

Die Ansichten über die Zelle scheinen sich während des Studiums semesterweise zu verändern. Zu Beginn definiert man die Zelle schlicht als „die kleinste Baueinheit aller Organismen“, dann wird sie zur „membranumhüllten Ursache erhöhten Kaffeeverbrauchs“ und schließlich hält man sie für ein „komplexes, hochaktives System“. Tatsächlich ist die Zelle alles zusammen und noch vieles mehr. Aber diesen dreistufigen Entwicklungsprozess muss wohl jeder durchschreiten.

Dieses Buch soll helfen, möglichst schnell die letzte Stufe zu erreichen. (Um sofort jegliche Illusion im Keime zu ersticken: Nein, das mittlere Stadium kann man nicht überspringen, wohl aber verkürzen.) Das Konzept dieses Buches ist sehr einfach, da es letztlich auf einer „Binsenweisheit“ beruht: *Ein Bild sagt mehr als tausend Worte*. Wer selbst einmal nach vielseitiger Lektüre endlich auf eine Graphik gestoßen ist und somit erfahren hat, dass man sich ein Bild tatsächlich leichter merken kann als tausend Worte, der beginnt, selbst Binsenweisheiten Respekt zu zollen. An dieser Stelle sei auch gleich darauf hingewiesen, dass es sich bei diesem Buch um ein Repetitorium handelt. Ein Repetitorium kann weder ein Lehrbuch noch eine Vorlesung ersetzen. Dieses Buch wurde konzipiert, um bereits Gelerntes zu wiederholen, und um Einzelfakten zu einem Gesamtbild zu vereinen (mit anderen Worten: um die mittlere Phase zu verkürzen).

Unser Gehirn kann sich Bilder leichter als Texte merken und Zusammenhänge leichter als Einzelfakten. Auf diesen Grundlagen beruhen sowohl die Reihenfolge der Themenkomplexe als auch die Strukturierung der einzelnen Themeninhalte. Das Hauptanliegen dieses Buches ist, dass man sich die grundlegenden zellulären Strukturen, Prozesse und ihre Zusammenhänge *vorstellen*, dass vor seinem geistigen Auge eine Zelle entstehen kann.

Das Nichtwissen von Fakten und Theorien kann manchmal ebenso unerfreuliche Konsequenzen haben wie das unreflektierte, unkritische Übernehmen von Informationen. Zu wissen, unter welchen Umständen bestimmte Daten entstanden sind, scheint nicht immer notwendig, ist aber sehr hilfreich. Einige Hinweise dazu findet man im Kapitel „Techniken“ und im Anhang unter „Die Naturwissenschaften“ und „Geschichtsdaten“.

Abschließend noch einige Anmerkungen zum Lernen an sich: Gerade beim Studieren und Erforschen lebender Systeme ist es sehr sinnvoll, sich von Anfang an Struktur-Funktions-Zusammenhänge einzuprägen; denn in allen biologischen Systemen werden Funktionen (besser: Leistungen) durch die Strukturen determiniert. Man kann übrigens nicht nur viel *über* sondern auch *von* der Zelle lernen, zum Beispiel, dass man Effektivität durch den Verknüpfungsgrad steigern kann. Je vielfältiger man die gelernten Einzelfakten untereinander und mit den bereits gelernten Fakten verknüpft, desto schneller und langfristiger bleiben sie einem im Gedächtnis. Dennoch: Kein Mensch kann sich alles merken und manchmal braucht man den Mut zur Lücke. Aber es heißt eben *Lücke* und der Interpretationsspielraum dieses Begriffs ist ebenso klein wie das Objekt selbst.

I. DIE ZELLE

1. Zellinventar.....	3
2. Evolution.....	4
3. Systematik.....	7

II. BIOCHEMISCHE GRUNDLAGEN

1. Struktur-Funktions-Zusammenhänge.....	9
2. Kohlenhydrate.....	10
3. Fette.....	12
4. Proteine.....	14
5. Nucleinsäuren.....	16

III. UNIVERSALIEN

1. Biomembran.....	18
2. DNA und RNA.....	21
3. Genetische Mechanismen.....	22
4. Proteinregulation.....	24
5. Cytoplasma.....	25
6. Ribosomen.....	26
7. Energie- und Stoffwechsel.....	27
8. Zusammenfassung.....	29

IV. PROKARYOT

1. Grundbauplan.....	30
2. Membranen.....	31
3. Zellwand.....	32
4. Nucleoid und Plasmide.....	35
5. Geißeln.....	36
6. Dauerformen.....	38
7. Systematik.....	40
8. Medizinische Aspekte.....	41
9. Zusammenfassung.....	43

V. EUKARYOT

1. Grundbauplan.....	44
2. Zellverbindungen.....	45
3. Transport.....	46
4. Endomembransystem:	
Endoplasmatisches Reticulum.....	48
Golgi-Apparat.....	50
Cytosomen.....	52
Vakuolen.....	53
Proteinverteilung.....	54
5. Zellwände.....	56
6. Organellen mit DNA:	
Nucleus.....	58
Mitochondrien.....	60
Plastiden.....	62

7. Ribosomen.....	64
8. Cytoskelett:	
Übersicht.....	65
Mikrofilamente.....	66
Intermediärfilamente.....	68
Mikrotubuli.....	70
Cilien und Geißeln.....	72
9. Zusammenfassung.....	74

VI. MORPHOLOGISCHE VERGLEICHE

Vergleiche verschiedener Zelltypen.....	76
---	----

VII. ZELLENTWICKLUNG

1. Wachstum und Teilung bei Prokaryoten.....	78
2. Zellzyklus der Eukaryoten.....	80
3. Zellwachstum der Eukaryoten.....	81
4. Mitose:	
Mitosestadien.....	82
Mitosespindel.....	84
5. Cytokinese.....	86
6. Differenzierungsprozesse.....	88
7. Zelltod.....	94
8. Alterungsprozesse.....	96
9. Zusammenfassung.....	97

VIII. TECHNIKEN

1. Lichtmikroskop.....	98
2. Elektronenmikroskop.....	100
3. Rasterkraftmikroskop.....	102
4. Zentrifugation.....	104
5. Färben und Markieren.....	106
6. Chromatographie.....	108
7. Elektrophorese.....	110
8. Röntgenstrukturanalyse.....	112
9. Zellkulturen.....	113

IX. ANHANG

1. Definitionen.....	116
2. Größen, Maße, Einheiten.....	121
3. Die Naturwissenschaften.....	122
4. Geschichtsdaten.....	124
5. Literatur.....	128
6. Webseiten.....	130
7. Stichwortregister.....	131

IN DER REGEL WIRD FOLGENDE FARBSYMBOLIK BENUTZT

MEMBRANEN

dunkelblaue Farbtöne



- Plasmamembran
- Membranen des Endoplasmatischen Reticulums
- Membranen des Golgi-Apparats
- Tonoplast
- Membranen von Nucleus, Mitochondrium, Plastiden u.Ä.

Grüntöne



- photosynthetisch aktive Membranen

FLÜSSIGKEITEN

hellblaue Farbtöne



- Cytoplasma
- Lumen des Endoplasmatischen Reticulums
- Lumen der Golgi-Vesikel
- extrazelluläres Medium
- Vakuole u.Ä.

RIBOSOMEN

Rotbrauntöne



ZELLWÄNDE

Beigebrauntöne



- Pflanzenzellwand
- Bakterienzellwand

PROTEINE

Orangetöne



- Membranproteine
- Oligopeptide, Polypeptide u.Ä.

NUCLEINSÄUREN

Rottöne



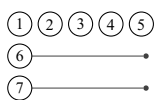
- DNA (der Chromosomen, Nucleoide, Plasmide u.Ä.)

SPEICHERSUBSTANZEN

Gelbtöne



- Stärke
- Fette
- Öle u.Ä.



Nummerierung von
Strukturen



Reihenfolge von
Prozessen

Symbole:

- ∅ Durchmesser
- < kleiner als
- > größer als

Abkürzungen/Systematik:

- Abt. Abteilung
- U.Abt. Unterabteilung
- St. Stamm
- U.St. Unterstamm
- Kl. Klasse

Allgemeine Abkürzungen:

Abb.	Abbildung	prok.	prokaryotisch
B	Breite	re.	rechts
bes.	besonders	S.	Seite
BP	Nucleotid-Basenpaare	s.	siehe
ca.	circa	s.a.	siehe auch
D	Dicke	sog.	sogenannte (-r, -s)
d.h.	das heißt	taxonom.	taxonomische (-r, -s)
euk.	eukaryotisch	TM	Trockenmasse
evtl.	eventuell	u.a.	unter anderem <i>oder</i>
G	Gewicht		und auch
hpts.	hauptsächlich	u.Ä.	und Ähnliche (-s)
i.d.R.	in der Regel	u.v.m.	und vieles mehr
i.e.S.	im engeren Sinn	versch.	verschiedene (-er, -es)
L	Länge	v.Zw.	vor der Zeitenwende
li.	links	z.B.	zum Beispiel
Nucleot.	Nucleotid (-e)	zus.	zusammen
o.	oder	z.T.	zum Teil

LEGENDE ZUR KLAPPTAFEL

- A** Prokaryot..... L 1-10 µm; ø < 3 µm
B Eukaryot..... L 10-100 µm; ø 2-20 µm
linke Hälfte Pflanzenzelle..... L 0,1-0,3 mm; G 10-100 mg
rechte Hälfte Tierzelle..... L 8-20 µm; G 2 ng
- PROKARYOT**
- 1 Bakterienzellwand..... D Gram-negative Wand ca.15 nm
D Gram-positive Wand 15-80 nm
- 2 Cytoplasmamembran..... D 4 nm (ohne Proteinbesatz)
- 3 intracytoplasmatische Membranen..... Form und Ausdehnung unterschiedlich
- 4 Nucleoid (= Kernäquivalent)..... nicht fest umgrenzt (10⁵-10⁷ BP)
- 5 Endospore..... verschieden (taxonomisches Merkmal)
- 6 70S-Ribosomen..... ø 20-40 nm
- 7 Bakteriengeißeln..... L 20 µm; ø 12-18 nm
- 8 Fimbrien..... L 0,2-1,5 µm; ø 3-14 nm
- 9 Pili..... L 1-20 µm; ø 3-25 nm
- 10 Bakterienkapsel..... verschieden (taxonomisches Merkmal)

EUKARYOT

- 11 Pflanzenzellwand..... D 0,3 µm (kann sehr unterschiedlich sein)
- 12 Tüpfel..... ø 0,25-0,6 µm
- 13 Plasmodesmos..... ø 30-60 nm
- 14 Cytoplasmamembran..... D 4 nm (ohne Proteinbesatz)
- 15 Nucleus..... ø ca. 6 µm (10⁷-10¹⁰ BP)
- 16 Kernhülle..... D 30-60 nm
- 17 Kernporenkomplexe..... ø 120 nm (Kanal ø 40 nm)
- 18 Nucleolus..... ø 2-5 µm
- 19 Centriolen..... L 0,3-0,5 µm; ø 0,15 µm
- 20 Mikrotubuli..... ø 25 nm
- 21 Mikrofilamente..... ø 6-7 nm
- 22 Intermediärfilamente..... ø 10 nm

DEFINITION

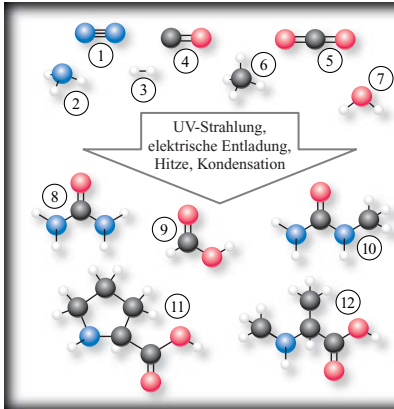
Eine Zelle ist ein membranumhülltes System mit wechselwirkenden Informationsträgern (Nucleinsäuren) und Funktionsträgern (Proteine). Sie ist die funktionell und strukturell kleinste lebens- und vermehrungsfähige Einheit und entsteht aus einer Zelle (durch Teilung) oder aus mehreren Zellen (durch Fusion). Eine Zelle ist ein offenes System, das sich selbst im Fließgleichgewicht hält (Homöostase) und mit seiner Umwelt Stoff- und Energieaustausch betreibt. Durch Energieaufnahme (Licht oder chemische Bindungsenergie) wird ein sehr hoher Ordnungszustand erreicht (Entropieabnahme durch stoffliche Ungleichverteilung).

- 23 Cytioribosomen (80S-Ribosomen)..... ø 30 nm
- 24 Plastioribosomen (70S-Ribosomen)..... ø 21 nm
- 25 Mitioribosomen (70S-Ribosomen)..... ø 15-20 nm
- 26 raues Endoplasmatisches Reticulum.... D (Cisternen) 20-30 nm
- 27 glattes Endoplasmatisches Reticulum.. ø (Tubuli) 30-60 nm
- 28 Dictyosom..... ø 1 µm
(Golgi-Apparat = Gesamtheit aller Dictyosomen einer Zelle)
- 29 Cisterne..... D 10-20 nm; ø 1 µm
- 30 Transportvesikel..... ø 50 nm
- 31 Mitochondrium..... L 2-8 µm; ø 0,2-1 µm
- 32 Cristae..... D 20-40 nm
- 33 Chloroplast..... ø 5-10 µm
- 34 Thylakoidmembran..... D 7 nm
- 35 Grana..... D 0,5-0,8 µm; B 0,4-0,6 µm
- 36 Vakuole..... Größe sehr unterschiedlich
- 37 Tonoplast..... D 4 nm (ohne Proteinbesatz)
- 38 Endocytosevesikel..... Größe sehr unterschiedlich
- 39 Lysosom..... ø 50 nm
- 40 Sekretionsvesikel..... ø 1 µm
- 41 Peroxisom..... ø 0,15-0,25 µm
- 42 Cilien..... L 10 µm; ø 0,25 µm
- Geißeln..... L bis 200 µm; ø 0,25 µm
- 43 Mikrovilli..... L 1 µm; ø 0,1 µm

Einige dieser Größenangaben sind gemittelte Werte, da die Dimensionen bestimmter Strukturen vom Entwicklungsgrad, vom Differenzierungszustand und von äußeren Bedingungen der Zelle abhängen.

D: Dicke G: Gewicht B: Breite L: Länge
ø: Durchmesser BP: DNA-Basenpaare

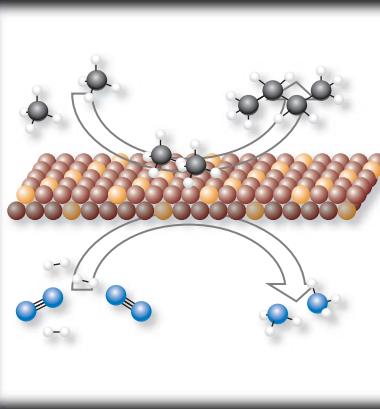
1. Chemische Evolution



Die Erde entstand vor ca. 4,6 Milliarden Jahren; während ihrer Abkühlung bildeten sich in einer O_2 -freien Atmosphäre aus einfachen anorganischen Molekülen die ersten organischen Moleküle, wie Miller und Urey experimentell nachvollziehen konnten. Außerdem bildeten sich damals (wie heute) verschiedene Aminosäuren im interplanetarischen Raum, die auf die Erde gelangt sein könnten.

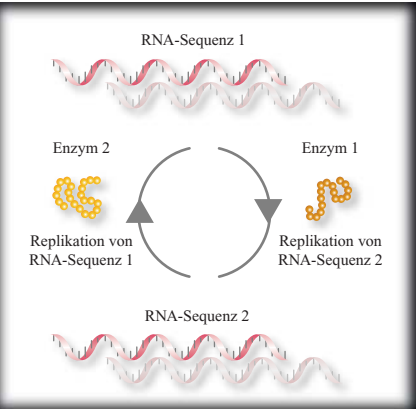
anorganische Moleküle: 1) Stickstoff, 2) Ammoniak, 3) Wasserstoff, 4) Kohlenmonoxid, 5) Kohlendioxid, 6) Methan, 7) Wasser; **organische Moleküle** (Auswahl): 8) Harnstoff, 9) Ameisensäure, 10) N-Methylharnstoff, 11) Prolin, 12) N-Methylalanin

2. Katalyse an Mineralen



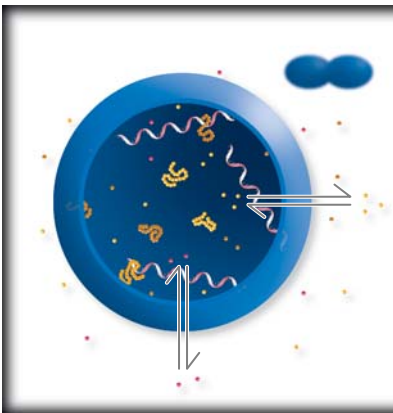
Minerale haben bei der Entstehung organischer Moleküle eine wesentliche Rolle als Behälter, Gerüst, Schablone, Katalysator und Reaktionspartner gespielt. Verwitterte Oberflächen (z.B. von Felsspat) bildeten Reaktionskammern; geschichtete Minerale (z.B. Tone) konnten zwischen ihren Atom-schichten Moleküle einfangen, die durch die erzwungene Nähe komplexere Moleküle und Polymere bilden konnten; Calcit lagert D- und L-Aminosäuren an unterschiedlichen Kristallflächen an, wodurch Peptide aus einheitlichen Aminosäuren entstehen konnten; Magnetit katalysiert die Reaktion von molekularem Wasserstoff und Stickstoff zu Ammoniak. Einige Enzyme enthalten auch heute noch Minerale.

3. Selbstreplizierende Systeme



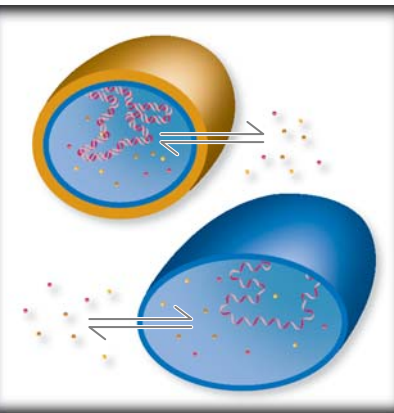
Auf nicht-biologischem Wege entstand in der „Ursuppe“ eine immer höhere Konzentration unterschiedlicher Moleküle, die verschiedene Funktionen erfüllen konnten. Mit kurzen RNA-Molekülen (50 bis 100 Nucleotide) als den ersten „Informationsträgern“ entstanden auch die ersten selbst replizierenden Systeme. Einzelsysteme aus RNAs und Proteinen konnten zu komplexeren Hyperzyklen verbunden werden (s.o.). Die katalytische Koppelung verschiedener RNA-abhängiger Proteinsynthesen ermöglichte eine präbiotische Evolution: Es setzten sich diejenigen RNA-Sequenzen durch, die sich am besten replizierten. Außerdem nahm die Komplexität der Reaktionsketten weiter zu.

4. Kompartimentierung



Erst mit der Kompartimentierung der Reaktionspartner wurde eine Evolution des Informationsgehaltes der RNA-Moleküle möglich. Durch die direkte räumliche Kopplung von RNA-Molekülen und ihren Genprodukten wurde die Gen-Information selektierbar. Fettartige Hüllschichten könnten sich aus Oberflächenfilmen in verdampfenden Pfützen gebildet haben. Durch Wind oder Regentropfen entstanden geschlossene Bläschen mit verschiedenen wechselwirkenden Molekülen. Die für den Stoffwechsel benötigten Monomere diffundierten durch die Membran in die Blase hinein. Durch Fusion von kleinen und Teilung von größeren Blasen wurden die Gene gemischt.

5. Der Progenot

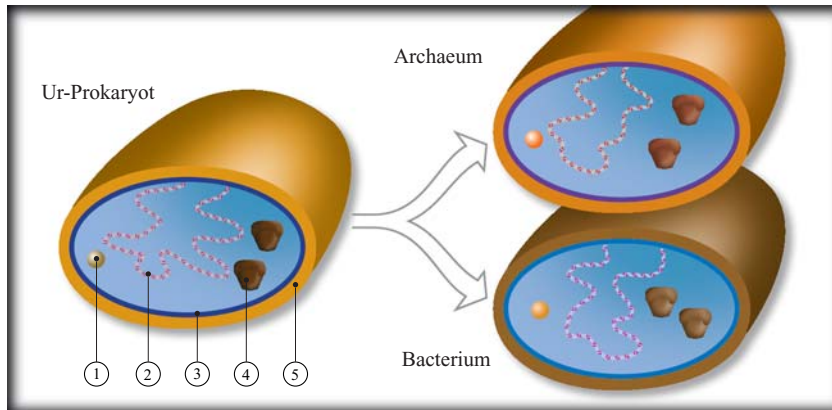


Die typische „Urzelle“ (= Progenot), aus der sich im Laufe der Zeit alle anderen Zelltypen entwickelt haben, hat es vermutlich nicht gegeben. Wahrscheinlicher ist eine inhomogene Gruppe von Progenot-Typen, unter denen ein reger Genaustausch herrschte. Aus dieser Gruppe entstanden dann die Archaea und die Bacteria. Ob diese Progenoten ein DNA- oder RNA-Genom und ob sie eine Zellwand hatten, ist unklar. Sie besaßen aber vermutlich einen (wenig ausdifferenzierten) Enzymesatz für verschiedene grundlegende Stoffwechselreaktionen (u.a. Glykolyse, Translation, Replikation), benutzten ATP als „Energie-währung“ und waren von einer geschlossenen Lipidschicht umhüllt.

Die hier geschilderten Entwicklungsschritte, die in einer O_2 -freien Atmosphäre von anorganischen Molekülen bis hin zur Gruppe der Progenoten führten, beruhen zum größten Teil auf Theorien und Hypothesen. Einige Teilschritte, wie z.B. die Bildung verschiedener organischer Moleküle unter Bedingungen der Urerde, unter interstellaren Bedingungen und an Mineralen, sowie die Bildung von „Membranblasen“ konnten experimentell nachvollzogen werden, doch die meisten der hier postulierten Prozesse lassen sich empirisch gar nicht oder nur unter optimalen Bedingungen nachvollziehen. Besonders problematisch ist die abiotische Entstehung von Polymeren (Nucleinsäuren und Polypeptiden), ebenso die postulierte Umstellung von einem ursprünglichen RNA-Genom zu dem späteren, stabileren DNA-Genom.

Aus der Gruppe der Progenoten entstanden dann die Prokaryoten, wobei sich die Entwicklungslinien der beiden Urreiche (oder Domänen) **Archaea** und **Bacteria** auf Grund zahlreicher morphologischer und physiologischer Unterschiede bereits sehr früh getrennt haben müssen. Endosymbiosen und weitere morphologische und physiologische Entwicklungsprozesse führten dann zur Entstehung der dritten Domäne: der **Eukaryoten**. Alle existierenden Organismen können auf Grund ihres zellulären Aufbaus einer dieser drei Domänen zugeordnet werden.

6. Prokaryoten: Archaea und Bacteria



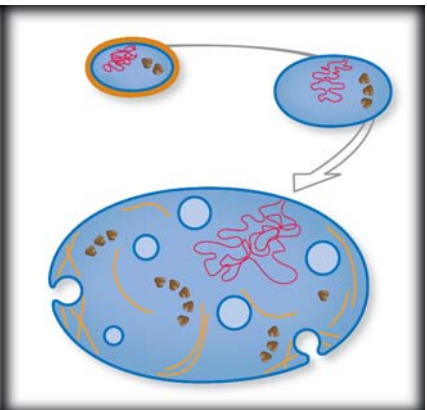
Archäologische Funde belegen, dass die ersten Prokaryoten - in einer noch immer O_2 -freien Atmosphäre - vor ca. 3,7 Milliarden Jahren entstanden sind. Diese Ur-Prokaryoten hatten ein DNA-Genom und besaßen eine Zellwand. Da es zahlreiche Unterschiede zwischen Archaea und Bacteria gibt, geht man davon aus, dass sich die Entwicklungslinien dieser beiden prokaryotischen Reiche früh getrennt haben.

Unterschiede zwischen Archaea und Bacteria sind z.B.:

- rRNA-Sequenzen, hauptsächlich der 16S-rRNA
- RNA-Polymerasen und Translationskomponenten
- Zellwände: Archaea besitzen kein Murein; ihre Wände sind sehr unterschiedlich gebaut
- Membranlipide: bei Archaea Glycerinether mit verzweigten Fettsäureketten (s.S. 31), bei Bacteria (und Eukaryoten) Glycerinester mit unverzweigten Ketten (s.S. 12)
- Energiegewinnung und Stoffwechsel: Archaea besitzen spezielle Stoffwechselwege und Coenzyme; Archaea können im Gegensatz zu Bacteria keine organischen Moleküle aufnehmen und verstoffwechseln
- RNA-Processing: Bestimmte Nucleotide von rRNAs und tRNAs werden unterschiedlich modifiziert

1) RNA-Polymerase, 2) DNA-Genom, 3) Zellmembran, 4) Ribosom, 5) Zellwand

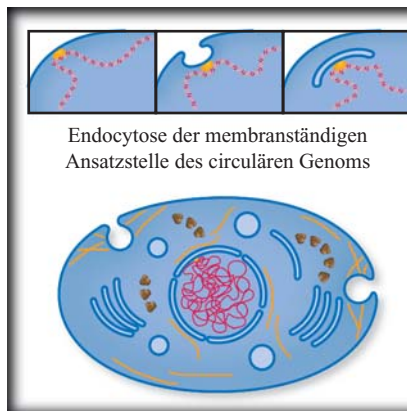
7. Umformung einiger Archaeobakterien



Einige Archaeobakterien könnten einen neuen Entwicklungsweg eingeschlagen haben: Sie verloren ihre Zellwand und nahmen deutlich an Volumen zu. Mit dem Verlust der äußeren Stabilisierung entstand die Notwendigkeit, die Zelle von innen her zu festigen: Es entwickelte sich ein Cytoskelett (orange). Die flexible Zellmembranfläche eignete sich zur endocytotischen Aufnahme gelöster Substanzen, wobei Cytoskelettbestandteile die Einschnürungsprozesse unterstützten.

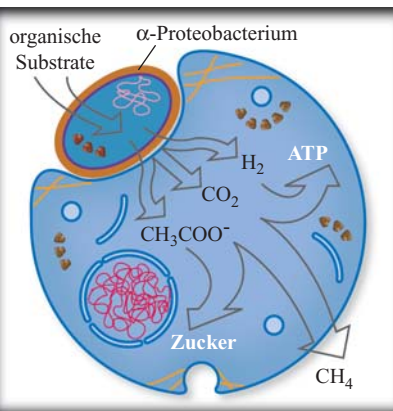
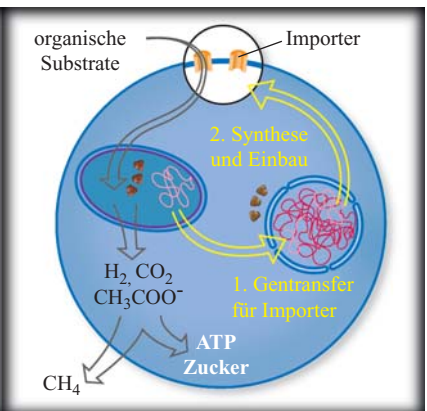
Der Stoffwechsel dieser Bakterien ist anaerob. Methanogene Archaeobakterien sind außerdem für die Deckung ihres Energiebedarfs abhängig von Acetat-, H_2 - und CO_2 -Quellen.

8. Bildung eines Nucleus



Endocytose der membranständigen Ansatzstelle des circuliären Genoms

9. Der Ur-Eukaryot

10. Endocytose von α -Proteobakterien

Viele Autoren äußern die Vermutung, dass auch der eukaryotische Nucleus Ergebnis eines endocytotischen bzw. endosymbiontischen Prozesses ist. Vergleiche von DNA und Membranen weisen jedoch (im Gegensatz zu Mitochondrien und Plastiden) nicht deutlich auf irgendeine entsprechende Vorläuferzelle hin.

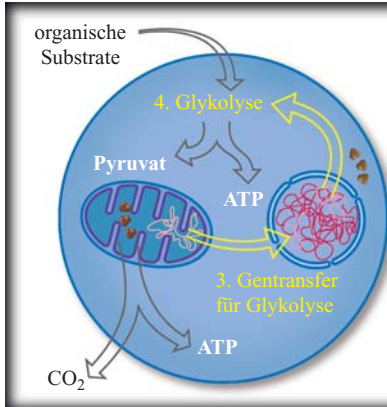
Eine Alternative ergibt sich aus dem sich entwickelnden Endomembransystem: Da bei den Prokaryoten die DNA punktuell an der Zellmembran befestigt ist, ist vorstellbar, dass sich das Membransegment mit dieser Ansatzstelle wie bei einer Endocytose gelöst haben könnte. Zusammen mit anderen, abgeflachten Membranvesikeln könnte die Kernhülle entstanden sein.

Der Ur-Eukaryot war wesentlich größer als die Prokaryoten und hatte vermutlich einen Zellkern, ein Cytoskelett und besaß die Fähigkeit zur Endocytose.

Sein Stoffwechsel war streng anaerob. Als Methanbildner war seine ATP- und Glucose-Produktion abhängig von Acetat-, H_2 - und CO_2 -Quellen. Fermentierende Bakterien, sog. α -Proteobakterien, die in ihren Zellmembranen Transportproteine für organische Moleküle hatten, schieden diese Substanzen als Abfallprodukte aus. Vermutlich ist aus diesem Grund zunächst eine lockere Symbiose von Bakterien und Ur-Eukaryoten entstanden, die sich im weiteren Verlauf zu einer stabilen Endosymbiose entwickelte.

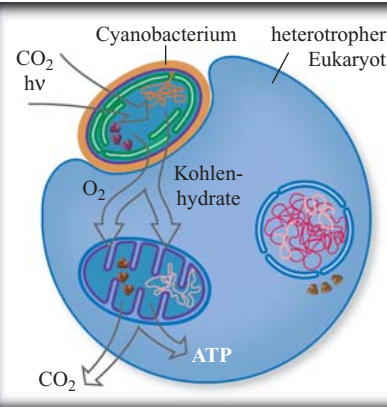
Nach der „Wasserstoff-Theorie“ erlangte der Ur-Eukaryot den optimalen Nutzen und damit die völlige Unabhängigkeit von externen H_2 -Quellen durch die vollständige Endocytose der fermentierenden α -Proteobakterien. Da die Wirtszelle in ihrer Membran aber keine Importer (spezielle Membran-Transportproteine) für organische Substrate besaß, mussten Kopien der Gene für diese Proteine vom Bacterium in das Genom der Wirtszelle transferiert werden. So konnten diese Importer auch in die Zellmembran der Wirtszelle eingebaut und die Ernährung des Symbionten gewährleistet werden. Im Laufe dieser endosymbiontischen Beziehung verlor das Bacterium allmählich seine Zellwand.

11. Das Mitochondrium



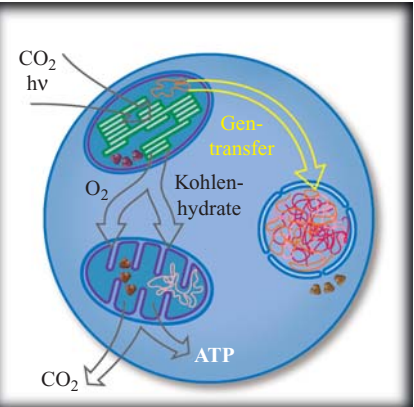
Außerdem wurden die Gene für die ATP-bildende Glykolyse vom Symbionten in den Zellkern transferiert (später noch wesentlich mehr Gene). Die Glykolyse läuft von nun an im Cytoplasma der Wirtszelle ab, die weitere Verarbeitung des Spaltproduktes Pyruvat weiterhin im Symbionten. Morphologische Veränderungen des Symbionten führten zur Gestalt des Mitochondriums. Nach Abschluss dieses umfangreichen Gentransfers benötigte der Eukaryot für seinen Stoffwechsel nun kein H_2 mehr, das zuvor die Ursache für die Entstehung dieser Symbiose gewesen war. Die Gene für die nun nicht mehr benötigten H_2 -abhängigen Stoffwechselwege konnten verloren gehen.

12. Endocytose von Cyanobakterien



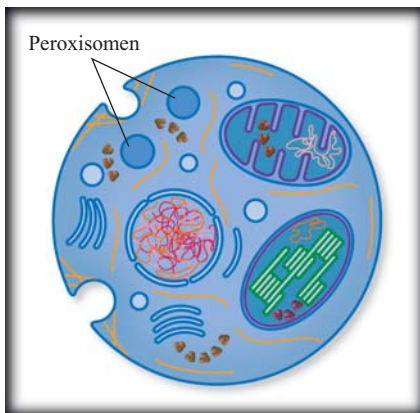
Der Photosyntheseapparat der Cyanobakterien unterscheidet sich deutlich von dem anderer Bakterien: Sie besitzen Chlorophyll a (statt Bacteriochlorophyll), Photosystem I und II (statt nur I) und verwenden als H^+ - und e^- -Quelle H_2O (statt anorganische Schwefel- oder organische Verbindungen); als Abfallprodukt wird O_2 frei. Wie bei anderen photoautotrophen Bakterien auch läuft die Photosynthese an Thylakoiden ab. Diese Merkmale haben Cyanobakterien mit Chloroplasten gemeinsam und werden daher als deren Vorfahren angesehen. Wie bei den α -Proteobakterien waren wohl auch hier ernährungsphysiologische Vorteile die Ursache für eine dauerhafte Endosymbiose.

13. Der Chloroplast



Das Genom der Cyanobakterien schrumpfte auf ein Dreißigstel seiner Ursprungsgröße. Wie auch bei den α -Proteobakterien wurden die Gene in den Nucleus transferiert. Weder die Ursachen noch die Mechanismen dieses Transfers sind genau bekannt. Ein weiteres Rätsel ist, wie und warum das Cyanobakterium den größten Teil seiner Photosynthese-Produkte als Triosephosphate in das Cytoplasma der Wirtszelle abgab; denn nur dadurch konnte der ehemals heterotrophe Eukaryot von seinem Symbionten profitieren. Wie bei den Proteobakterien führten morphologische Veränderungen der inneren Membranen zur Gestalt des heutigen Zellorgans, des Chloroplasten.

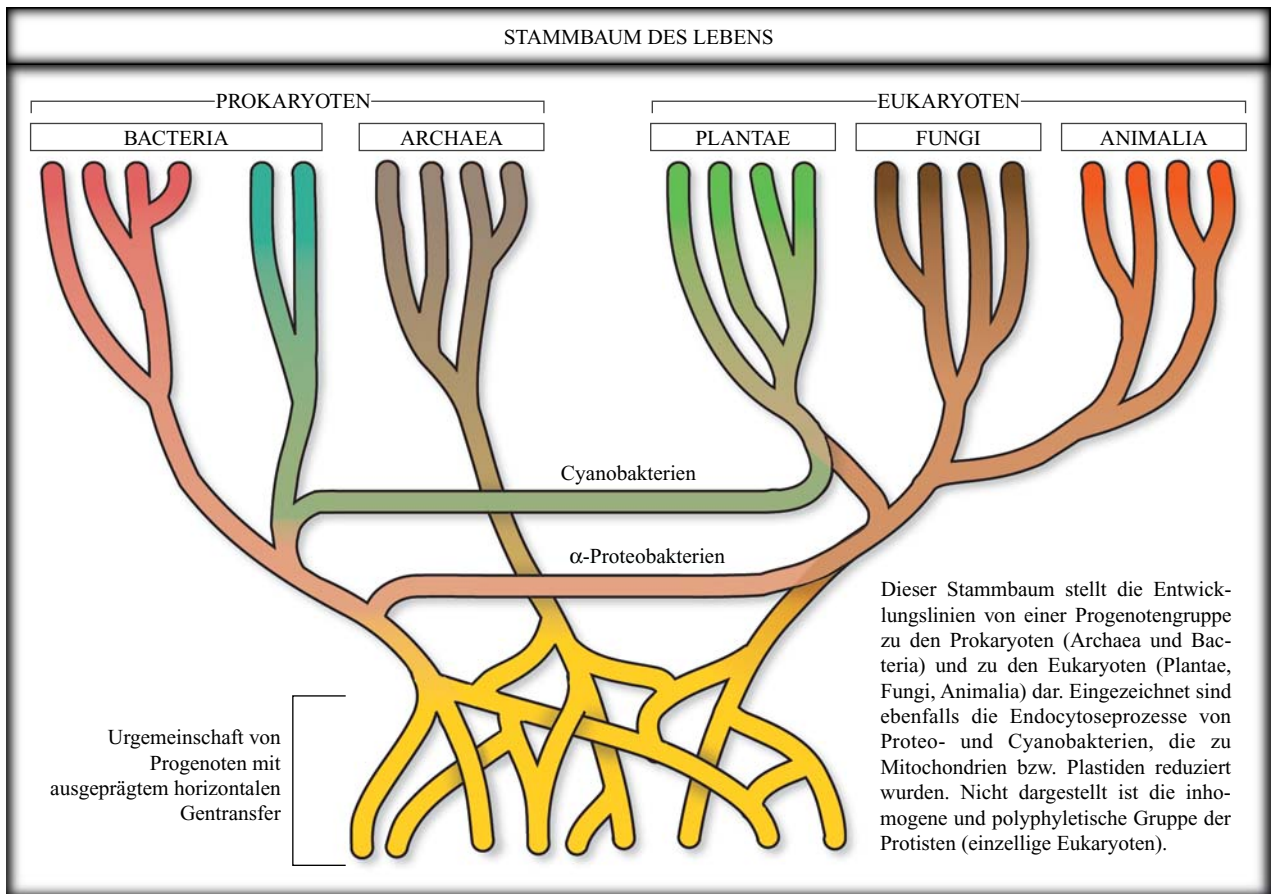
14. Die eukaryotische Zelle



Das Inventar eines typischen Eukaryoten besteht aus dem Golgi-Apparat, dem Endoplasmatischen Reticulum, Cytosomen (wie z.B. Transportvesikel, Lysosomen und Peroxisomen), dem Nucleus, Mitochondrien, Plastiden (nur bei Pflanzen), verschiedenen Cytoskelettbestandteilen und 80S-Ribosomen. Auf Grund des Transfers von Organellen-DNA in den Nucleus werden die Proteine der Organellen im Cytoplasma synthetisiert. Es musste daher ein neuer Verteilungsmechanismus entwickelt werden, damit die Proteine wieder zurück in die Organellen gelangen. Da Peroxisomen auf demselben Wege mit Proteinen bestückt werden, könnten auch sie endosymbiontischen Ursprungs sein.

ZUSAMMENFASSUNG

- Vor ca. 4,6 Milliarden Jahren entstand die Erde. Mit dem einsetzenden Abkühlungsprozess begann die **chemische Evolution**: UV-Strahlung, hohe Temperaturen und elektrische Entladungen (Blitze) führten zur Entstehung erster **organischer Moleküle**.
- Verschiedene Minerale dienten dabei als Katalysator, Gerüst, Behälter und Reaktionspartner.
- Mit der Bildung von Makromolekülen wie Nucleinsäuren (zunächst nur RNAs) und Peptiden entstanden die ersten wechselwirkenden und später auch **selfreplizierenden Systeme**.
- Durch **Kompartimentierung** (Einschluss in fettartige Hüllschichten) wurde die genetische Information direkt selektierbar.
- Verschiedene **Progenoten** entstanden: umhüllte Vorläuferzellen, die über einige grundlegende Stoffwechselreaktionen (wie RNA-Replikation, Translation, Glykolyse, ATP als „Energiewährung“) verfügten.
- Vor ca. 3,7 Milliarden Jahren entwickelten sich aus der Progenoten-Gruppe die Ur-Prokaryoten. Sie besaßen eine feste Zellwand und ein DNA-Genom. Relativ früh spalteten sich die Ur-**Prokaryoten** in die **Archaea** und die **Bacteria** auf.
- Vor ca. 1,4 Milliarden Jahren entstanden die ersten **Eukaryoten**. Wichtige Prozesse waren die Zunahme innerer Membranflächen und die Entstehung von DNA-haltigen Organellen (**Endosymbionten-Theorie**):
- Einige methanogene Archaeobakterien machten einen Umformungsprozess durch: Sie verloren die Zellwand, nahmen an Volumen zu, bildeten ein Cytoskelett aus und entwickelten die **Endocytose**.
- Durch Einschnürungsprozesse der Zellmembran könnten das **Endomembransystem** und der **Nucleus** entstanden sein.
- Eine Symbiose mit H_2 produzierenden **α -Proteobakterien** machte die methanogenen Archaeobakterien unabhängig von externen H_2 -Quellen. Nach umfangreichem Gentransfer und morphologischen Umformungen entwickelten sich aus den Proteobakterien die **Mitochondrien**. Es entstanden heterotrophe Eukaryoten.
- Endocytierte photoautotrophe **Cyanobakterien** wurden ebenfalls nach Gentransfer und morphologischen Umformungen zu Organellen umgewandelt: zu **Plastiden**. Durch diesen Prozess entstanden photosynthetisierende Eukaryoten. Das Zellkern-Genom einer solchen Zelle entstammt also drei verschiedenen Genomen: dem Genom der Archaeobakterien, der heterotrophen Bakterien und der Cyanobakterien.



ZELLVERBÄNDE

Zellen leben selten als isolierte Einzelzellen; sie treten meist in Verbänden auf:

- **Aggregation:** Zusammenlagerung frei lebender Einzelzellen zu vielzelligen Organismen
- **Kolonie:** Sammelbezeichnung für Zellgruppen von auseinander hervorgegangener Einzelzellen
- **Coenobium:** Zellverband von auseinander hervorgegangenen Einzelzellen, die durch eine gemeinsame Gallert-hülle oder eine Zellwand zusammengehalten werden
- **Gewebe:** Verband gleichartig differenzierter Zellen als Baumaterial für Organe

ZELLVERBAND-TYP	PROKARYOTEN	EUKARYOTEN
Einzelzelle.....	<i>Vibrio</i> <i>E. coli</i> <i>Pseudomonas</i>	<i>Trypanosoma</i> <i>Foraminifera</i> <i>Sporozoa</i>
Kolonie.....	<i>E. coli</i> Kokken <i>Proteus</i>	<i>Volvocaceae</i>
Coenobium.....	<i>Streptococcus</i> <i>Sarcina</i> <i>Nostoc</i>	
Aggregation.....		<i>Pediastrum</i> <i>Scenedesmus</i> <i>Dictyostelium</i> (Aggregationsplasmodium)
gewebeähnliche Systeme.....		Porifera (Lager) Basidiomycetes (Mycel) Rhodophyceae (Flechtthallus)
echte Gewebe.....		Plantae (Meristeme, Leitungs-, Festigungsgewebe u.a.) Animalia (Epithel-, Binde-, Muskel-, Nervengewebe u.a.)

Die moderne Systematik hat zum Ziel, ein phylogenetisches System der Organismen zu erstellen, das die stammesgeschichtlichen Verwandtschaftsbeziehungen zum Ausdruck bringen soll. Es gibt bisher keinen einheitlichen theoretischen Ansatz (z.B. lässt das konsequent phylogenetische System von *Hennig* nur monophyletische Taxa zu, die evolutionäre Klassifikation nach *Mayr* berücksichtigt auch den Grad der genetischen Übereinstimmung und lässt somit auch paraphyletische Taxa wie die „Reptilien“ zu). Die folgende Systematik, die hauptsächlich unter Berücksichtigung praktischer Aspekte zusammengestellt wurde, stellt daher nur eine unter vielen Möglichkeiten dar.

ARCHAEA nach Woese (1987), Burggraf (1997) u.a.

prokaryotisch; Zellwand ohne Murein; Glycerinether statt Glycerinester in Biomembran; andere 16S-rRNA; vermutl. kein Monophylum

Gruppe Koarchaeota
Gruppe Crenarchaeota
Gruppe Euryarchaeota
Gruppe Nanoarchaeota

BACTERIA nach Strasburger (1998)

prokaryotisch; wenn Zellwand vorhanden, dann mit Murein; Glycerinester in Biomembran

Abt. Posibacteriota (grampositiv, heterotroph)
Abt. Negobacteriota (gramnegativ, heterotroph)
Abt. Cyanobacteriota (autotroph)
Abt. Prochlorophyta (autotroph)

PLANTAE nach South & Whittick (1987), Bresinsky (1991) u.a.

eukaryotisch; primär photoautotroph; Zellwände mit Cellulose; einige Taxa stellen kein Monophylum dar (*)

Organisationsstufe Eukaryotische Algen*

Abt. Euglenophyta
Abt. Cryptophyta
Abt. Dinophyta (= Pyrrophyceae)
Abt. Haptophyta (= Prymnesiophyta), Kalkalgen
Abt. Chrysophyta (= Heterokontophyta), Goldalgen
Abt. Rhodophyta, Rotalgen (stark isolierte Stellung)
Abt. Chlorophyta*, Grünalgen

Organisationsstufe Embryophyten

Embryo von Mutterpflanze ernährt; echte Gewebe; Cuticula; Spaltöffnungen; Leitbündel; heteromorpher Generationswechsel

Abt. Bryophyta*, Moose

Kl. Anthocerotae, Hornmoose

Kl. Marchantiatae, Lebermoose

Kl. Bryatae = Musci, Laubmoose

Organisationsstufe Tracheophyten

echte Leitbündel; Epidermis

Abt. Pteridophyta*, Farne

Abt. Spermatophyta, Blütenpflanzen

Gametophytengeneration nicht selbständig lebensfähig

Gymnospermen(*), Nacktsamer

(einfache Samenanlagenträger)

U.Abt. Coniferophytina (gabel-, nadelblättrig)

U.Abt. Cycadophytina (fiederblättrig)

Angiospermen, Bedecktsamer

(Samenanlagen in Fruchtknoten)

Kl. Dicotyledoneae, Zweikeimblättrige

Kl. Monocotyledoneae, Einkeimblättrige

FUNGI nach Strasburger (1991) und Bresinsky (1983)

eukaryotisch; heterotroph; meist mit Zellwand aus Cellulose, Chitin u.a. Substanzen; einige Taxa stellen kein Monophylum dar (*)

Organisationstyp Schleimpilze*

pilzförmige Protisten mit Plasmodien

Abt. Acrasiomycota, zelluläre Schleimpilze

Abt. Myxomycota, echte Schleimpilze

Abt. Plasmodiophoromycota, parasitische Schleimpilze

Organisationstyp Pilze

i.d.R. mit Zellwänden; häufig Hyphenbildung (Gesamtheit = Mycel)

Abt. Oomycota

Abt. Eumycota

Fungi imperfecti (= Deuteromycetes)

künstliche Gruppe; nur vegetativer Vermehrungszyklus bekannt

ANIMALIA nach Grell (1980), Hennig (1986), Ax (1989) u.a.

eukaryotisch; heterotroph, phagotroph; i.d.R. ohne Zellwand

Unterreich Protozoa Polyphylum; alle einzelligen Tiere

St. Zooflagellata (mit 1 bis mehreren Flagellen)

St. Rhizopoda (Wurzelfüßer, mit Pseudopodien)

St. Sporozoa (Endoparasiten mit Sporenbildung)

St. Ciliata (Kerndualismus; Konjugation; Cilien)

Unterreich Metazoa Vielzeller; echte Gewebe; Blastulabildung

St. Mesozoa

St. Porifera, Schwämme

St. Placozoa

St. Cnidaria, Nesseltiere

St. Ctenophora, Rippenquallen

St. Nematelminthes, Rundwürmer und Rädertierchen

St. Gnathostomulida, Kiefernmdchen

St. Plathelminthes, Plattwürmer

St. Nemertini, Schnurwürmer

St. Kamptozoa, Kelchwürmer

St. Mollusca, Weichtiere

St. Sipunculida, Spritzwürmer

St. Echiurida, Igelwürmer

St. Annelida, Ringelwürmer

St. Pogonophora, Bartwürmer

St. Onychophora, Stummelfüßer

St. Tardigrada, Bärtierchen

St. Pentastomida, Zungenwürmer

St. Euarthropoda, echte Gliederfüßer

St. Tentaculata, Kranzföhler

St. Chaetognatha, Pfeilwürmer

St. Echinodermata, Stachelhäuter

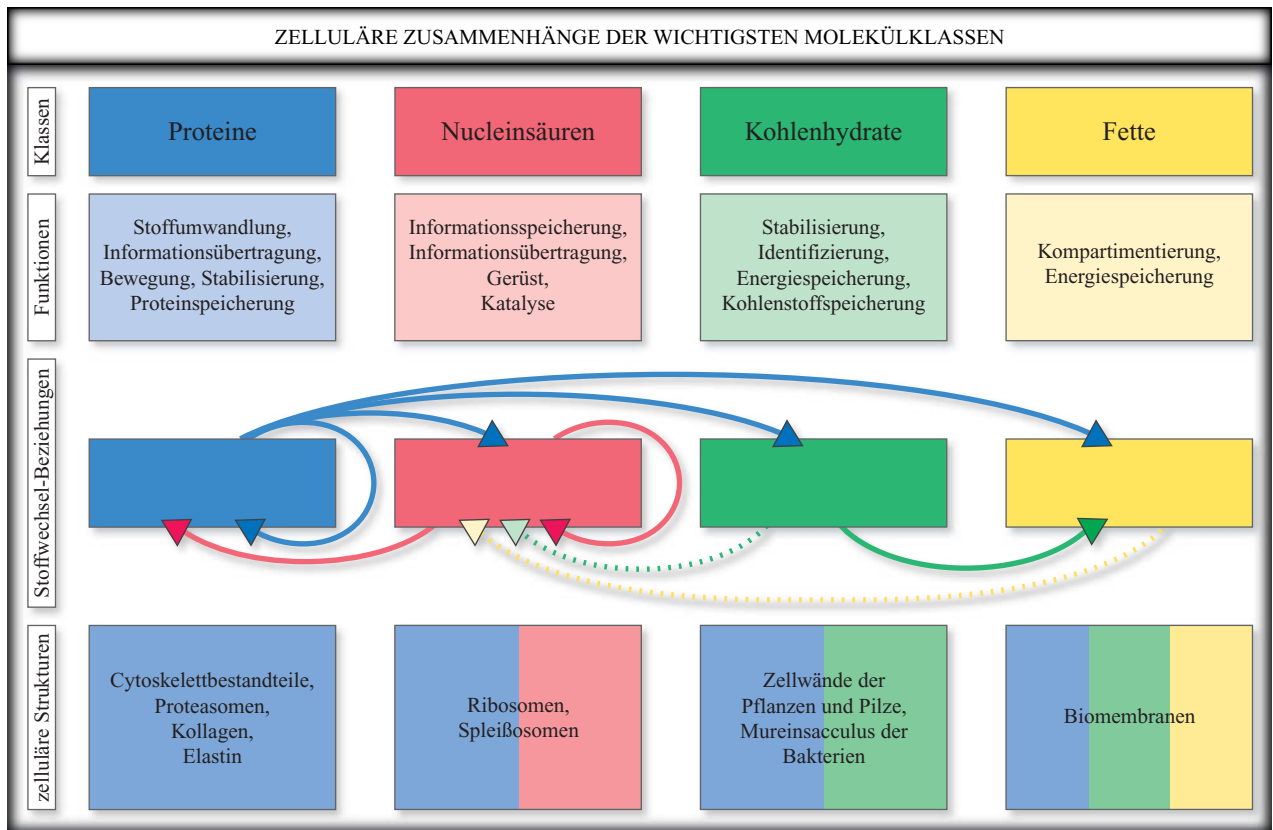
St. Chordata

U.St. Tunicata, Manteltiere

U.St. Acrania, Schädellose

U.St. Craniota (= Vertebrata), Wirbeltiere

= Arthropoda



PROTEINE

Als Enzyme können Proteine alle anderen Moleküle verändern (auch andere Proteine), als Hormone dienen sie dem Informationstransport, als ATPasen wie Dynein oder Myosin sind sie Bestandteil verschiedener Bewegungselemente und als Carrier in Membranen können sie einzelne Moleküle von einem Kompartiment in ein anderes transportieren. Außerdem dienen sie als externes und internes Gerüst der zellulären Stabilisierung und Fixierung. Durch ihrer Vielgestaltigkeit treten Proteine in sehr vielen zellulären Strukturen auf und definieren somit deren Spezifität, wie z.B. in den Biomembranen.

NUCLEINSÄUREN

Die Hauptfunktionen der Nucleinsäuren sind als DNA die Langzeit-Informationsspeicherung für Proteinbauanleitungen und als RNA die Informationsübertragung und -umsetzung. Außerdem fungieren sie z.B. in Form von rRNAs als Gerüst für ribosomale Proteine. Katalytisch können Nucleinsäuren u.a. in Ribosomen und Spleißosomen wirken; sie sind also an mehreren Teilprozessen ihrer eigenen Synthese beteiligt.

KOHLLENHYDRATE

Cellulose dient als Bestandteil von Zellwänden der Stabilisierung; Amylose, Amylopektin und Glykogen sind

Energiespeicherformen der Glucose und viele Organismen wandeln einen Kohlenhydrat-Überschuss in Speicherfette um. Im Laufe des Abbaus dieser hochpolymeren Moleküle wird ATP gebildet, das außerdem Baustein der Nucleinsäuren ist (gestrichelte Linie). In Form verschiedener Oligosaccharide auf den Membranaußenflächen (als sog. Glykokalyx) geben sie den Zellen eine für andere Zellen erkennbare Identität.

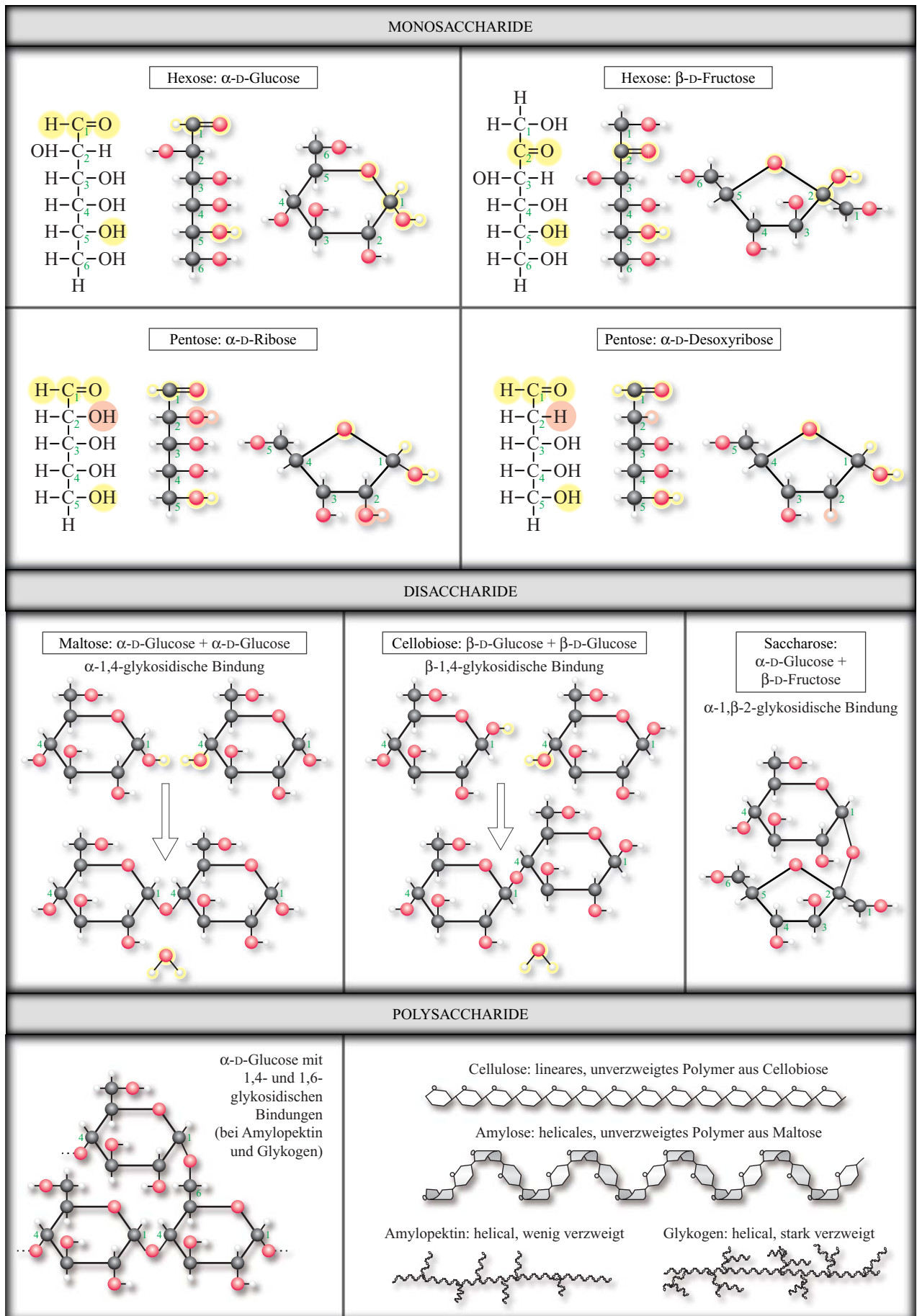
FETTE

In Form von Phospholipiden sind Fette Bestandteile aller Biomembranen und bewirken eine Kompartimentierung des Zellinhaltes. Als Fett-Tröpfchen sind sie ein idealer Energiespeicher. Bei der Oxidation der Fettsäuren wird, wie beim Abbau von Kohlenhydraten, ATP als universeller Energieträger gebildet (gestrichelte Linie).

UNIVERSALIEN

Viele grundlegende Stoffwechselwege (wie DNA- und RNA-Synthese, Proteinsynthese, Glykolyse, Fettsäureoxidation, Citrat-Cyclus u.a.), viele Strukturen (wie Biomembran, Ribosomen) und viele Funktionen (DNA als Informationsspeicher, Kohlenhydrate und Fette als Energiespeicher, ATP als Energiewährung u.a.) deuten auf einen gemeinsamen Ursprung allen Lebens.

Allgemein gilt: Die Struktur determiniert die Funktion!



DEFINITION

Kohlenhydrate bestehen aus oder sind Polyhydroxyaldehyde oder -ketone. Die Summenformel dieser Molekülklasse ist i.d.R. $(\text{CH}_2\text{O})_n$ mit $n \geq 3$.

FUNKTIONEN

als Strukturelement:

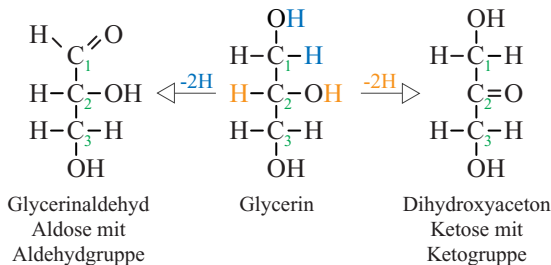
- Bausubstanz für Zellen und Gewebe (z.B. als Zellwandbestandteil)

als Funktionselement:

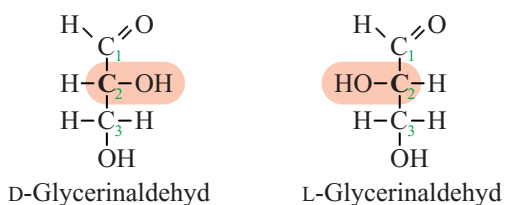
- Energiequelle
- Kohlenstoffquelle für Synthese anderer Moleküle

ALLGEMEINES

Monosaccharide (Einfachzucker) stellen Oxidationsprodukte mehrwertiger Alkohole dar, die **Ketosen** oder **Aldosen** genannt werden, z.B. Oxidation von Glycerin:



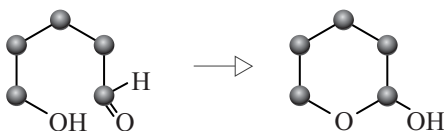
Auf Grund des asymmetrischen C-Atoms (= C-Atom mit vier verschiedenen Substituenten) beim Glycerinaldehyd treten 2 Enantiomeren (= Spiegelbildisomere) mit entgegengesetzten Drehwerten auf:



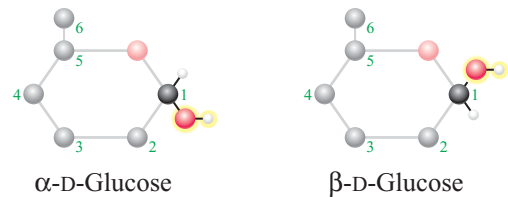
Die **D,L-Nomenklatur** bezieht sich prinzipiell auf die Konfiguration desjenigen asymmetrischen C-Atoms, das am weitesten von der Carbonylgruppe entfernt ist.

MONOSACCHARIDE

Einfachzucker werden nach der Anzahl ihrer C-Atome klassifiziert: Triosen (3), Tetrosen (4), Pentosen (5), Hexosen (6), Heptosen (7). Zucker mit mindestens 5 C-Atomen können sich durch innermolekulare Reaktion der Carbonyl- und Hydroxylgruppe zu einem Ring schließen (Halbacetalbildung):



Die dabei neu gebildete OH-Gruppe am C₁-Atom kann zwei verschiedene Positionen einnehmen, die mit α und β bezeichnet werden:



Die in der Natur am häufigsten vorkommenden Monosaccharide sind die Hexosen D-Glucose (Traubenzucker) und D-Fructose (Fruchtzucker). Die wichtigsten Pentosen sind D-Ribose und D-Desoxyribose als Bestandteile von DNA und RNA.

OLIGOSACCHARIDE

OH-Gruppen zweier verschiedener Monosaccharide können unter Wasserabspaltung eine Etherbindung eingehen, die **glykosidische Bindung** genannt wird. In die Bezeichnung einer solchen Bindung gehen sowohl die Nummern der C-Atome ein, die die beteiligten OH-Gruppen tragen, als auch die α - oder β -Stellung dieser OH-Gruppen. Ist das Polymerisierungsprodukt nicht mehr als 10 Monomere lang, spricht man von Oligosacchariden. Als äußerer Zellbesatz spielen sie eine wesentliche Rolle bei der Zellerkennung.

Die in der Natur am häufigsten auftretenden Oligosaccharide sind folgende Disaccharide:

- Maltose (α -1,4-glykosidische Bindung zweier α -D-Glucosen)
- Cellobiose (β -1,4-glykosidische Bindung zweier β -D-Glucosen)
- Lactose (1,4-glykosidische Bindung von β -D-Galactose und α -D-Glucose)
- Saccharose (1,2-glykosidische Bindung von α -D-Glucose und β -D-Fructose).

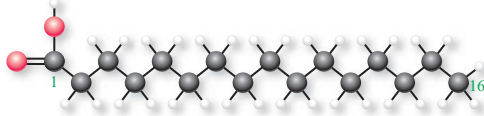
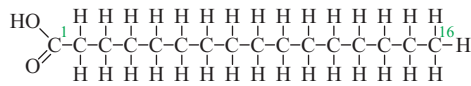
POLYSACCHARIDE

Die wichtigsten Polysaccharide sind Cellulose und Stärke, die beide aus Glucoseeinheiten bestehen.

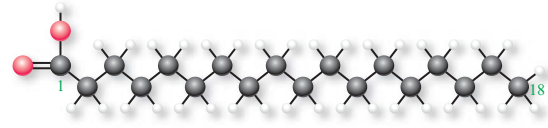
Cellulose besteht aus 500 bis 5.000 β -D-Glucose-Einheiten (β -1,4-glykosidische Bindungen). **Stärke** ist ein Gemisch aus Amylose und Amylopektin. **Amylose** besteht aus 100 bis 1.400 α -D-Glucose-Einheiten (α -1,4-glykosidische Bindungen). **Amylopektin** besitzt neben den glykosidischen 1,4- auch 1,6-Bindungen, wodurch ein verzweigtes Makromolekül entsteht (die Verzweigungsäste sind ca. 12 Moleküle lang). **Glykogen**, die Kohlenhydrat-Speicherform von Tieren und Pilzen, ist ebenso aufgebaut wie Amylopektin, jedoch noch reicher verzweigt (an ca. jedem 10. Molekül).

Die Polymerisation von α -D-Glucose ergibt eine helicale Struktur. Einlagerung von Iodatomen führt zur typischen blau-violetten Färbung (Iod-Stärke-Reaktion).

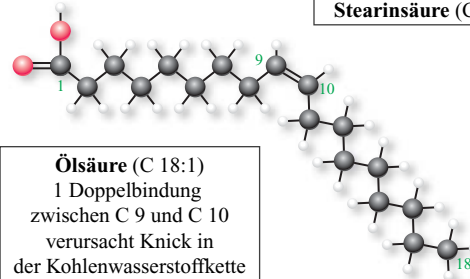
FETTSÄUREN



3 Darstellungsformen der **Palmitinsäure** (C 16:0)
erste Zahl = Anzahl der C-Atome
zweite Zahl = Anzahl der Doppelbindungen

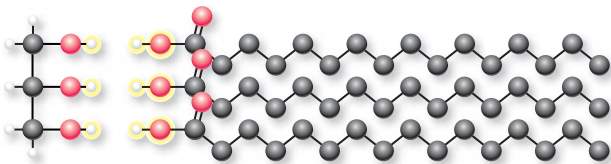


Stearinsäure (C 18:0)

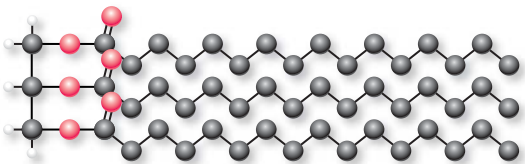


Ölsäure (C 18:1)
 1 Doppelbindung
 zwischen C 9 und C 10
 verursacht Knick in
 der Kohlenwasserstoffkette

GLYCERINESTER (NEUTRALFETT)

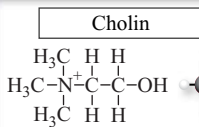


Glycerin + 3 Fettsäuren

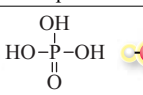


Triacylglycerin + 3 H₂O

PHOSPHOLIPID

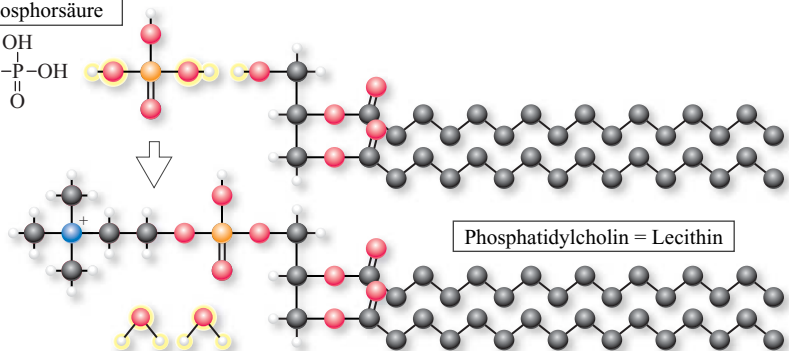


Phosphorsäure



2 Fettsäuren (hier Palmitinsäure)
 + Glycerin
 + Phosphorsäure
 + Alkohol (hier Cholin)

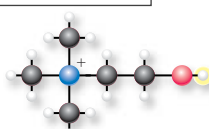
Phospholipid (hier Lecithin)
 + 4 H₂O



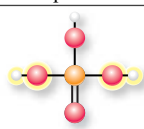
Phosphatidylcholin = Lecithin

SPHINGOLIPID

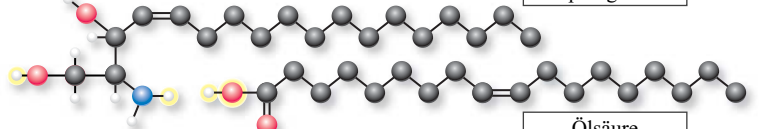
Cholin



Phosphorsäure



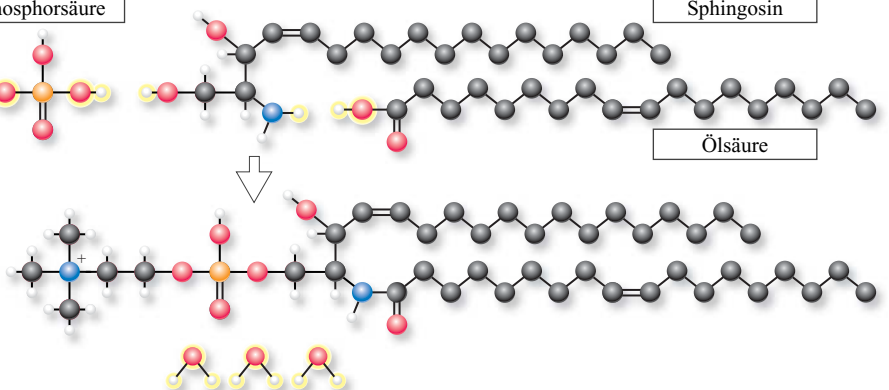
Sphingosin



Ölsäure

Sphingosin
 + Fettsäure (hier Ölsäure)
 + Phosphorsäure
 + Alkohol (hier Cholin)

Sphingolipid (hier Sphingomyelin)
 + 3 H₂O



DEFINITION

Fette sind Veresterungsprodukte aus Glycerin und langkettigen Carbonsäuren (= Fettsäuren). Man unterscheidet zwischen Neutralfetten und Phospholipiden: Neutralfette sind Ester von Glycerin und 3 Fettsäuren; sie sind ungeladene und hydrophobe Moleküle. Phospholipide sind Ester von Glycerin, 2 Fettsäuren und Phosphorsäure, tragen also eine Nettoladung und sind amphipathische Moleküle.

FUNKTIONEN

als Strukturelement:

- Phospholipide sind Hauptbestandteil aller Biomembranen.

als Funktionselement:

- Neutralfette sind Bestandteil der Fettdepots (Energiespeicher, Isolation, Polsterung) in pflanzlichen und tierischen Zellen.

ALLGEMEINES

Die Gruppenbezeichnung für alle hydrophoben, großen Kohlenwasserstoffe lautet **Lipide**. Sie werden unterteilt in Neutralfette, Phospholipide, Glykolipide, Sphingolipide (mit Cerebrosiden), Steroide und Terpene. Die beiden letzten Gruppen enthalten keine Fettsäuren und werden in diesem Abschnitt nicht behandelt.

FETTSÄUREN

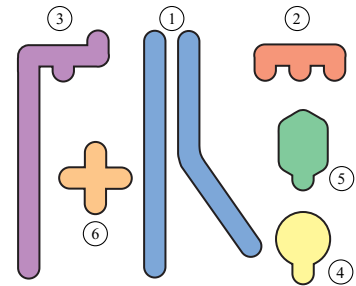
Hauptbestandteil aller Fette und der meisten Lipide sind die Fettsäuren, langkettige Kohlenwasserstoffe mit einer terminalen Carboxylgruppe. Natürlich vorkommende Fettsäuren besitzen eine gerade Anzahl von C-Atomen und haben eine Länge von 14 bis 22 C-Atomen. Am häufigsten sind Kettenlängen von 16 und 18 C-Atomen. Gesättigte Fettsäuren besitzen keine, ungesättigte Fettsäuren, die häufiger vorkommen, tragen eine oder mehrere **Doppelbindungen**; die erste liegt häufig zwischen C₉ und C₁₀, alle weiteren zwischen dieser und dem Methylterminus, wobei sie niemals konjugiert auftreten. Jede Doppelbindung verursacht einen Knick von ca. 30° in der Kohlenwasserstoffkette. Gesättigte Fettsäuren haben eine wachsähnliche Konsistenz, ungesättigte sind bei Zimmertemperatur ölige Flüssigkeiten. Bestimmte ungesättigten Fettsäuren sind für den Menschen essentiell.

Beispiele einiger Fettsäuren:

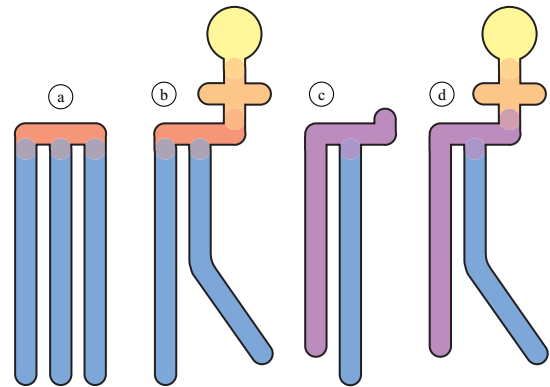
- C 16:0 Palmitinsäure (16 C-Atome, gesättigt)
- C 16:1 Palmitoleinsäure (16 C, eine Doppelbindung)
- C 18:0 Stearinsäure (18 C, gesättigt)
- C 18:1 Ölsäure (18 C, eine Doppelbindung)
- C 18:2 Linolsäure (18 C, zwei Doppelbindungen)
- C 18:3 Linolensäure (18 C, drei Doppelbindungen)
- C 20:4 Arachidonsäure (20 C, vier Doppelbindungen)

BAU-ELEMENTE

- 1) Fettsäuren
li gesättigt
re ungesättigt
- 2) Glycerin
- 3) Sphingosin
- 4) Alkohol
- 5) Zucker
- 6) Phosphorsäure

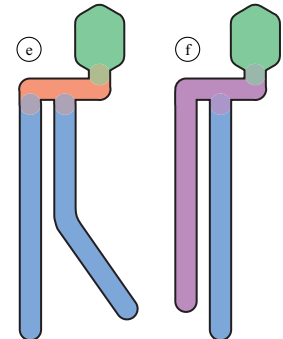


LIPIDE

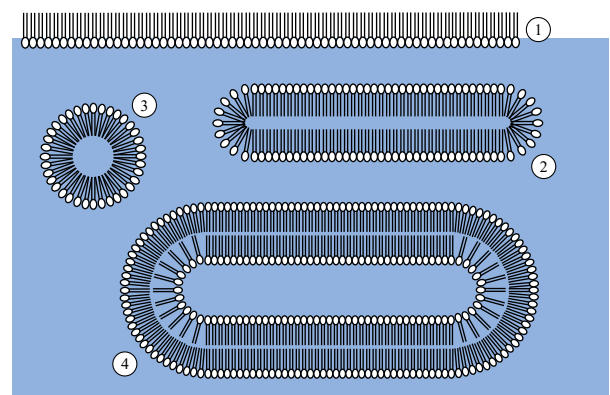


- a) Neutralfett
- b) Phospholipid*
- c) Ceramid
- d) Sphingolipid*
- e) Glyceringlykolipid*
- f) Cerebrosid*

* Membranbestandteile

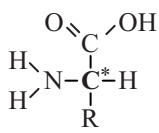


Auf Grund ihres amphipathischen Charakters (hydrophiler „Kopf“ und hydrophober „Schwanz“) bilden Phospholipide in Wasser spontan Grenzschichten aus, als einschichtigen Oberflächenfilm (1), Monolayer (2), Micellen (3) oder als Doppelschichten = Bilayer (4).

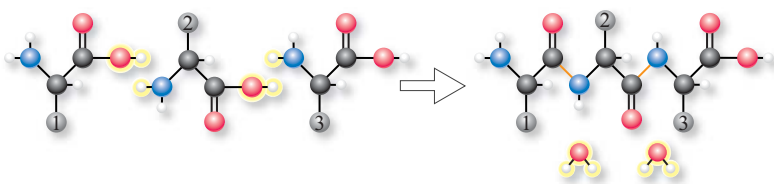


PEPTIDBINDUNG und PRIMÄRSTRUKTUR

allgemeine Schreibform einer L-Aminosäure
 α -C-Atom*; R = Rest (o. Seitenkette)

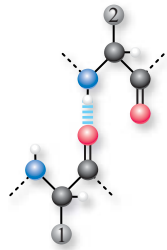


3 Aminosäuren $\Rightarrow$ Tripeptid + 2 H₂O
 Peptidbindung

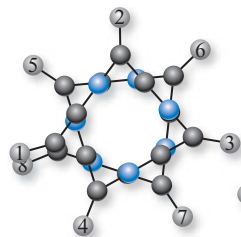


WASSERSTOFFBRÜCKEN und SEKUNDÄRSTRUKTUR

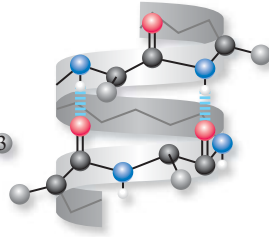
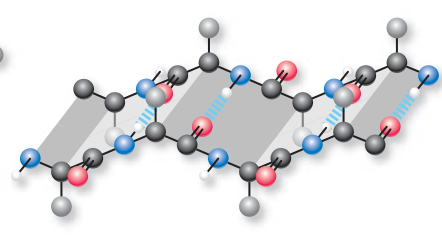
Wasserstoffbrücken

 α -Helix

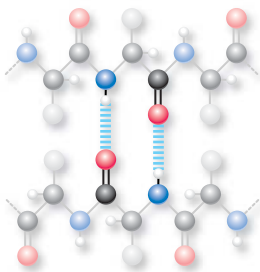
von oben



seitlich

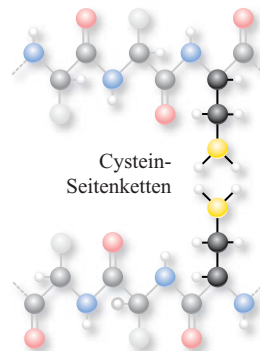
 β -Faltblatt

SEITENKETTEN und TERTIÄRSTRUKTUR

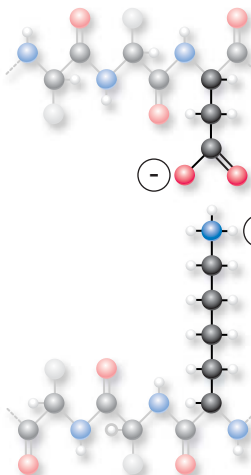


li
Wasserstoffbrückenbindung
 zwischen Amino- und
 Carboxylgruppe aller
 Aminosäuren möglich

re
Schwefelbrücke zwischen
 zwei Cystein-Resten



Cystein-Seitenketten

Asparaginsäure- und
Lysin-Seitenketten

li
Ionenbindung zwischen
 Kation (Aminogruppe) und
 Anion (Carboxylgruppe) kann
 zu **Peptidbindung** führen

re
hydrophobe Wechselwirkung
 tritt auf bei unpolaren
 Seitengruppen, die sich
 in die Proteinmitte drehen

Seitenketten
von Leucin
und Alanin

DEFINITION

Proteine sind Polymere der Aminosäuren (= Aminocarbonsäuren). Proteinogene Aminosäuren sind L-Aminosäuren, die am α -C-Atom eine Amino-, eine Carboxylgruppe und eine für jede Aminosäure typische Seitenkette besitzen.

FUNKTIONEN

als Strukturelement:

- Festigung und Stabilisierung, z.B. als Cytoskelettelemente, Keratin-, Collagen- und Elastinfasern

als Funktionselement:

- Stoffumwandlung (als Enzyme)
- Informationsübertragung (als Hormone und Neuropeptide)
- Mobilisierung (z.B. als Myosin, Dynein, Actin)
- Transport (z.B. als Hämoglobin, Membrankanäle)
- Schutz (z.B. als Antikörper, Thrombin, Toxine, Antibiotika)
- Aminosäurespeicher (z.B. als Ovalbumin)

ALLGEMEINES

1. Aminosäuren

Wie bei den Kohlenhydraten existieren auch bei den Aminosäuren auf Grund des asymmetrischen C-Atoms (hier des α -C-Atoms) stereoisomere **D- und L-Konfigurationen**. Alle in Proteinen vorkommenden (proteinogene) Aminosäuren gehören dem L-Typen an.

Insgesamt konnten bisher über 260 verschiedene Aminosäuren identifiziert werden, doch kommen - bis auf ganz wenige Ausnahmen - in Proteinen nur 20 verschiedene Aminosäuren vor, von denen 9 für den Menschen **essentiell** sind, d.h. sie können vom Organismus nicht selbst synthetisiert werden.

Anhand der verschiedenen Seitenketten werden die 20 Aminosäuren in vier Gruppen eingeteilt: hydrophobe (unpolare), hydrophile (polare, ungeladene), basische (positiv geladene) und saure (negativ geladene Seitenketten) Aminosäuren.

2. Proteine

Auf Grund der Vielzahl der Aminosäure-Kombinationsmöglichkeiten (z.B. bei Tripeptid $20^3 = 8.000!$ verschiedene Kombinationsmöglichkeiten) stellen die Proteine die vielfältigste und am häufigsten vorkommende Klasse dar ($\geq 50\%$ TM einer Zelle).

Oligopeptide bestehen aus bis zu 10, **Polypeptide** sind Ketten mit mehr als 10 Aminosäuren.

Proteine können unterteilt werden in globuläre (wasserlöslich, sphärisch, mit mobiler oder dynamischer Funktion) und fibrilläre (wasserunlöslich, faserförmig, mit stabilisierender Funktion) Proteine. Als Proteide wird die Gruppe von Proteinen bezeichnet, die einen Nicht-Proteinanteil enthält (wie z.B. Glyko-, Phospho-, Lipo-, Metalloproteine).

PRIMÄRSTRUKTUR

Die lineare Abfolge der Aminosäuren stellt die Primärstruktur dar. Die Synthese einer Aminosäurekette weist deutliche Unterschiede zur Synthese anderer Stoffklassen auf: Die genaue Reihenfolge der Aminosäuren wird durch die Triplet-Codierung der Gene festgelegt und die Synthese der Aminosäureketten findet an Multienzymkomplexen (den Ribosomen) in einem ununterbrochenen Prozess statt, den man Translation nennt. Diese Synthese erfolgt vom Amino- zum Carboxylterminus.

SEKUNDÄRSTRUKTUR

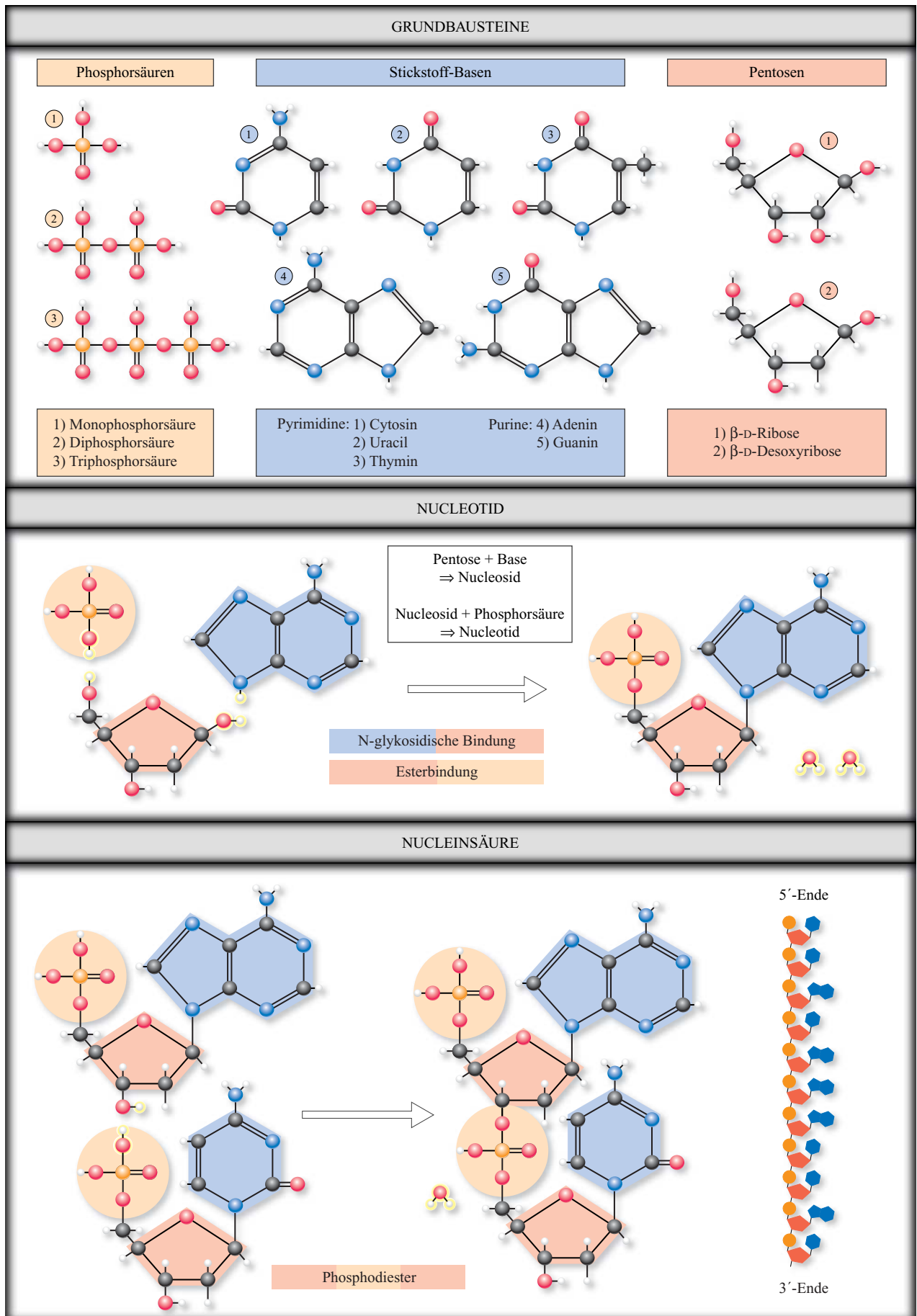
Die Sekundärstruktur beschreibt die geometrische Anordnung der Aminosäuren entlang einer Achse. Sie entsteht durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Amino- und Carboxylgruppen noch während der Translation. Abhängig von den Seitenketten der Aminosäuren können Helices oder Faltblattstrukturen entstehen. Bei **α -Helices** zeigen alle Seitenketten nach außen und die Brückenbindungen entstehen zwischen übereinanderliegenden Aminosäuren. Bei **β -Faltblattstrukturen** zeigen die Seitenreste nach oben und unten und die Brückenbindungen entstehen zwischen den sich gegenüberliegenden Aminosäuren. Innerhalb einer Polypeptidkette treten meist beide Konformationen auf; Helices sind jedoch häufiger.

TERTIÄRSTRUKTUR

Durch Wechselwirkungen von Aminosäure-Seitenketten, die innerhalb der Polypeptidkette weit voneinander entfernt liegen, entstehen Schlaufen und Falten, wodurch die Peptidkette eine typische dreidimensionale Form bekommt. Die räumliche Struktur zusammen mit dem Verteilungsmuster der elektrostatischen Ladungen bestimmt letztlich die Funktion des Proteins. Folgende Bindungstypen können die Seitenketten eingehen: kovalente Bindungen (= Atombindungen wie Peptidbindung oder Schwefelbrücken), elektrostatische Wechselwirkungen (wie Ionen- und Wasserstoffbrückenbindungen) und Van-der-Waals-Wechselwirkungen (wie hydrophobe Wechselwirkungen). Hydrophile Seitenketten drehen sich zur Protein-Außenseite, hydrophobe Seitenketten zur Proteinmitte.

QUARTÄRSTRUKTUR

Die Konformation **oligomerer Proteine** (= komplexe Proteine, die aus mehreren Peptidketten bestehen) wird Quartärstruktur genannt. Zwischen den einzelnen Proteinen bestehen keine atomaren Bindungen. Beispiele: Hämoglobin (zwei α - und zwei β -Ketten), einige Hitzeschockproteine (14 o. mehr Untereinheiten), Proteasomen (28 o. mehr Untereinheiten).



DEFINITION

Nucleinsäuren sind hochpolymere, unverzweigte Moleküle aus Nucleotiden. Man unterscheidet DNA (Desoxyribonucleinsäure) und RNA (Ribonucleinsäure). In der Regel liegt DNA als Doppelstrang, RNA als Einzelstrang vor.

FUNKTIONEN

als Strukturelement:

- Baugerüst für Proteine (RNAs), z.B. in Ribosomen und Spleißosomen

als Funktionselement:

- „Energietransport“ (Nucleotide), z.B. als ATP und GTP
- Informationsspeicherung (i.d.R. DNA)
- Informationstransport (mRNAs)
- Informationsumsetzung in Aminosäuresequenzen (tRNAs, rRNAs)

NUCLEOTIDE

Nucleinsäuren sind Polymere aus Nucleotiden. Diese bestehen aus drei Komponenten: einer N-haltigen **Base**, einer **Pentose** und einem **Phosphatrest**. Bei den Basen handelt es sich um die Purine Adenin und Guanin und die Pyrimidine Cytosin, Uracil und Thymin. Die Base Uracil kommt nur in RNAs vor, Thymin nur in DNAs. Die Pentosen sind β -D-Desoxyribose oder β -D-Ribose. Ist die Pentose eine Desoxyribose, heißt das Nucleotid Desoxyribonucleotid und das entsprechende Polymer Desoxyribonucleinsäure (oder DNA). Ribosen bilden Ribonucleotide und Ribonucleinsäuren (oder RNAs). Die Base und die Pentose werden N-glykosidisch zu einem Nucleosid verknüpft. Die OH-Gruppe des C₅-Atoms der Pentose wird mit einer Phosphorsäure zu einem Nucleotid verestert. Je nach Größe der Phosphorsäure entstehen Mono-, Di- oder Triphosphate. Triphosphate wie ATP und GTP dienen der Übertragung chemischer Energie.

NUCLEINSÄUREN

Die einzelnen Nucleotide können über Phosphodiester-Bindungen polymerisieren: Der Phosphatrest am C₅-Atom der Pentose reagiert mit der OH-Gruppe des C₃-Atoms eines anderen Nucleotids. Die Polymerisierung der Nucleotide findet durch einen Enzymkomplex statt, der DNA- bzw. RNA-Polymerase. Das Polymerende, dessen Pentose am C₅-Atom eine freie Phosphatgruppe trägt, wird als 5'-Ende bezeichnet, das Ende, dessen Pentose am C₃-Atom eine freie OH-Gruppe trägt, 3'-Ende. Nucleinsäuren „wachsen“ immer am 3'-Ende.

DNA liegt i.d.R. als **Doppelstrang** vor: Zwei komplementäre, gegenläufige Nucleotidstränge werden durch Wasserstoffbrückenbindungen der sich gegenüberliegenden Basen zusammengehalten. Es können sich nur Purin- mit Pyrimidinbasen paaren, und zwar Adenin mit Thymin (nur bei DNA), Adenin mit Uracil (nur bei RNA), Guanin mit Cytosin. Adenin bildet mit Thymin bzw. Uracil zwei Wasserstoffbrücken, Guanin mit Cytosin drei Wasserstoffbrücken. Auf diese Weise entsteht eine rechtsgewundene Doppelhelix, die außen periodisch gebaut ist (alternierend Pentose und Phosphat) und innen durch die Basenfolge aperiodisch.

RNA liegt i.d.R. als **Einzelstrang** vor, einige Viren besitzen jedoch ein Genom aus doppelsträngiger RNA. Auf Grund von Größe, Form und Funktion unterteilt man die RNA-Moleküle in drei Hauptklassen:

- mRNAs (Messenger-RNAs): Genkopien, die ins Cytoplasma transportiert und translatiert werden
- tRNAs (Transfer-RNAs): direkte Vermittlermoleküle zwischen den mRNA-Codons und den einzelnen Aminosäuren
- rRNAs (ribosomale RNAs): zusammen mit assoziierten Proteinen als Ribosom Vermittlung der Paarung von mRNA-Codon/tRNA-Anticodon und Peptidbindung der Aminosäuren.

Kleine RNAs sind Bestandteile von Spleißosomen und anderen sog. Ribonucleoproteinpartikeln.

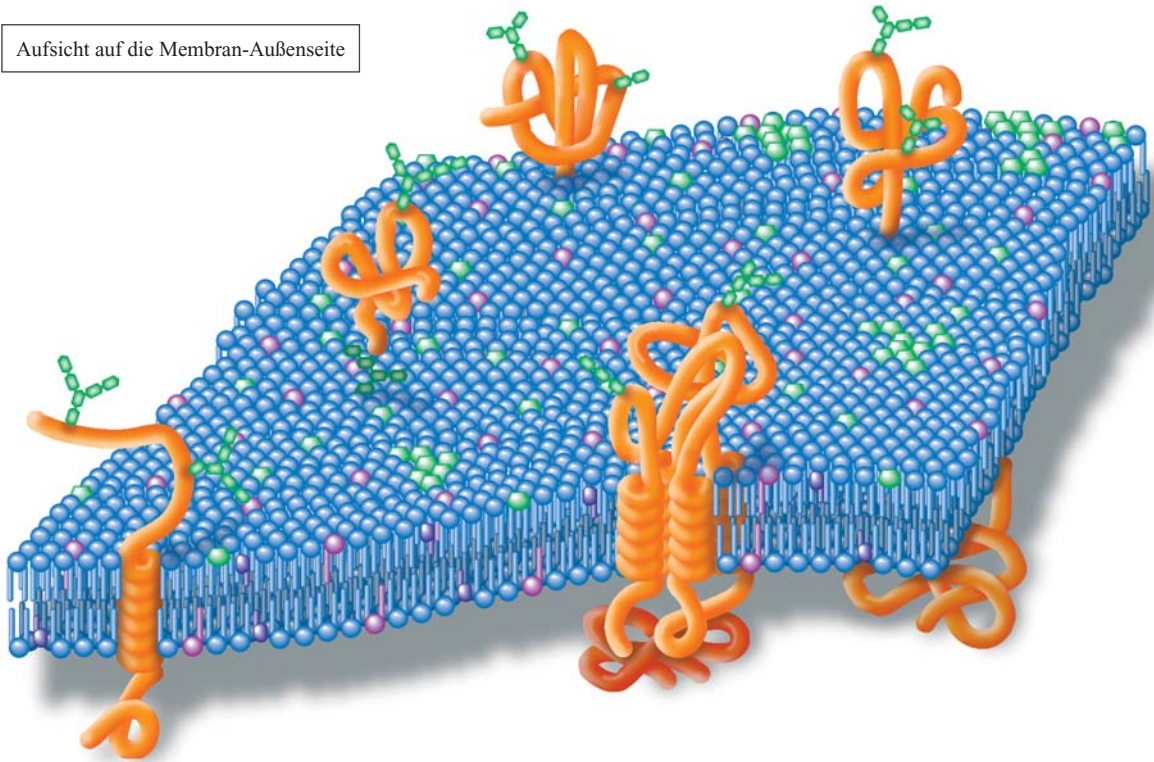
Besonders bei rRNAs und tRNAs können durch intramolekulare Basenpaarungen Schleifen entstehen.

KLASSIFIKATION DER NUCLEOSIDE UND NUCLEOTID-MONOPHOSPHATE

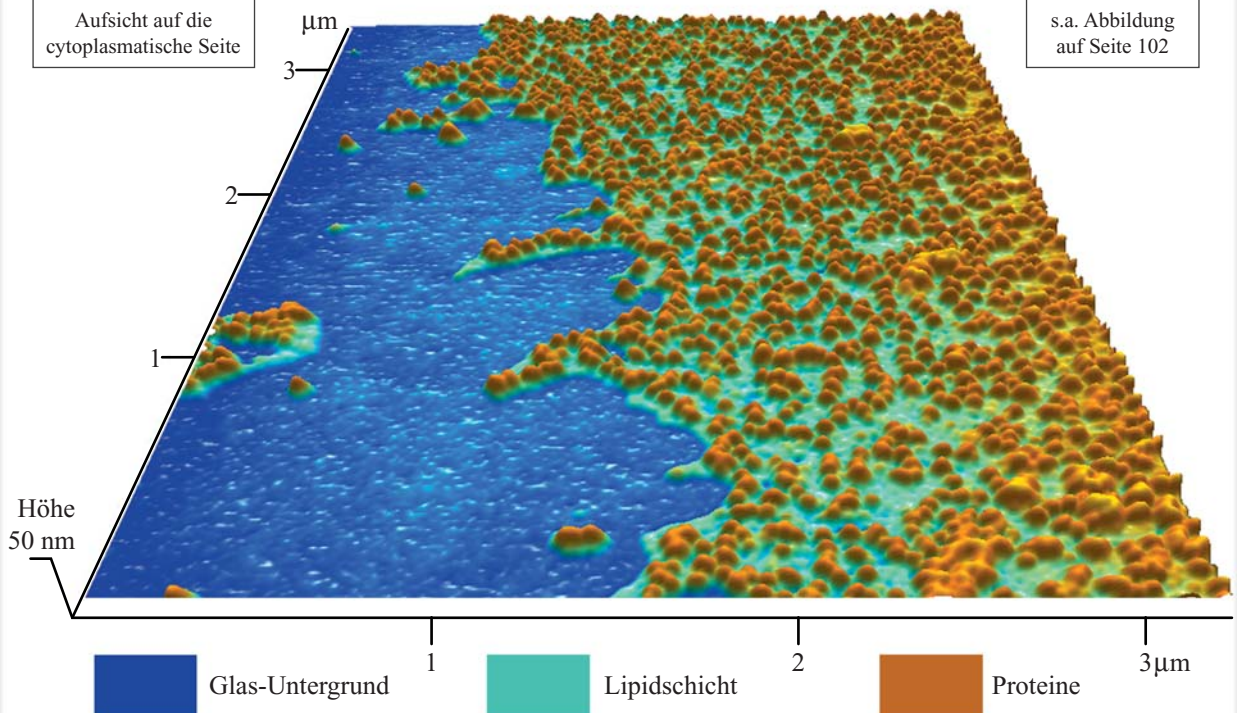
Basen	Nucleoside	Desoxyribonucleotide	Ribonucleotide
PURINE:			
Adenin (A)	Adenosin	2'-Desoxyadenosin-5-Monophosphat (dAMP)	Adenosin-5-Monophosphat (AMP)
Guanin (G)	Guanosin	2'-Desoxyguanosin-5-Monophosphat (dGMP)	Guanosin-5-Monophosphat (GMP)
PYRIMIDINE:			
Thymin (T)	Thymidin	2'-Desoxythymidin-5-Monophosphat (dTMP)	Uridin-5-Monophosphat (UMP)
Uracil (U)	Uridin		
Cytosin (C)	Cytidin	2'-Desoxycytidin-5-Monophosphat (dCMP)	Cytidin-5-Monophosphat (CMP)

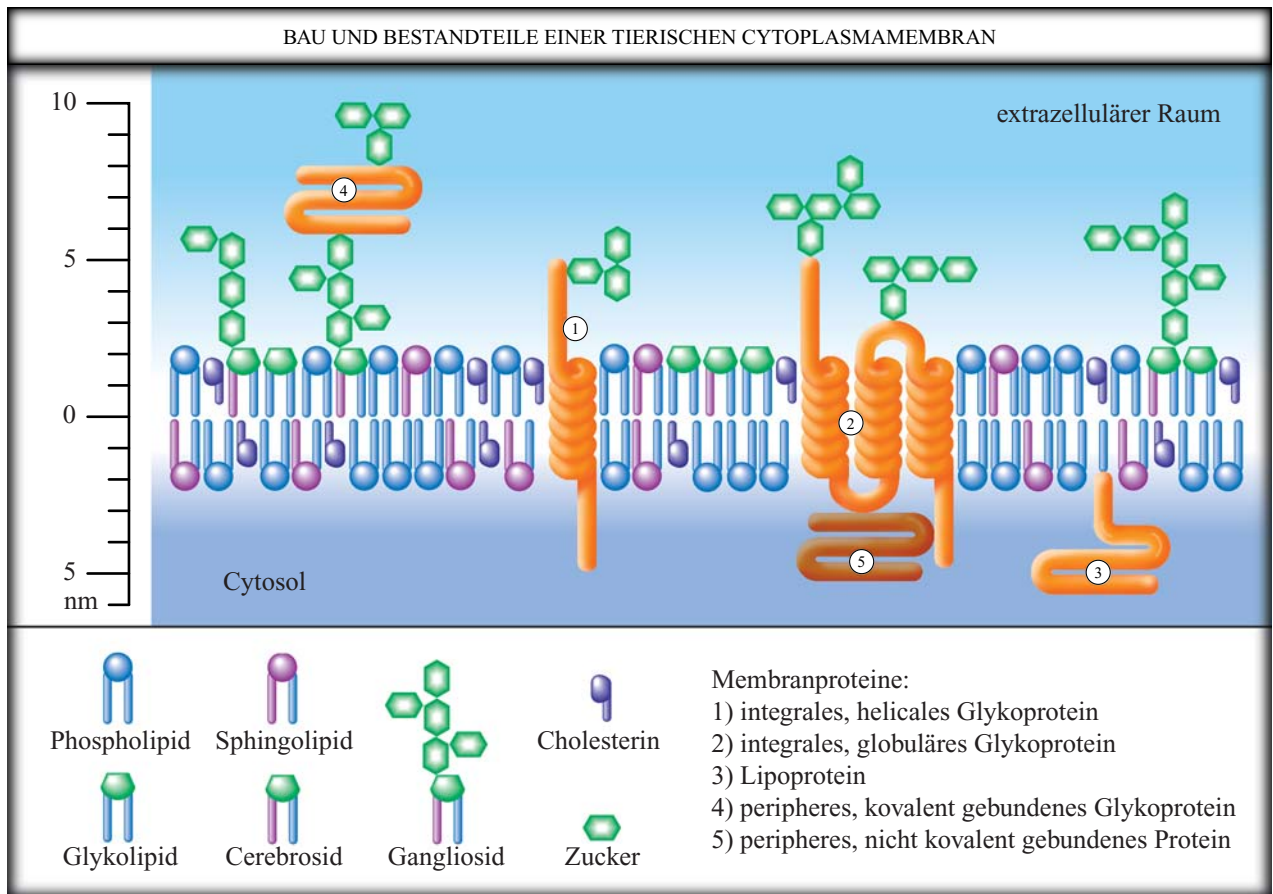
MODELL EINER TYPISCHEN BIOMEMBRAN

Aufsicht auf die Membran-Außenseite



AFM-AUFNAHME EINER BIOMEMBRAN

Aufsicht auf die
cytoplasmatische Seites.a. Abbildung
auf Seite 102

**DEFINITION**

Biomembranen sind geschlossene Lipiddoppelschichten mit integrierten und angelagerten Proteinen, die sowohl die gesamte Zelle als auch alle Kompartimente und Organellen umschließen; alle Biomembranen einer Zelle bilden zusammen ein fließendes System.

VORKOMMEN

Biomembranen kommen als Zellhülle (= Cytoplasmamembran) bei jeder lebenden Zelle vor und als innere Membranen hauptsächlich bei Eukaryoten.

BAU

Fluid-Mosaic-Model nach Singer und Nicolson:

- 4-5 nm dicke Lipiddoppelschicht (mit Proteinen und Glykokalyx ca. 15 nm oder dicker)
- flüssig-kristalline Struktur (zweidimensionale Flüssigkeit)
- asymmetrischer Aufbau
- integrierte, meist lateral frei bewegliche Proteine

BESTANDTEILE

Die Bestandteile der Biomembranen sind art- und zellspezifisch. Prokaryotische Membranen enthalten nur

einen Lipid-Haupttypen, eukaryotische Membranen mehrere Typen. Einige Lipide sind nicht symmetrisch auf die beiden Membranhälften verteilt.

Hauptbestandteile aller Biomembranen sind:

- Phospholipide
- Glykolipide
- Sterine (z.B. Cholesterin; bes. bei Eukaryoten)
- Proteine
- Glykoproteine

In eukaryotischen Membranen kommen außerdem Ceramide (Derivate von Sphingosin + Fettsäure) vor:

- Sphingolipide
- Cerebroside
- Ganglioside

a) Phospholipide und Sphingolipide

1 μm^2 Doppelmembran enthält 5×10^6 Lipidmoleküle. Phospholipide sind Hauptbestandteil aller Biomembranen; Sphingolipide kommen nur in Membranen tierischer Zellen vor. Zur Chemie der Lipide s.a.S. 13.

Typische Lipide sind:

- Phosphatidylethanolamin (= Cephalin, sehr häufig, hauptsächlich auf cytoplasmatischer Seite; 80% der Membranlipide bei *E. coli*)
- Phosphatidylcholin (= Lecithin, auf beiden Seiten)
- Phosphatidylserin (= Cardiolipin, negative Ladung, hauptsächlich auf cytoplasmatischer Seite)
- Sphingomyelin (Sphingolipid, auf beiden Seiten)