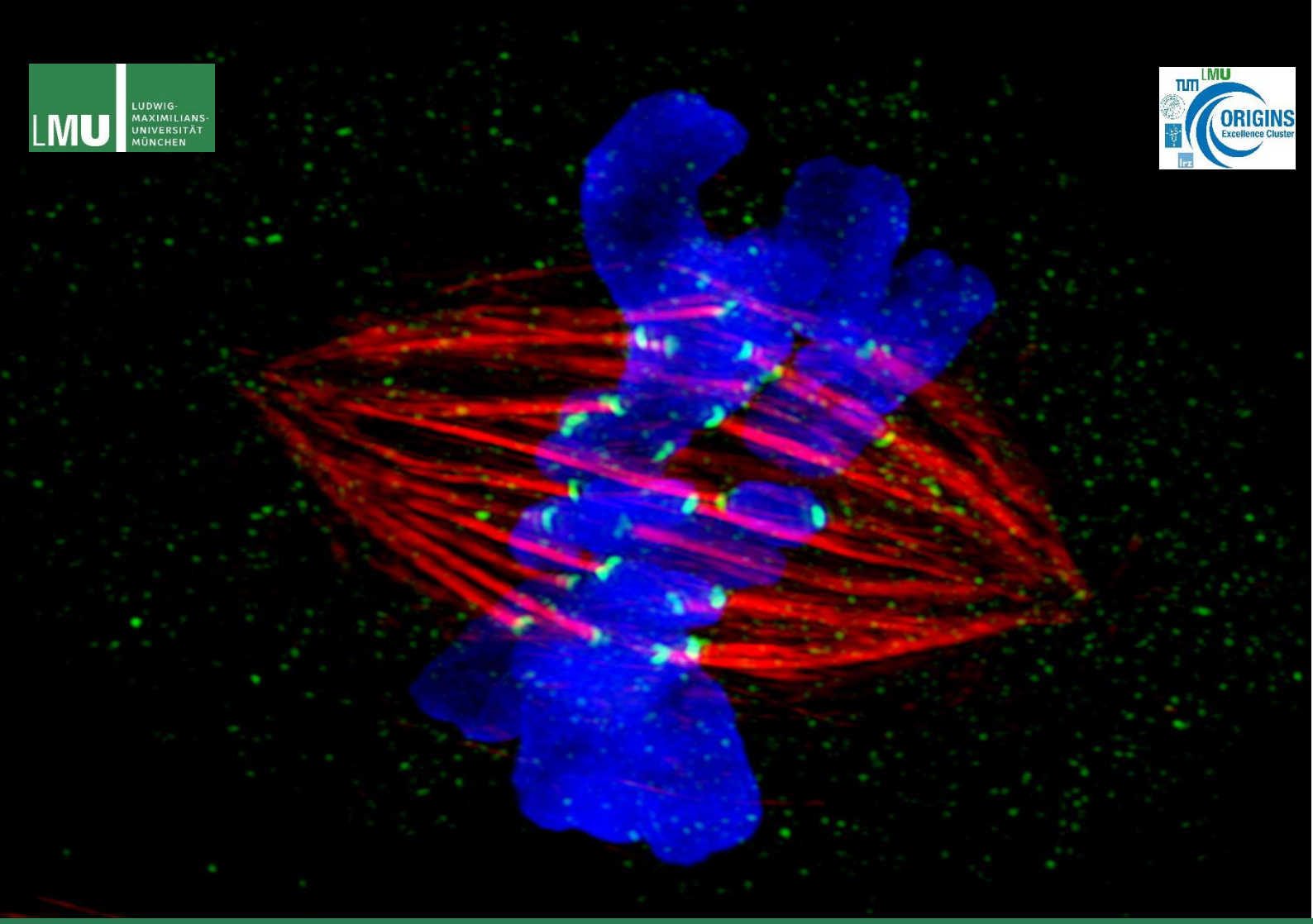


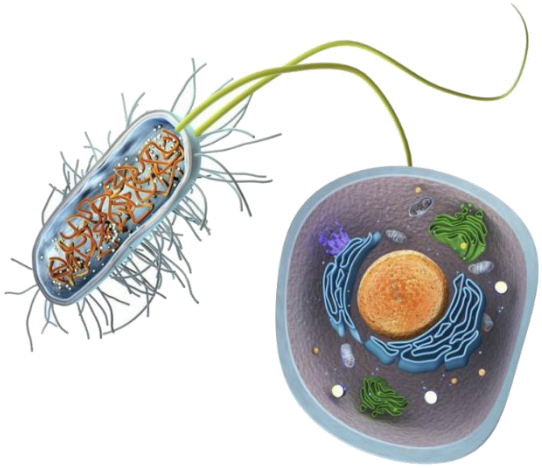
# Zwei Milliarden Jahre später!

## Aus der Reihe *FIDS!* - Forschung in die Schule!

Fakultät für Physik der LMU München


**Zusammenarbeit von:**
Dr. Pascal Eitner und Prof. Dr. Juan Gaviria

**Dr. Cecilia Scorza**
Koordinatorin

- Materialien
- Wissenschaftliche Hintergründe
- Aktivitäten und Aufgaben
- Anwendungen in der aktuellen Forschung

# Zielsetzung

Alle morphologisch komplexen Lebensformen auf der Erde (Algen, Pflanzen, Pilze und Tiere) bestehen aus Zellen mit Zellkern (Eukaryonten). Warum aber dauerte es fast zwei Milliarden Jahre, bis sich aus den ersten einfachen Lebensformen (Bakterien und Archaeen) echte eukaryontische Zellen entwickelten?

Eukaryonten sind das Ergebnis einer symbiotischen Beziehung, die durch fortschreitende Integration der Symbionten in die Wirtszelle entstanden sind. Dabei wurde ein Großteil der Gene des Symbionten ins Genom des Wirts überschrieben. Derartige Ereignisse sind in der Evolution von eukaryontischen Zellen mehrfach aufgetreten, doch zuerst sind dabei die Mitochondrien entstanden. Durch den Erwerb von Mitochondrien verbesserte sich die Energieversorgung der Wirtszellen, so dass größere Genome entstehen konnten. Erst dadurch erhielt die Evolution des Lebens einen neuen Schub hin zur Entwicklung neuer Formen, die neue ökologische Nischen auf dem Planeten schaffen konnten und eine ganz neue Stufe der Komplexität erreichten.

In diesem Modul lernen wir Faktoren kennen, die die Zellgröße und das Zellwachstum bestimmen, und wir erfahren, wie die Symbiose energetische und genetische Beschränkungen überwinden konnte, um die vielfältigen Möglichkeiten eukaryontischer Zellen zu erlangen.

# Inhaltsverzeichnis


Zielsetzung ..... 2

**6.1 Das Problem der Kleinheit** ..... 4

**6.2 Die Endosymbiontentheorie** ..... 5

**6.3 Die Entstehung einer neuen Infrastruktur** ..... 7

Aktivitäten ..... 9

Aktivität 1 **Relative Oberfläche** ..... 9

Aktivität 2 **Upscaling: eine neue Infrastruktur entsteht** ..... 10

Literaturquellen ..... 11

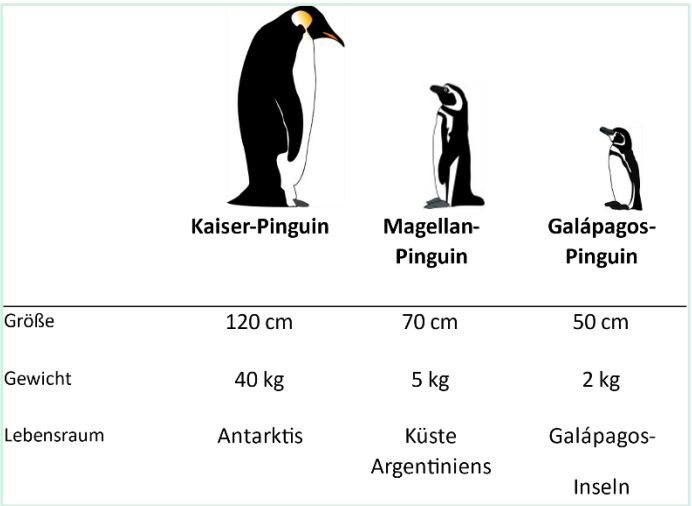
Bildnachweis ..... 12

## 6.1 Das Problem der Kleinheit

Es fällt auf, dass sich die Organismen in den ersten zwei Milliarden Jahren nach ihrer Entstehung kaum weiterentwickelt haben. Die Nachkommen dieser ersten Zellen haben zwar vielfältige Stoffwechselwege entwickelt, nutzen das Sonnenlicht als Energiequelle oder die Oxidationskraft des Sauerstoffs, und sie besiedeln die unterschiedlichsten Lebensräume. Aber es handelt sich immer noch um Zellen ohne Zellkern (Prokaryonten). Das Leben besteht also immer noch aus einer winzigen Zelle. Zwar finden sich an wenigen Ästen im Stammbaum auch Lebensformen, die Kolonien bilden – also Zellverbände, die sogar im Ansatz eine Art Arbeitsteilung entwickeln wie die fädigen Cyanobakterien (Abbildung 1). Aber es gibt noch keine Anzeichen dafür, dass sich einmal eine enorme Vielfalt von höheren Einzellern und Vielzellern entwickeln würde, wie wir sie heute kennen. Dafür kann es mehrere Gründe geben. Zum einen bedeutet es, dass die damals vorhandenen Prokaryonten sehr gut an ihre Umwelt angepasst waren. Zum anderen kann aber eine grundsätzliche Barriere bestanden haben, die verhindert hat, dass die Organismen den nächsten Entwicklungsschritt gehen konnten. Erst die Überwindung dieser Barriere brachte eine neuartige und erfolgreiche Lebensform hervor: Zellen mit Zellkern (Eukaryonten). Diese konnten ein Problem lösen, das ihre Vorfahren, die Prokaryonten, noch nicht lösen konnten. Prokaryoten sind (von einzelnen Ausnahmen abgesehen) winzig. Zwar sind sie in Bezug auf ihre Nahrung extrem vielseitig und damit eher anspruchslos, aber ihre Effizienz in Bezug auf die Nutzung der vorhandenen Energie ist gering. Dies ist die Folge der geometrischen Verhältnisse: Kleine Objekte besitzen eine große relative Oberfläche. Jeder Organismus muss an der Grenze zur Umwelt den Stoffaustausch regulieren. Atemgase und Nährstoffe müssen in die Zelle gelangen, Abfallstoffe müssen aus der Zelle ausgeschleust werden, und schädliche Umwelteinflüsse wie UV-Strahlung oder Gifte dürfen erst gar nicht in die Zelle hinein. Je kleiner also die Grenze (Fläche) von einer Zelle zur Umwelt ist, desto leichter wird die Kontrolle des Stoffaustausches. Im Gegensatz dazu kann die Zelle die Vorgänge in ihrem Inneren (Volumen) sehr gut kontrollieren und stabil halten.

***Abb. 1:*** *Cyanobakterien wie Anabaena circinalis sind als fädige Zellkolonie organisiert. Die hellen, kugeligen Zellen (Pfeil) können Stickstoff fixieren. (Foto: Imre Oldal)*

Wächst eine Zelle deutlich an, ohne ihre Form zu verändern, schrumpft ihre relative Oberfläche. Diese berechnet sich aus dem Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (siehe Kasten). Das Rechenbeispiel im Kasten verdeutlicht, dass es nicht um absolute Veränderungen geht, sondern dass die Verhältnisänderungen ausschlaggebend sind. Das Prinzip der relativen Oberfläche hat in der Biologie weitreichende Konsequenzen: Je größer die relative Oberfläche, desto besser funktioniert der Stoffaustausch mit der Umwelt. Gleichzeitig gehen Stoffe und Wärme aber auch schneller verloren. Soll dies verhindert werden, ist Größenwachstum die passende Antwort. Die Nachfolger der Prokaryonten sind im Durchmesser etwa zehnmal größer, weshalb ihre relative Oberfläche etwa auf ein Zehntel geschrumpft ist. In der Ökologie macht die Bergmannsche-Regel (Abbildung 2) prinzipiell dieselbe Aussage. Die



| | Kaiser-Pinguin | Magellan-Pinguin | Galápagos-Pinguin |
|---|---|---|---|
| Größe | 120 cm | 70 cm | 50 cm |
| Gewicht | 40 kg | 5 kg | 2 kg |
| Lebensraum | Antarktis | Küste Argentiniens | Galápagos-Inseln |

***Abb. 2:*** *Die Bergmannsche-Regel. (Grafik: Nils Raschke aus www.biologieunterricht.info; CC BY-NC-SA 3.0 DE)*

Besiedlung der Polkappen auf der Erde ist nur Warmblütern (Vögel und Säuger) gelungen. Pinguine und Robben beispielsweise, die in kalten Klimaten (Polargebiete) leben, sind deutlich größer als ihre Verwandten in wärmeren Zonen der Erde. Auch hier verringern die Tiere durch Größenwachstum ihre relative Oberfläche, über die sie sonst ständig Wärme an die Umwelt verlieren würden, und sie vergrößern ihr Volumen, das die Wärme speichern kann. Aber eine kleine Zelle kann nicht einfach wachsen, ohne neue Anpassungen zu entwickeln. Hier stellen sich energetische und strukturelle Probleme in den Weg, die wir im nächsten Kapitel betrachten wollen.

***Relative Oberfläche***
*Eine Fläche ist ein zweidimensionales Gebilde, sie wächst also mit der zweiten Potenz, während ein Volumen drei Dimensionen aufweist, also mit der dritten Potenz wächst. Angenommen, die Zelle sei eine Kugel, so wächst die Oberfläche mit dem Quadrat des Radius ($O = 4\,\pi \cdot r^2$), das Volumen aber mit der dritten Potenz des Radius ($V = 4/3\,\pi \cdot r^3$). Das folgende Rechenbeispiel zeigt die Entwicklung dieser Größen und – viel wichtiger – die ihres Quotienten:*

| *Radius (r)* | ***r = 1*** | ***r = 2*** | ***r = 3*** | ***r = 4*** | ***…*** | ***r = 10*** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| *Oberfläche (A)* | *1* | *4* | *9* | *16* | *…* | *100* |
| *Volumen (V)* | *1* | *8* | *27* | *64* | *…* | *1000* |
| *Verhältnis A : V* | ***1: 1*** | ***1 : 2*** | ***1 : 3*** | ***1 : 4*** | *…* | ***1 : 10*** |

*Bezogen auf das jeweilige Volumen sinkt die relative Oberfläche (A / V) bei Größenwachstum. Große Lebewesen sind stabiler bei normal schwankenden Umweltbedingungen, da sie relativ weniger Verluste über ihre Körperoberfläche hinnehmen müssen. Kleinräumige Strukturen (z. B. Lungenbläschen, Kapillaren, Darmzotten, Fischkiemen) ermöglichen aufgrund der enormen Oberflächenvergrößerung dagegen einen schnelleren Stoffaustausch.*

## 6.2 Die Endosymbiontentheorie

Eine große Zelle braucht mehr Energie, um Eiweiße für Stoffwechsel, Transport, Formgebung und andere Aufgaben zu produzieren. Damit sich die größeren Stoffflüsse besser steuern lassen, braucht die Zelle weitere regulatorische Proteine, deren Aufbau ebenfalls im Erbgut kodiert sein muss. Dadurch entsteht ein größeres Genom, dessen Herstellung mehr Energie benötigt. Auch wenn insgesamt die Effizienz des Stoffwechsels steigt und damit bezogen auf das Volumen relativ weniger Energie gebraucht wird, darf man nicht übersehen, dass ein größerer Organismus absolut betrachtet mehr Energie für seine Lebensprozesse braucht. Bei einem Größenwachstum um den Faktor zehn im Durchmesser, steigt das Volumen um den Faktor 1000 und die benötigte Energie zur Aufrechterhaltung dieses Volumens auch mindestens um den Faktor 100.

Wenn es mit einfachen Mitteln möglich wäre, diese Energie mit den vorhandenen Stoffwechselwegen bereitzustellen, wäre das mit Sicherheit in den ersten zwei Milliarden Jahren nach der Entstehung des Lebens passiert. Diese Zeitspanne ist unglaublich lang. Wenn es also in 2000 Millionen Jahren nicht gelungen ist, die Voraussetzungen zu schaffen, dass Zellen deutlich anwachsen können, muss die Hürde für die Beschaffung

***Abb. 2:*** *Mitochondrium (Modell: Überseemuseum Bremen 2009 237.JPG GNU).*

dieser zusätzlichen Energie sehr hoch gewesen sein. Ein Organismus kann nicht einfach hundertmal mehr Nahrung aufnehmen, um am Ende über hundertmal so viel Energie zu verfügen. Stattdessen war eine Innovation notwendig: Ein leistungsfähiger Energiestoffwechsel wurde erst durch bestimmte Organellen möglich, die sich nur bei höheren Zellen – solchen mit einem Zellkern (Eukaryonten) – finden. Die sogenannten Mitochondrien (griech. Mitos = winzig, chondros = Knorpel) fungieren als „Kraftwerke" (Abbildung 2) und können Traubenzucker mit Hilfe von Sauerstoff so stark oxidieren, dass am Ende nur Wasser und Kohlenstoffdioxid übrigbleibt. Dieser als Zellatmung bekannte Prozess läuft in allen Eukaryonten gleich ab. Pilze, Tiere, Pflanzen, Algen und höhere Einzeller besitzen alle Mitochondrien, die sich kaum voneinander unterscheiden. Dabei vermehren sich die Mitochondrien fast unabhängig vom Zellzyklus, indem sie sich wie Bakterien in der Mitte einschnüren und teilen. Sie enthalten außerdem DNA, bakterielle Ribosomen sowie Reservestoffe und produzieren ihre eigenen Eiweiße, weshalb man sie als semiautonom bezeichnet. Verschiedene Hinweise deuten auf folgendes Szenario hin, das als Endosymbiontentheorie seit Mitte der 1970er Jahre die Biologie beflügelt hat (Abbildung 3, [1, 2]): Ein Archäon – also ein Prokaryont – nimmt ein Purpurbakterium auf, verdaut es aber nicht. Das verschluckte Purpurbakterium lebt im Archäon weiter, und es kommt zu einem Stoffaustausch, der für beide Zellen vorteilhaft ist. Das Archäon liefert den Nähr- und Sauerstoff für das Purpurbakterium, und dieses wiederum gibt überschüssiges ATP an die Wirtszelle ab. So entsteht eine Endosymbiose, die beide Zellen verändert. Durch einen massiven Gentransfer vom Purpurbakterium an das Archäon verliert der Symbiont seine Autonomie und wird zum Mitochondrium, während der Wirt einen Zellkern entwickelt und zum Eukaryonten avanciert. Dieser Vorgang hat sich später in ähnlicher Weise bei einem Seitenast des Stammbaums wiederholt, aus dem dann Algen und Pflanzen hervorgegangen sind. Demnach sind die fotosynthesetreibenden Zellorganellen, die Chloroplasten, das Ergebnis einer Endosymbiose, bei der eine eukaryontische Zelle ein Cyanobakterium verschluckt hat, das in der Folge durch massiven Gentransfer zum Chloroplasten degeneriert ist. Während es viele Male unabhängig voneinander zur Aufnahme von fotosynthesetreibenden Organismen gekommen sein muss [2, 3], um die heute zu beobachtende Vielfalt der Chloroplasten zu erklären, sind die Mitochondrien aller Eukaryonten so gleichartig, dass nur eine Schlussfolgerung bleibt: Die Endosymbiose mit einem Purpurbakterium war ein einmaliger Glücksfall, der sich in der Zeit seit dem Auftreten der ersten Eukaryonten nicht nochmal

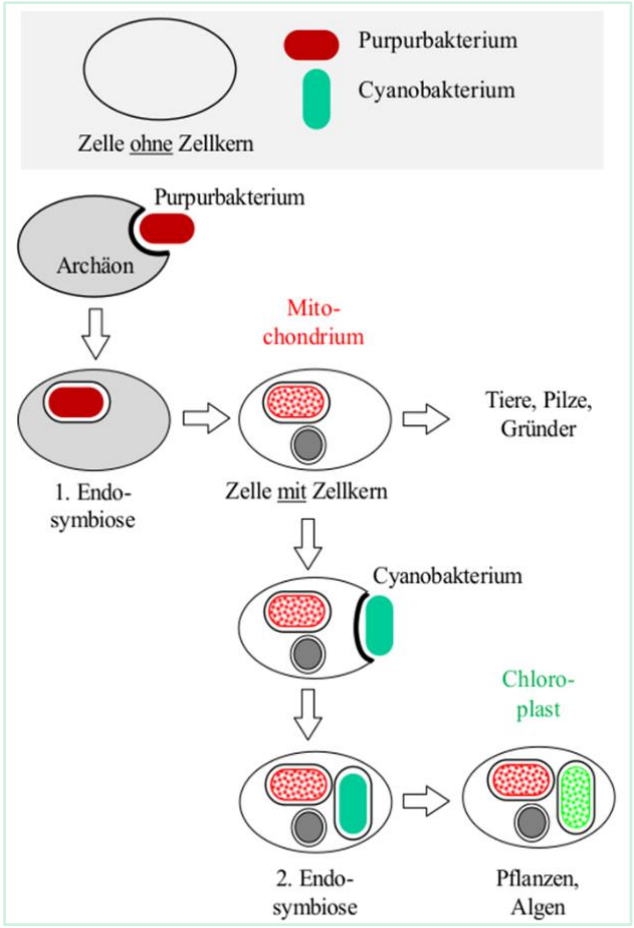



***Abb. 3:*** *Entwicklung der Mitochondrien und Chloroplasten wie sie durch die Endosymbiontentheorie erklärt wird. (Grafik: P. Eitner).*

wiederholen ließ. Und das waren immerhin 1700 Millionen Jahre! Zu schwierig sind wahrscheinlich die Abstimmungen der Stoffwechselwege, die Entgiftung von Sauerstoffradikalen und die präzise Kooperation der beiden Genome.

Dank der Mitochondrien wurde der Weg frei für das Wachstum der Zellen. Die Zellatmung verschaffte der eukaryontischen Zelle genug Energie, damit sie deutlich größer werden konnte als ihre Vorfahren. Aber der Erwerb von Mitochondrien und Chloroplasten sollte nicht die einzige strukturelle Veränderung in dem neuen Zelltyp bleiben.

***Kosten/Nutzen-Rechnung für den Gentransfer***
*Der Transfer von Genen des Symbionten zum Wirt bedeutete für beide Partner einen Gewinn wie folgende Rechnung zeigt. Auf der Seite des Symbionten führt jede Ausgliederung eines Gens zu einer massiven Energieersparnis, wenn man bedenkt, dass allein für die Bioproteinsynthese an den Ribosomen fünf ATP-Moleküle pro Peptidbindung gebraucht werden (z. B. 1 ATP für die Abschrift des DNA-Codons, 1 ATP für die Bewegung der RNA-Polymerase, 1 ATP für die Bewegung der Ribosomen entlang der mRNA, 1 ATP für die Übertragung des Aminoacylrestes auf den wachsenden Peptidstrang). Hochgerechnet auf 100 Symbionten pro Zelle und 5 % Genverlust pro Tag ergibt sich für eine durchschnittliche Proteinsynthese eine Energieersparnis in der Größenordnung von 5 x $10^{10}$ ATP-Molekülen für die Wirtszelle [4]! Es gibt aber Zellen, die viele tausend Mitochondrien besitzen (z. B. Muskelzellen), wodurch die Ersparnis noch größer wird. Heutige Mitochondrien haben bereits etwa 99 % ihrer ursprünglichen Gene verloren. Ob die restlichen Gene zwingend im Mitochondrium verbleiben müssen, ist noch nicht abschließend geklärt.*

## 6.3 Die Entstehung einer neuen Infrastruktur

Wenn technische Prozesse vom Labormaßstab auf eine großtechnische Produktion erweitert werden sollen, müssen Geräte und Abläufe meist etwas verändert werden (Abbildung 4). Gleichartige Arbeitsschritte werden zusammengefasst und müssen logistisch intelligent mit benachbarten Produktionsprozessen gekoppelt werden. Das „Upscaling“ funktioniert nicht wie ein Luftballon, den man einfach nur weiter aufbläst. Immer müssen auch strukturelle Änderungen erfolgen. Untergliederungen in Teilsysteme und kleinräumige Vernetzungen stabilisieren das Gesamtsystem. So wie man beispielsweise nicht einfach ein Haus für tausend Bewohner bauen kann, sondern die Anlage in mehrere Wohnblöcke gliedert, die über ein Wegenetz miteinander verbunden sind.

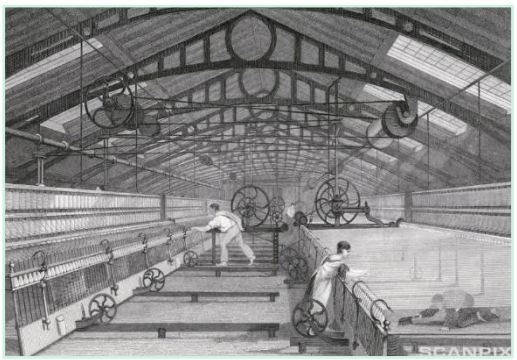


***Abb. 4**: Die industrielle Revolution (Foto: Bettmann/CORBIS. CC BY-NC-SA 4.0).*

Für eine größer gewordene Zelle bedeutet das beispielsweise, dass trotz des gewachsenen Volumens die Konzentration der Stoffwechselpartner nicht kleiner werden darf, was bei einer einfachen Verdünnung mit Wasser sofort der Fall wäre. Damit die Stoffe in der Zelle nach wie vor schnell miteinander reagieren können, müssen sie dicht genug beieinander sein. Zwar kann die Zelle die Konzentration einfach erhöhen, indem sie mehr Moleküle produziert. Aber dieser Weg ist einerseits sehr energieaufwändig, und andererseits können sich dann Moleküle räumlich behindern, die nicht miteinander reagieren. Die Lösung dieses Problems heißt

Kompartimentierung. Indem die Zelle in ihrem Inneren kleine Reaktionsräume schafft, die jeweils durch eine Zellmembran begrenzt sind, kann sie die Stoffkonzentration – und damit die Reaktionsgeschwindigkeit – hochhalten, braucht aber dennoch nur wenige gleichartige Moleküle.

Die Eukaryontenzelle enthält viele Kompartimente (Abbildung 5), zu denen auch die Zellorganellen gehören. Innerhalb der Zelle finden sich verschiedene Membransysteme, deren Inhalt vom restlichen Zytoplasma getrennt ist. So kommunizieren das Endoplasmatische Reticulum und der Golgi-Apparat miteinander, indem sie Bläschen (Vesikel) von ihrer Membran abschnüren, die mit einer anderen Membran wieder verschmelzen und dabei ihren Inhalt freisetzen können. Gleichzeitig können über die sogenannte Endozytose Partikel von außen in die Zelle aufgenommen werden, die dann mithilfe zelleigener Enzyme verdaut werden können. In jedem Fall erleichtert die neue Infrastruktur der Zelle die Kontrolle über die größeren Stoff- und Energieflüsse, so wie neue Verkehrswege in einer Stadt die Mobilität verbessern. Gleichzeitig wird die Reaktionsgeschwindigkeit hoch gehalten, sodass die Lebensprozesse nicht erlahmen.

Als wichtigste Neuerung ist der Zellkern zu nennen. Die doppelte Membran um das Erbgut dient nicht nur als Schutz vor viralen Elementen und reaktiven Molekülen, sondern erlaubt auch eine feinere Regulation der Genexpression. Beispielweise kann nach erfolgter Abschrift der DNA (Transkription) nachträglich die Boten-RNA verändert werden (Spleißen), bevor sie an den Ribosomen in Protein umgeschrieben wird (Translation). Die Kompartimentierung der DNA ist auch nötig, weil sich die Menge des Erbgutes gegenüber einem Prokaryonten vervielfacht hat.

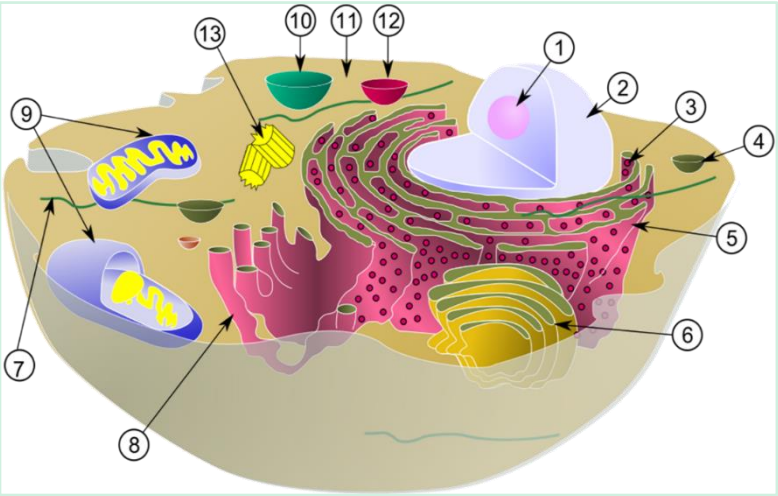



***Abb. 5:*** *Organisation einer typischen eukaryontischen Tierzelle: 1-Nucleolus, 2-Zellkern, 3-Ribosomen, 4-Vesikel, 5-Raues Endoplasmatisches Reticulum, 6-Golgi-Apparat, 7-Mikrotubuli, 8-Glattes Endoplasmatisches Retikulum, 9-Mitochondrien, 10-Lysosom, 11-Zytosol, 12-Peroxisom, 13-Zentriolen (Grafik: Messer, Woland and Szczepan.)*

Damit entstehen aber neue Probleme, für die die Zelle wieder neue Lösungen finden muss. Bei einer Zellteilung muss gewährleistet sein, dass jede Tochterzelle jeweils eine Kopie des kompletten Erbgutes erhält. Für die aufwändige Organisation dieser Gleichverteilung hat die Zelle eine eigene Struktur entwickelt (Spindelapparat), die bei Bedarf an dem Ort entsteht, an dem sich die Zentriolen befinden. Je nach Zelltyp und Organismus gibt es eine Reihe von Reaktionsräumen in Eukaryonten, die alle untereinander kommunizieren. So können die höheren Zellen leistungsfähiger werden.

# Aktivitäten

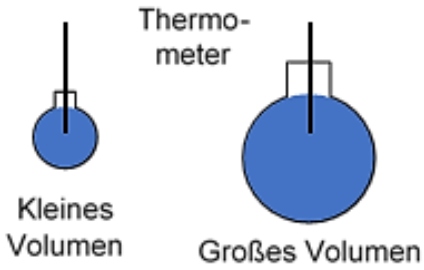
## Aktivität 1 – Relative Oberfläche

**Hintergrund**:

Es gibt einen Grund, warum Vögel und Säugetiere nicht beliebig klein sind. Fische, Lurche und Reptilien können jedenfalls deutlich kleiner, kürzer und schmaler werden. Um eine konstante Körpertemperatur zu gewährleisten, wie sie für gleichwarme Tiere wie Säuger und Vögel typisch ist, muss der ständige Wärmeverlust über die Oberfläche ausgeglichen werden. Das erfordert Energie, und diese Energie kann nur über die Nahrung zugeführt werden. Aus diesem Grund müssen kleine Wirbeltiere immer mehr Zeit für die Nahrungssuche und -aufnahme investieren als größere. Dieser Versuch soll den Lernenden ein elementares Konzept aus der Biologie erschließen, dem die Intuition nicht immer folgen kann: das Konzept der Oberflächenvergrößerung. Die relative Oberfläche beschreibt das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen und entscheidet darüber, wie schnell Transportvorgänge stattfinden und wie schnell ein Gleichgewichtszustand erreicht wird.

**Material**:

- 1 großer und 1 kleiner verschließbarer Rundkolben (0,5 und 2 Liter) mit durchbohrten Gummistopfen.
- 1 digitales Thermometer
- Wasserkocher
- (Leitungs-) Wasser
- Stoppuhr, Maßband




**Durchführung:**

Stellen Sie die Rundkolben entweder auf eine geeignete Unterlage (z. B. Korkplatte bzw. -ring), oder befestigen Sie die beiden Kolben mit einer Schraubzwinge an einem Stativ. Erhitzen Sie das Wasser im Wasserkocher, bis es siedet. Befüllen Sie damit zuerst den kleinen und dann den großen Rundkolben und messen Sie die Temperatur (zuerst im kleinen, dann im großen Kolben). Wiederholen Sie mithilfe der Stoppuhr zuerst alle 60 Sekunden, dann alle 5 Minuten die Messung und notieren Sie die Temperatur. Bestimmen Sie auch mithilfe eines Maßbandes den Durchmesser der beiden Rundkolben.

**Aufgaben**:

1. Tragen Sie die Messwerte in die Tabelle ein.

| *Zeit / min* | *0* | *1* | *2* | *3* | *4* | *5* | *10* | *15* | *20* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| *Temperatur / °C* | | | | | | | | | |

2. Berechnen Sie die relative Oberfläche der beiden Gefäße ($A_{kugel} = 4 \cdot \pi \cdot r^2$, $V_{kugel} = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3$)

*Kleines Gefäß: r= 5 cm, A= 4π · (5 cm)$^2$ = 314 cm$^2$, V= 4/3 π · (5 cm)$^3$= 524 cm$^3$ → A/V = 0,600 cm$^2$/cm$^3$*
*Großes Gefäß: r= 8 cm, A= 4π · (8 cm)$^2$ = 804 cm$^2$, V= 4/3 π · (8 cm)$^3$= 2145 cm$^3$ → A/V = 0,375 cm$^2$/cm$^3$*

3. Erklären Sie den unterschiedlichen Temperaturverlauf der beiden Gefäße.

*Die Wärme geht über die Oberfläche verloren, wird aber durch das Volumen gespeichert. Das große Gefäß kühlt langsamer aus, weil seine relative Oberfläche geringer ist (s. o.).*

4. Erklären Sie, warum Landsäugetiere in polaren Gebieten kleine Körperanhänge (z. B. Ohren) besitzen.

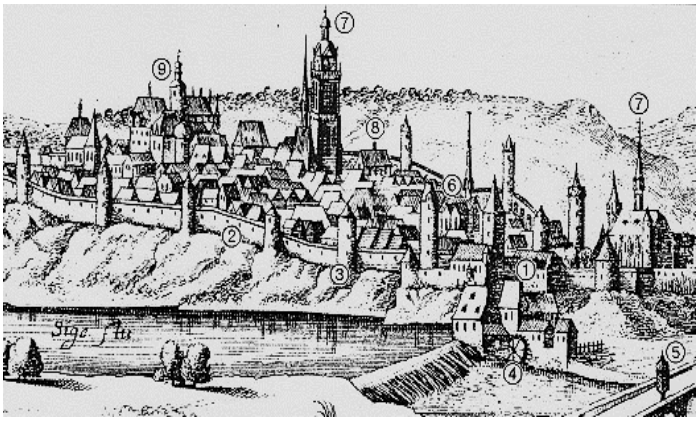
*Körperanhänge vergrößern zwar nicht das Volumen, aber die Oberfläche, über die Wärme verloren geht. Indem z. B. die Ohrmuscheln verkleinert werden, minimieren gleichwarme Tiere ihre Wärmeverluste.*

## Aktivität 2 – Upscaling: eine neue Infrastruktur entsteht

**Hintergrund**:

Um aus einer kleinen Zelle eine große zu machen, reicht es nicht aus, vorhandene Strukturen einfach zu vergrößern. Neue Elemente und Kompartimente müssen entstehen, um die größere Vielfalt von Stoffwechselprozessen voneinander zu trennen und zu koordinieren, damit diese sich nicht gegenseitig behindern. Diesem Problem sieht sich nicht nur das Leben gegenüber, sondern es handelt sich um eine prinzipielle Überlegung, die etwas mit Organisation und Logistik zu tun hat. Um diesem systematischen Phänomen nachzuspüren, wird in dieser Übung wieder ein Modell verwendet: Leben in unterschiedlich großen Menschensiedlungen.

**Material**:



**Durchführung**:

Betrachten Sie die beiden Darstellungen eines mittelalterlichen Bauernhofes (links) und einer Stadt aus derselben Epoche (rechts) und denken Sie sich in die Lebenssituation der Menschen ein.

**Aufgaben**:

1. Ergänzen Sie die Begriffe, um prinzipielle Gemeinsamkeiten der beiden Siedlungsformen zu erkennen.

| Merkmal | Bauernhof | Stadt |
|---|---|---|
| Zugangsbegrenzung | *Zaun* | Stadtmauer |
| Lebensmittelversorgung | Gemüsebeet, Nutzvieh | *Märkte* |
| *Entscheidungsträger* | Bauer/Patron | Gemeinderat, Bürgermeister |

2. Nennen Sie Strukturen, die in der Stadt neu dazugekommen sind und identifizieren Sie analoge Strukturen in der höheren Zelle. Finden Sie auch städtische Institutionen, die kein Pendant in der Zelle haben.

| Stadt | Zelle |
|---|---|
| *Rathaus* | *Zellkern* |
| *Wassermühle / Kraftwerk* | *Mitochondrien / Chloroplasten* |
| *Werkstätten / Fabrik* | *Endoplasmatisches Reticulum* |
| *Poststelle* | *Golgi-Apparat* |
| *Abfallentsorgung* | *Zentrale Vakuole bei Pflanzen* |

*Weitere Elemente, die sich nicht so leicht in der Zelle finden lassen:*
*- Straßen / Leitungen*
*- Feuerwehr / Polizei*
*- Kirchen*
*- Gericht / Gefängnis*

3. Erklären Sie, warum in einer Stadt viel mehr Entscheidungsträger vorhanden sein müssen als auf einem Bauernhof. Nutzen Sie eine Analogie zum Erbgut.

*Weil in einer Stadt viel mehr Prozesse reguliert werden müssen als auf einem Bauernhof. Dort kann ein Mensch alleine noch den Überblick haben, während dies in einer Stadt viel schwieriger ist. In Analogie zur Zelle kann man sagen, dass eine große Zelle auch deshalb mehr Erbgut braucht als eine kleine, weil im Erbgut auch der Bauplan für die regulatorischen Eiweiße enthalten sein muss.*

# Literaturquellen


[1] *Gargaud M, Martin H, López-García P, Montmerle T, Pascal R (2012) Young Sun, Early Earth and the Origins of Life. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-22552-9*

[2] *Martin WF, Garg S, Zimorski V (2015). Endosymbiotic theories for eukaryote origin. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. Royal Society of London. https://doi.org/10.1098/rstb.2014.0330*

[3] *López-García, P., Eme, L., & Moreira, D. (2017). Symbiosis in eukaryotic evolution. Journal of Theoretical Biology, 434, 20–33. https://doi.org/10.1016/j.jtbi.2017.02.031*

[4] *Nick Lane (2017) Der Funke des Lebens. Energie und Evolution. Theiss Verlag, Darmstadt, ISBN: 9783806234848*

# Bildnachweise

- Titelseite: "Chromosomes (blue) lined up for cell division" by ZEISS Microscopy is licensed under CC BY-NC-ND 2.0
- Prokaryote og eukaryote celler by Leverandør Science Photo Library, Leverandør NTB scanpix. CC BY-NC-SA 4.0
- Abb. 1: Nils Raschke by www.biologieunterricht.info; CC BY-NC-SA 3.0 DE
- Abb. 2: Überseemuseum Bremen 2009 237.JPG; GNU
- Abb. 4: Fabrikkarbeidere overvåker maskiner [Internet]. Supplier: Corbis, Supplier: NTB scanpix; CC BY-NC-SA 4.0
- Abb. 5: Messer, Woland and Szczepan 1990, Biological_cell.svg; GNU