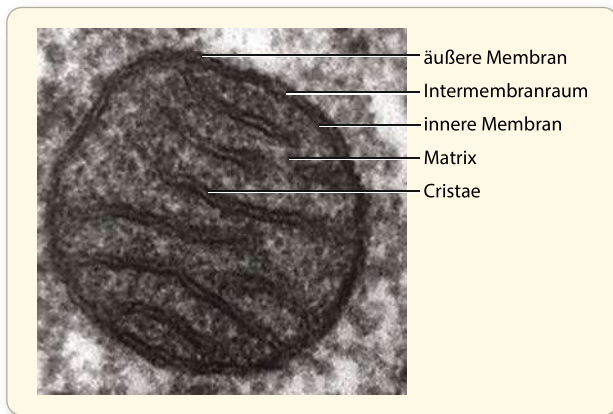


Abb. 4.8 Zwei Membranen umgeben jedes Mitochondrium. Die Proteinkomplexe in der inneren Membran machen das Organell zum „Kraftwerk“ der Zelle

## 4.3 • Mitochondrien stellen den Großteil der Energie bereit

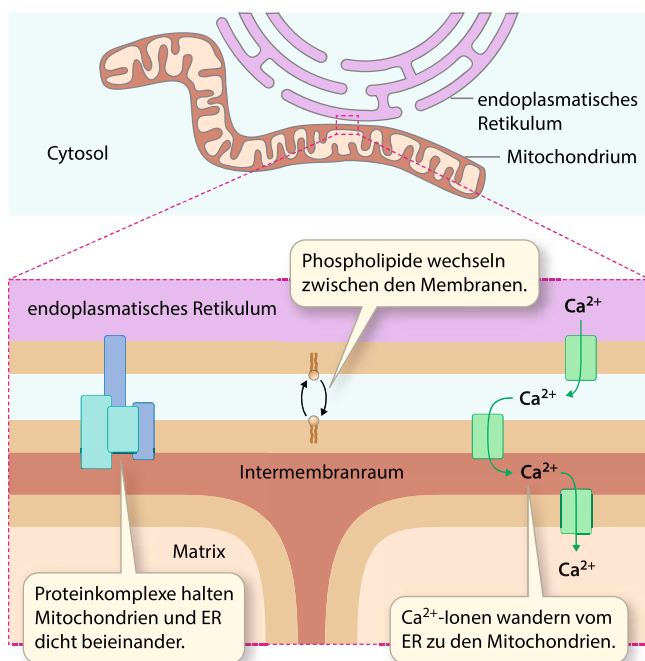


■ **Abb. 4.9** Elektronenmikroskopisches Bild eines Mitochondriums

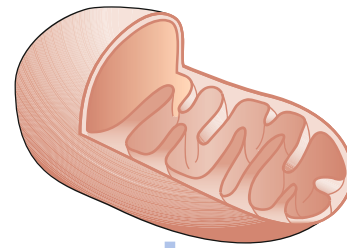
Mitochondrien auch die „Kraftwerke“ der Zelle. Zu diesem Zweck sind mehrere Stoffwechselwege im Mitochondrium angesiedelt:

- Im **Matrix** genannten Inneren läuft vor allem der Citratzyklus (► Abschn. 13.4) ab, der die letzten Stufen im Abbau von Kohlenhydraten und Fetten umfasst. Außer energie-reichen Verbindungen fallen dabei auch Ausgangsstoffe für verschiedene Synthesewege an.
- Die Atmungskette in der **inneren Membran** regeneriert zusammen mit der ATP-Synthase das verbrauchte ATP, das anschließend in das Cytosol exportiert wird und energieverbrauchende Prozesse in der ganzen Zelle antreibt.
- Mitochondrien synthetisieren Eisen-Schwefel-Cluster, die von bestimmten, am Transport von Elektronen beteiligten Proteinen benötigt werden.

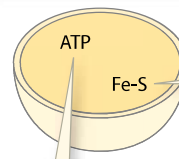
Außerdem dienen Mitochondrien als Calciumspeicher.



■ **Abb. 4.10** Über die mitochondrienassoziierte ER-Membran (MAM) sind Mitochondrien mit dem Endomembransystem verknüpft



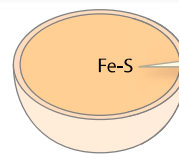
Hydrogenosomen kommen bei manchen Einzellern anstelle von Mitochondrien vor. Sie sind von zwei Membranen umgeben und teilen sich selbstständig. Ihnen fehlen aber in fast allen Fällen ein eigenes Genom sowie zahlreiche Proteine, darunter der gesamte Apparat für den Citratzyklus, die Atmungskette sowie die ATP-Synthase.



Die Synthese von Eisen-Schwefel-Clustern läuft auch in Hydrogenosomen ab.

**Hydrogenosomen** können daher nur ohne Sauerstoffverbrauch mit geringer Effizienz ATP über Gärung regenerieren. In Abwesenheit von Sauerstoff (anaerob) fällt dabei Wasserstoff an, woher die Organellen ihren Namen haben. Hydrogenosomen erlauben aber auch ein Leben unter aeroben Bedingungen (in Anwesenheit von Sauerstoff).

**Mitosomen** ersetzen bei manchen Einzellern die Mitochondrien. Sie haben ebenfalls eine doppelte Membran, aber keine eigene DNA und keine Atmungskette. Anders als Hydrogenosomen kommen Mitosomen nur bei Organismen vor, die in sauerstofffreier oder -armer Umgebung leben. Sie liefern der Zelle keine Energie.



Der Hauptzweck der Mitosomen ist die Produktion von Eisen-Schwefel-Clustern.

■ **Abb. 4.11** In manchen Zellen sind die ursprünglich vorhandenen Mitochondrien verkümmert

Obwohl die Mitochondrien nicht Teil des Endomembransystems sind und nicht auf das endoplasmatische Retikulum (ER) zurückgehen, sondern sich unabhängig von der restlichen Zelle durch Teilung vermehren, stehen sie doch im engen Kontakt mit dem ER (■ Abb. 4.10). Durch den Austausch im Bereich der mitochondrienassoziierten ER-Membran (MAM) sind die Mitochondrien auch an Prozessen wie der Signalgebung und der  $\text{Ca}^{2+}$ -abhängigen Apoptose (dem programmierten Zelltod) beteiligt.

Bei einigen Organismengruppen sind die Mitochondrien im Laufe der Evolution degeneriert und übernehmen nur noch einen Teil ihrer ursprünglichen Aufgaben (■ Abb. 4.11). Solche als **Hydrogenosomen** oder **Mitosomen** (► Abschn. 24.1) bezeichneten Organellen finden sich bei verschiedensten in anaeroben Habitaten lebenden Eukaryoten, neben den einzelligen Metamonaden und vielen anderen Einzellern auch bei Vertretern der zu den Tieren gehörenden Loricifera.

Die Zellmembran der Prokaryoten entspricht der inneren Mitochondrienmembran. Dementsprechend ist ihre Atmungskette dort lokalisiert und arbeitet nach den gleichen Prinzipien.

#### 4.4 Für die Photosynthese gibt es besondere Strukturen

Die Photosynthese ist der zentrale Prozess, über den das Leben auf der Erde – direkt oder indirekt – Energie erhält. (Daneben gibt es einige wenige Arten von Organismen, die ihre Energie aus anorganischen chemischen Verbindungen oder sogar aus dem radioaktiven Zerfall gewinnen.)

Im Verlauf der Photosynthese wandelt die Zelle die Energie des Lichts in die besser nutzbare Energie einer chemischen Bindung um (► Abschn. 13.11). Die dafür verantwortlichen Prozesse laufen an einer Membran ab, in welche die meisten aktiven Proteinkomplexe eingebettet sind. Somit kann eine Zelle zwei Strategien verfolgen, um ihre Photosynthese möglichst effizient zu gestalten:

- Sie kann die Fläche der Membran erhöhen.
- Sie kann mit zusätzlichen Pigmentkomplexen wie mit einer größeren Antenne mehr Licht einfangen.

Die Methode der vergrößerten Membranfläche ist eine Erfindung der Cyanobakterien. Einstülpungen der Zellmembran schnüren sich ab und bilden ein **Thylakoid** genanntes internes Membransystem, das den Photosynthesekomplexen Platz bietet (■ Abb. 4.12).

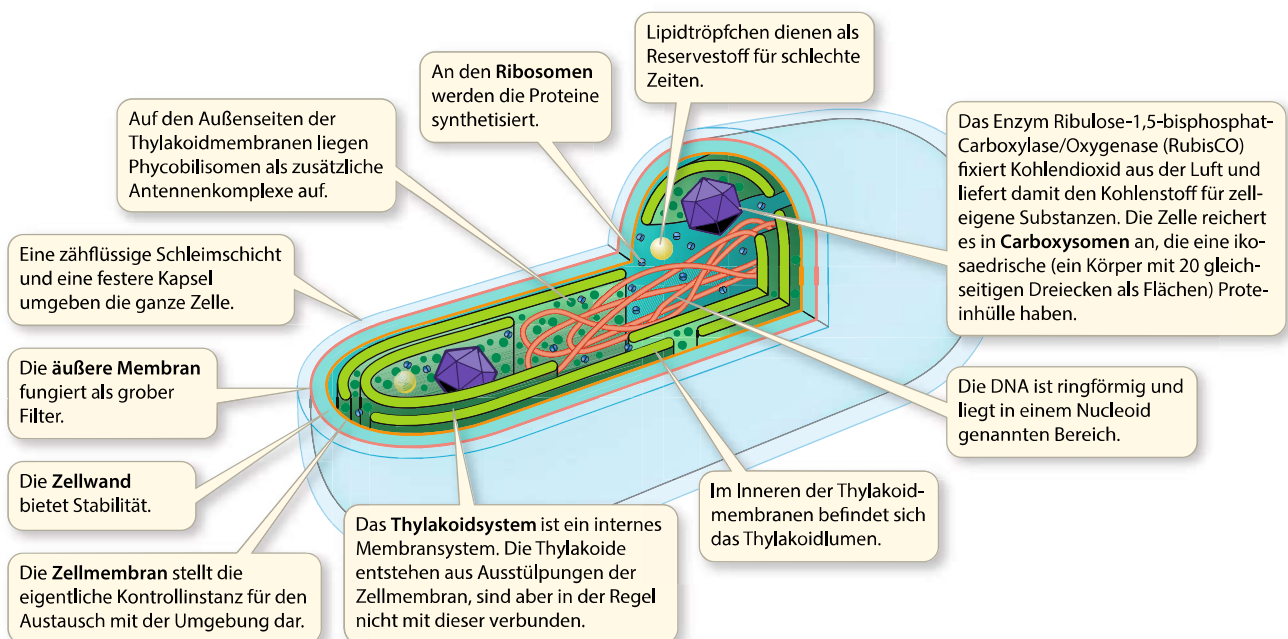
Nach der Endosymbiontentheorie (► Abschn. 4.1) sind die Chloroplasten der Pflanzen, der Grünalgen, der Rotalgen sowie der Glaucophyta Nachkommen eines frühen Cyanobakteriums, das nicht verdaut, sondern zum photosynthetisch aktiven Organell umgewandelt wurde. Entsprechend stark ähnelt die Chloroplastenstruktur (■ Abb. 4.13) dem Aufbau der Cyanobakterien. Diese Plastiden werden als **primäre Plastiden** bezeichnet. Die anderen Algengruppen besitzen **sekundäre Plastiden** mit drei

oder vier umhüllenden Membranen, die auf eine Endosymbiose zurückgehen, bei welcher der Wirt kein Cyanobakterium aufgenommen hat, sondern eine Grün- oder Rotalge mitsamt deren Chloroplasten (► Abschn. 33.2). Bei einigen Organismen sind noch die Membranen der Alge erhalten, sodass vier Membranen den Chloroplasten umhüllen, bei anderen ist eine der äußeren Membranen abgebaut, sodass nur drei Membranen den Plastiden umgeben. Sind noch Reste vom Zellkern der Alge übrig, sind sie als Nucleomorph zwischen den beiden inneren und den äußeren Membranen zu finden.

Ein besonderer Fall sind **Kleptoplastiden**: Dabei handelt es sich um Chloroplasten, die neu aufgenommen wurden und nicht an die Nachkommen weitergegeben werden. Der Wirt kann sogar ein Tier sein, das mit seinen Kleptoplastiden Photosynthese treiben kann, beispielsweise Meeresschnecken, die Algen fressen, aber die Chloroplasten nicht verdauen, sondern in ihre eigenen Zellen einbauen.

Für das Einfangen des Lichts sind **Antennenkomplexe** aus Proteinen und Pigmenten zuständig. Sie können auf drei unterschiedliche Weisen angeordnet sein:

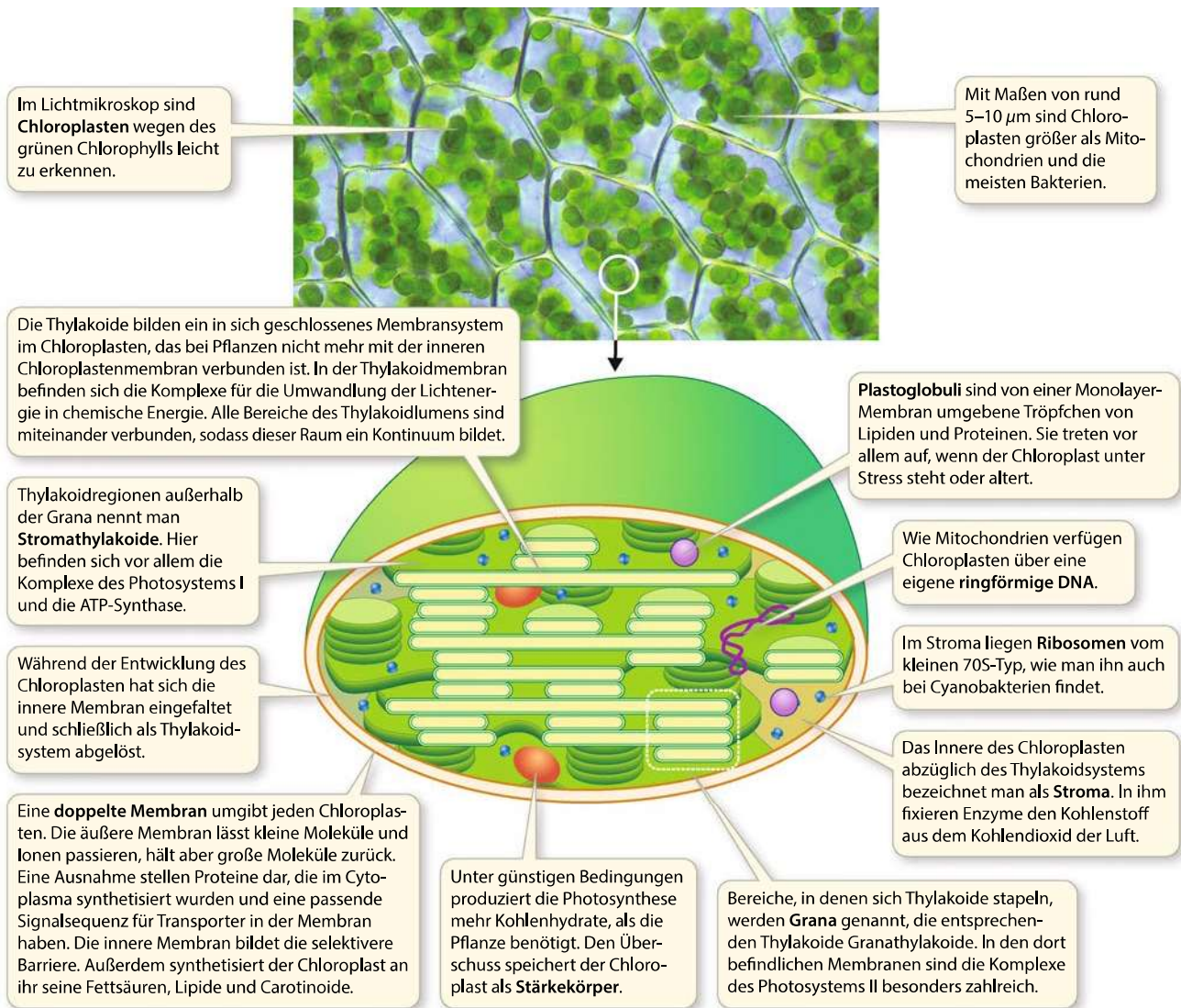
- Bei Plastiden der Landpflanzen und vieler Algen, aber auch bei Purpurbakterien und Halobakterien, sind sie direkt in die Membran integriert.
- Cyanobakterien, Rotalgen und die Glaucophyta nutzen zudem auf die Membran aufgelagerte Strukturen, die Phycobilisomen ► Abschn. 13.10, 33.6, 33.7).
- Grüne Bakterien verfügen über Chlorosomen, die an die Innenseite der Zellmembran angelagert sind (■ Abb. 4.14). Phycobilisomen und Chlorosomen befähigen ihre Besitzer, Licht zu nutzen, das für Organismen mit Chloroplasten zu schwach ist oder von ihnen durchgelassen wird, weil die Wellenlänge nicht zu den Pigmenten wie dem jeweiligen Chlorophyll passt.



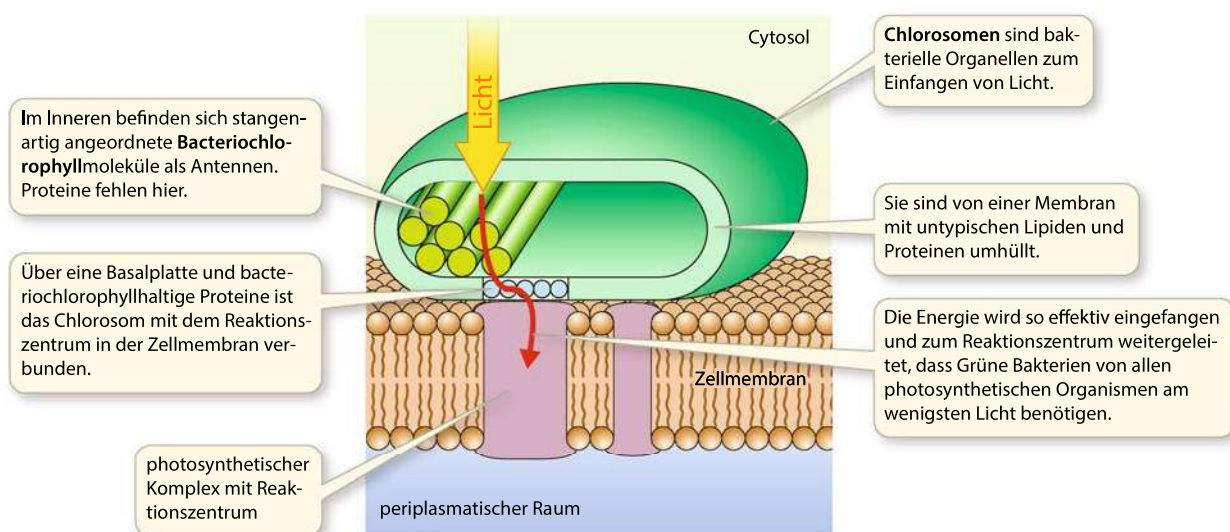
■ Abb. 4.12 Bei Cyanobakterien hat sich das Thylakoidsystem entwickelt, das viel Platz für membraninterne Photosynthesekomplexe bietet



## 4.4 • Für die Photosynthese gibt es besondere Strukturen



■ **Abb. 4.13** Auch die Chloroplasten der Viridiplantae, also der Pflanzen und Grünalgen, besitzen ein Thylakoidsystem, das dem der Cyanobakterien sehr ähnelt



■ **Abb. 4.14** Die photosynthetischen Strukturen der Grünen Bakterien heißen Chlorosomen

### 4.5 Zellen müssen ihren Innendruck anpassen und regulieren

Biomembranen sind für Wasser weitgehend durchlässig. Es kann sowohl mittels einfacher Diffusion als auch mittels erleichterter Diffusion durch Aquaporine in beide Richtungen wandern. Für die im Wasser gelösten Ionen und Moleküle sind Membranen hingegen weitgehend undurchlässig. Diese Semipermeabilität der Membranen sorgt dafür, dass die Konzentrationen auf den beiden Seiten unterschiedlich sind:

- Die konzentriertere Lösung nennt man **hypertonisch** oder **hyperton**.
- Die weniger konzentrierte Lösung ist **hypotonisch** oder **hypoton**.
- Sind beide Lösungen gleich konzentriert, bezeichnet man sie als **isotonisch** oder **isoton**.

Wasser wandert zwar ständig hin und her, der etwas stärkere Strom verläuft jedoch von der hypotonen zur hypertonen Lösung. Dieser Nettofluss heißt **Osmose**. Die Osmose erfolgt passiv, ver-

braucht also keine Energie. Sie läuft so lange ab, bis sich die Konzentrationen ausgeglichen haben oder eine entgegengerichtete gleich starke Kraft einen ebenbürtigen Rückstrom von Wasser bewirkt (Abb. 4.15).

An den Membranen einer Zelle findet Osmose statt. Die unterschiedlichen Mechanismen, mit denen Organismen den osmotischen Druck kontrollieren, fasst man unter dem Begriff **Osmoregulation** zusammen. Grundsätzlich gibt es zwei mögliche Strategien (Abb. 4.16): **Osmokonformer** passen sich an das Medium an, indem sie ihre als interne Osmolarität bezeichnete Teilchenkonzentration auf den gleichen Wert bringen. **Osmoregulierer** halten ihre Osmolarität aktiv auf einem festen Wert.

Wenn Zellen in einem hypertonischen Medium Wasser abgeben, verlieren sie an Spannung und schrumpeln zusammen, da sich die Oberfläche einer Zelle nicht ändert (Abb. 4.17). In einem stark hypotonischen Medium platzen tierische Zellen sogar, weil ihre Zellmembran dem Innendruck durch das einströmende Wasser nicht standhalten kann. Zellen von Pflanzen, Pilzen und Prokaryoten, die von einer Zellwand umgeben sind, können den **Turgor** genannten Druck hingegen mit der Zellwand auffangen.

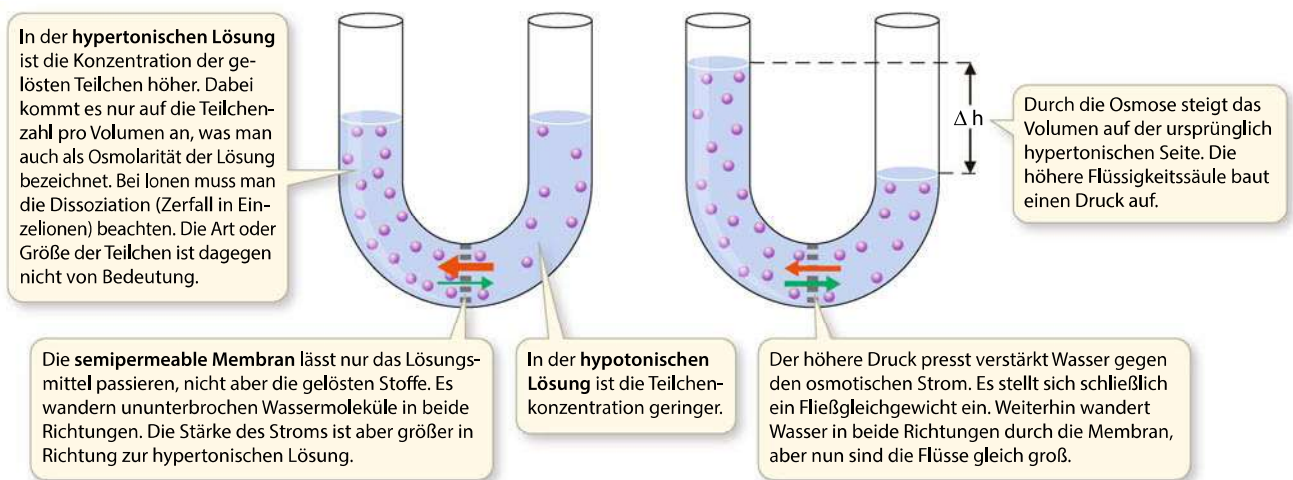


Abb. 4.15 Osmose ist ein Nettofluss von Wasser durch eine semipermeable Membran in Richtung der konzentrierteren Lösung

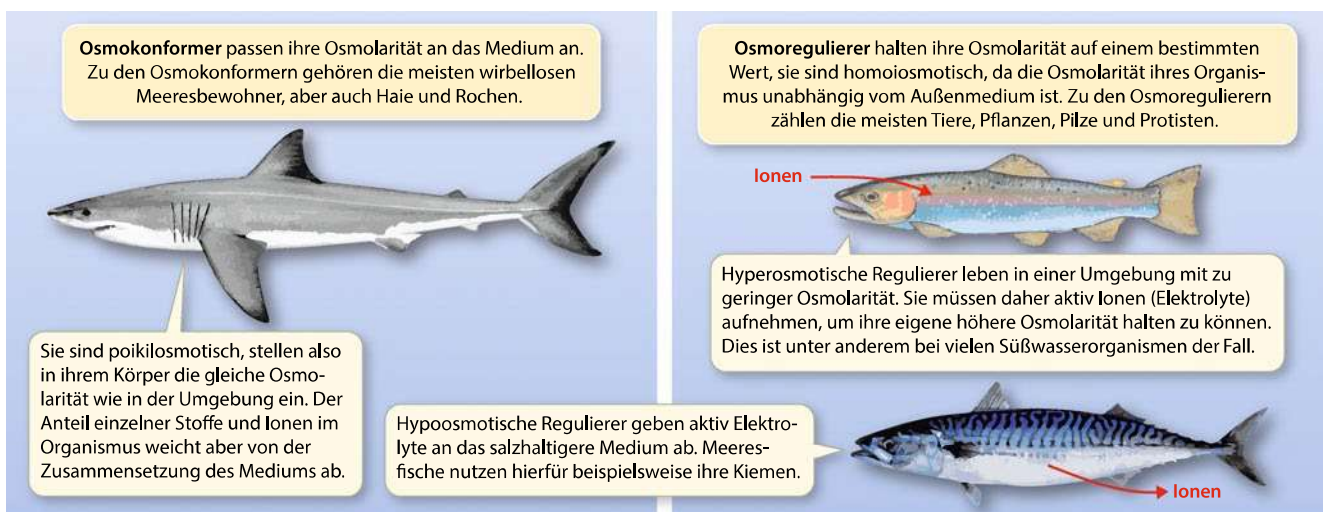
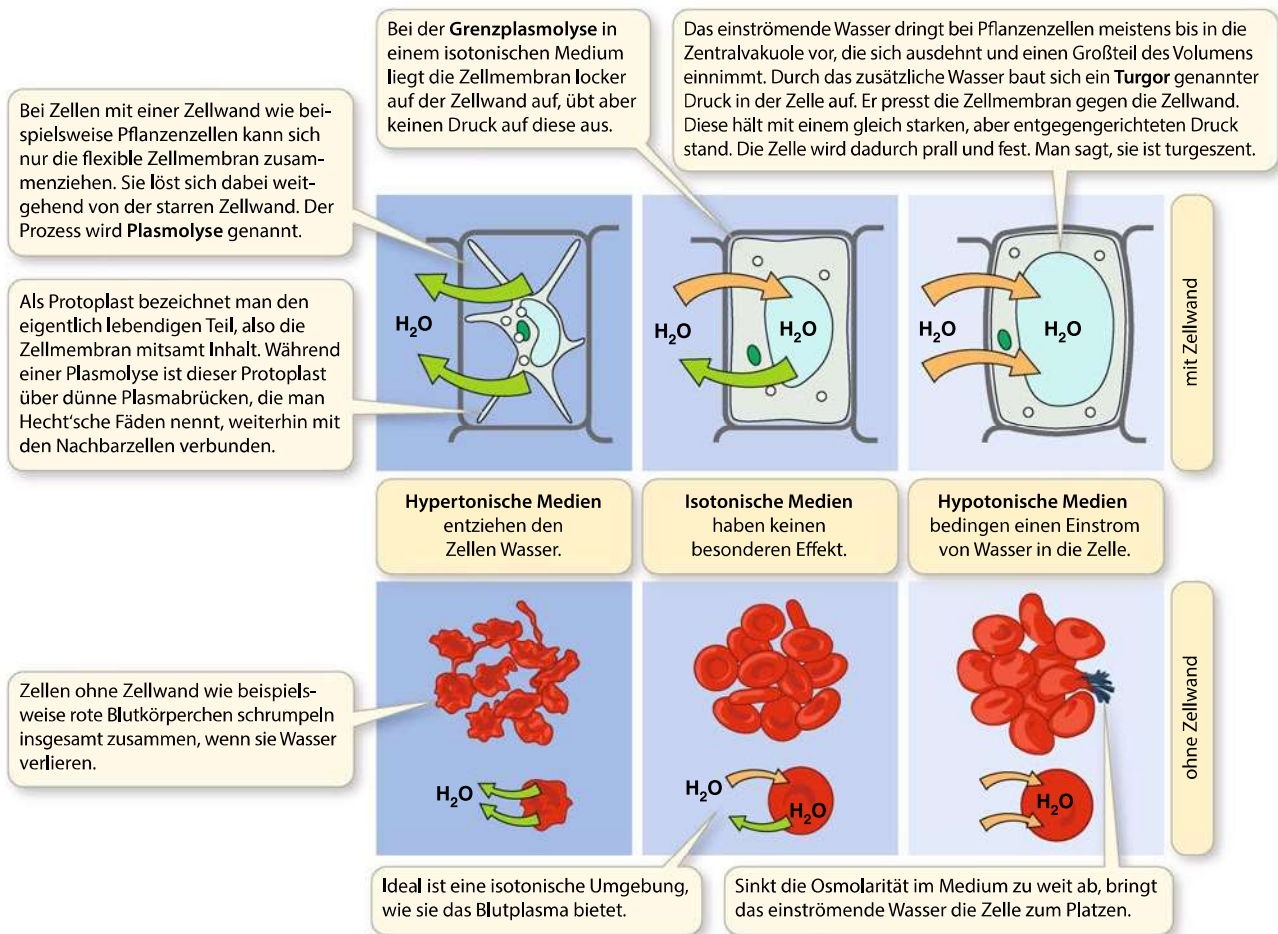


Abb. 4.16 Bei der Osmoregulation passen sich Organismen entweder an die Bedingungen an, oder sie halten aktiv ein osmotisch abweichendes Milieu aufrecht

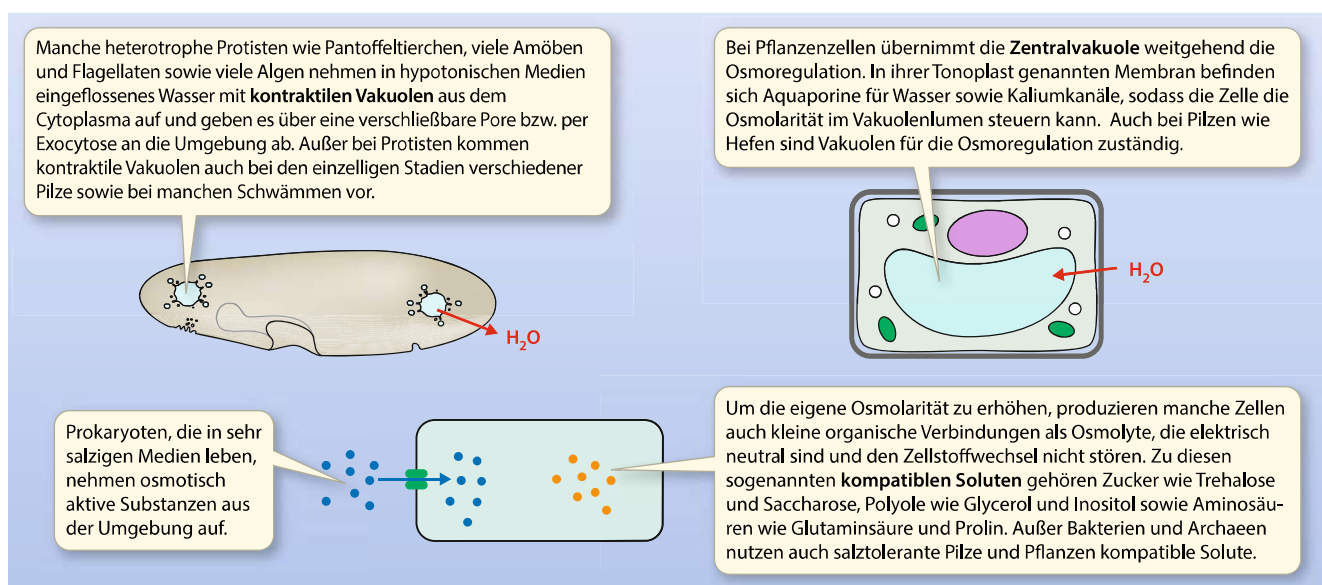
## 4.5 • Zellen müssen ihren Innendruck anpassen und regulieren



■ **Abb. 4.17** In hypertonischen Medien verlieren Zellen Wasser und schrumpeln zusammen. In hypotonischen Medien nehmen sie Wasser auf, wodurch ein Turgor genannter Innendruck entsteht

Auf Zellebene haben besonders die Osmoregulierer mehrere Mechanismen entwickelt, um ihre Osmolarität zu steuern (■ **Abb. 4.18**). Alle Verfahren arbeiten nach einem von zwei Prinzipien:

- Die kontrollierte aktive Aufnahme oder Abgabe von Wasser, wobei die Menge der osmotisch aktiven Substanzen (Osmolyte) gleich bleibt.
- Die aktive Aufnahme, Abgabe oder Synthese von Osmolyten, ohne den Wassergehalt zu beeinflussen.



■ **Abb. 4.18** Die Mechanismen zur Osmoregulation der Zelle verändern entweder den Wassergehalt oder die Menge an osmotisch aktiven Substanzen

### 4.6 Zellen legen Reserven für schlechte Zeiten an

Fast alle Organismen müssen mit schwankenden Versorgungsbedingungen rechnen. Sie legen deshalb in ihren Zellen Reserven in Form von **Speicherstoffen** oder **Reservestoffen** an, die es ihnen ermöglichen, Engpässe zu überwinden. Bei einem Mangel an Energie helfen chemische Substanzen, die leicht abbaubar sind und dabei viel Energie liefern, die Lebensprozesse in Gang zu halten. Um einem Mangel an Baustoffen vorzubeugen, sind Stoffe geeignet, die sich in möglichst direkt nutzbare Monomere zerlegen lassen.

Vor allem in drei Situationen müssen Organismen auf ihre Reserven zurückgreifen:

- In Phasen mit unzureichendem Nachschub, weil beispielsweise über längere Zeit die Lichtintensität zu gering ist oder es keine Beute gibt.
- Während der Reaktivierung nach einer Ruhephase, etwa morgens oder im Frühjahr, wenn viele Organismen ihre Winterruhe beenden.
- Im Zuge der Keimung oder Embryonalentwicklung, falls der Nachkomme bereits vom Mutterorganismus getrennt ist, wie bei Samen, Sporen oder Eiern.

Die Reserve- oder Speicherstoffe entstammen dem Primärstoffwechsel, also jenen Prozessen, die für den Erhalt und die Vermehrung des Organismus notwendig sind (► Abschn. 13.1). Mit Ausnahme der Nucleinsäuren stellen alle großen biologischen Stoffgruppen (Kohlenhydrate, Proteine und Lipide) einen oder

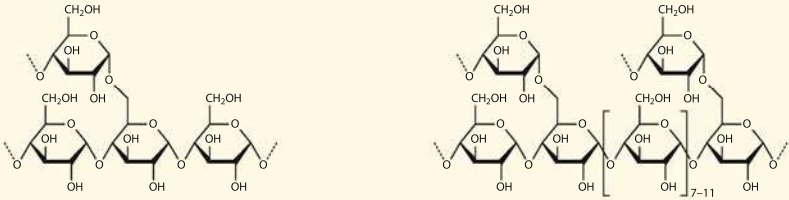
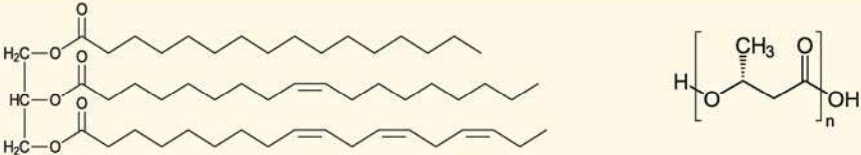
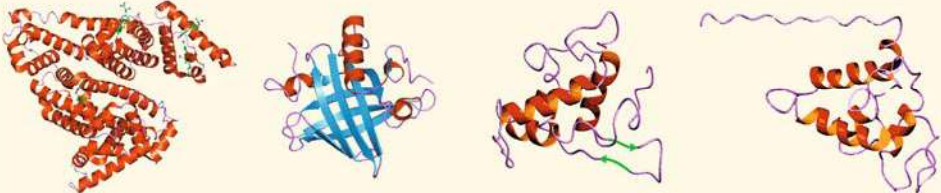
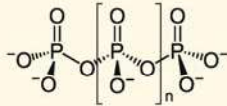
<p><b>Kohlenhydrate fungieren vor allem als Energiespeicher.</b></p>	 <p>Stärke ist die Standardreserve bei Pflanzen, kommt aber auch bei Algen und Protozoen vor, dagegen nicht bei Tieren und Pilzen.</p> <p>Tiere, Pilze und Bakterien nutzen Glykogen als Speicherkohlenhydrat.</p>
<p><b>Lipide sind eine andere häufig vorkommende Art der Energiereserve.</b></p>	 <p>Öle und Fette sind Verbindungen mit drei Fettsäureresten an einem Glycerinrüost und kommen in allen Organismengruppen vor. Ist die Substanz bei Raumtemperatur fest, bezeichnet man sie als Fett. Öle sind hingegen flüssig, weil ihre Fettsäureketten kürzer oder verzweigt sind.</p> <p>Polyhydroxybuttersäure (PHB) ist das Polymer der Fettsäure Buttersäure. Viele Bakterien nutzen PHB und ähnliche Verbindungen als Speicherstoff.</p>
<p><b>Speicherproteine stellen bei Bedarf Aminosäuren als Bausteine bereit. Sie lassen sich nach ihrer Löslichkeit gruppieren.</b></p>	 <p>Albumine sind wasserlöslich. Globuline lösen sich in Salzlösungen. Prolamine lösen sich in Ethanol. Gluteline lösen sich nur in Säuren.</p>
<p><b>Manche anorganische Verbindungen sind in den meisten Lebensräumen schwer zu finden.</b></p>	 <p>Polyphosphate stellen bei Bedarf Phosphate zur Verfügung, die in Nucleinsäuren, Phospholipide und ATP eingebaut werden.</p> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content;"> <p>32,066 16 S Schwefel [Ne]3s<sup>2</sup>p<sup>4</sup> -II, VI, IV 2,6</p> </div> <p>Schwefel kann vom reduzierten Sulfid (S<sup>2-</sup>) bis zum Sulfat (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) oxidiert werden und somit als Elektronenquelle dienen. Die Zwischenstufe des elementaren Schwefels lässt sich gut in Zellen einlagern.</p>

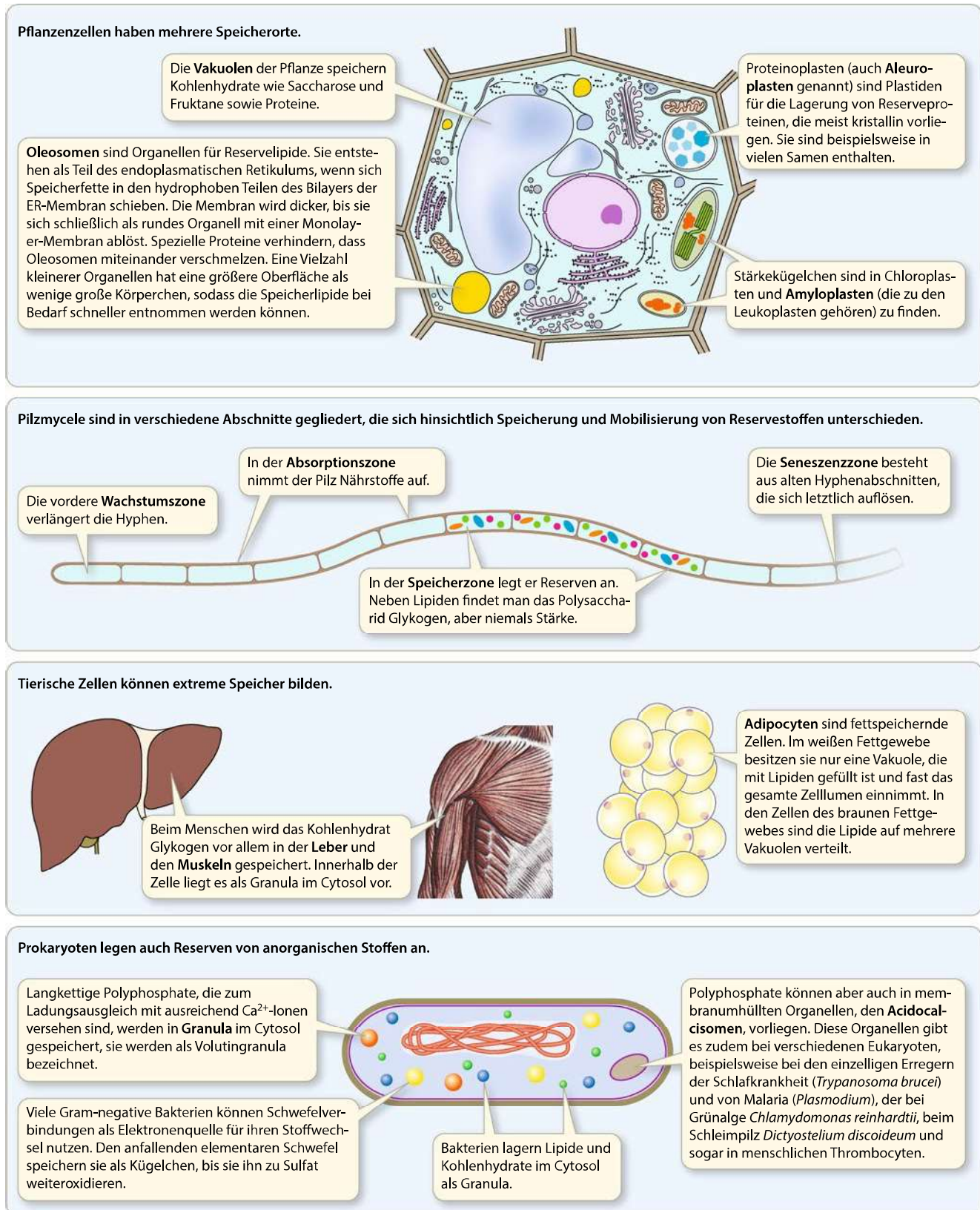
Abb. 4.19 Eine Auswahl von Reservestoffen

## 4.6 • Zellen legen Reserven für schlechte Zeiten an

mehrere Reservestoffe (▣ Abb. 4.19). Manche Zellen speichern sogar anorganische Substanzen.

Vielfach befinden sich die Reservestoffe einfach im Cytosol, häufig in Form von konzentrierten Tröpfchen oder Klümpchen,

die man auch als Granula bezeichnet. In einigen Fällen lagert die Zelle die Substanzen in Organellen aus, die bereits eine andere Funktion haben, oder sie erstellt sogar ein eigenes Speicherorganell (▣ Abb. 4.20; ► Abschn. 12.14).



▣ Abb. 4.20 Speicherorte von Reservestoffen bei verschiedenen Organismen