

Alle Organismen sind aus Zellen aufgebaut bzw. bestehen aus einer Zelle.

Zelle

- die kleinste lebensfähige Einheit (Elementarorganismus) und zugleich
- das größte vermehrungsfähige System

Zellen können nur durch Teilung oder Verschmelzung aus ihresgleichen entstehen.

Alle Grundfunktionen des Lebens lassen sich auf zellulärem Niveau nachweisen.

- Zellen sind selbstvermehrungsfähig.
- Jede Zelle enthält ein **Genom** (DNA: Träger der genetischen Information für Struktur, Funktion und Selbstreproduktion; Informationsfluß: DNA → RNA → Protein).
- Die genetische Information kann sich sprunghaft ändern (**Mutation**, neben Selektion die Grundlage der **Evolution**).
- Jede Zelle ist von einer Biomembran (**Plasmamembran** = Plasmalemma) umgeben, die als Barriere und zugleich als Vermittler zur Umwelt fungiert.
- Zellen besitzen einen **Stoffwechsel**. Für Aufrechterhaltung und Vermehrung der energetisch labilen Zellstrukturen ist ein ständiger Austausch von Stoffen und Energie mit der Umwelt erforderlich, d. h. Zellen sind **offene Systeme** im Fließgleichgewicht.
- Zellen sind reizbar. Sie können Signale von außen empfangen und auf sie reagieren (**Rezeptoren**).
- Zellen besitzen meist Bewegungsaktivitäten (**Motilitäten**).

Aufgrund des Zellaufbaus werden die rezenten Organismen in zwei große Gruppen eingeteilt:

prokaryote Organismen (Eu- und Archaeobakterien)

- Zellen (Procyten) ohne Zellkern: DNA liegt frei im Cytoplasma
- Zellen mit simpler Innenstruktur

eukaryote Organismen (Pilze, Tiere, Pflanzen)

- Zellen (Eucyten) mit Zellkern (Nucleus): DNA zu Chromosomen organisiert und durch eine doppelte Biomembranhülle gegen das Cytoplasma abgegrenzt
- Zellen mit komplexer Innenstruktur: ausgedehnte innere Membransysteme mit der Plasmamembran nicht direkt verbunden (Kompartimente = membranbegrenzte Reaktionsräume innerhalb einer Zelle)

Eucyte: Zelle eukaryoter Organismen

ihr Zellinhalt (Protoplasma) besteht aus

Nukleus (Zellkern), weiteren
Organellen und
Cytosol (Grundplasma)

Organellen einer typischen Eucyte*

I Organellen ohne Biomembran :

Ribonucleoprotein(RNP)–Partikel (z. B. 80 S Ribosomen)
Cytoskelett (Proteinfilamente z. B. aus Tubulin oder Actin)

II Organellen mit Biomembranen

II a durch zwei Biomembranen vom Cytosol abgegrenzt

Nukleus
Mitochondrien
Plastiden (nur bei pflanzlichen Zellen)

II b durch eine Biomembran vom Cytosol abgegrenzt

Endoplasmatisches Retikulum (ER)
Golgi–Apparat mit Vesikeln
Peroxisomen (Glyoxisomen)
Vakuole (**Lysosomen** bei Tieren), Proteinvakuoelen

II c durch halbe Biomembran vom Cytosol abgegrenzt

Oleosomen (Lipidtröpfchen)

* in vielen Lehrbüchern werden nur die unter II aufgeführten Organellen als solche bezeichnet

Kompartiment

Gesamtheit der Reaktionsräume gleicher Art, die von Membranen umschlossen werden

Kompartimentierungsregel (Schnepf 1965)

Eine Biomembran trennt in der Regel eine plasmatische Phase von einer nicht-plasmatischen Phase. Diese Phasen sind nicht mischbar.

plasmatische Phasen (nur sie enthalten Nucleinsäuren)

- Cytoplasma
- Karyoplasma
- Mitoplasma (Matrix)
- Plastoplasma (Stroma)

nicht-plasmatische Phasen

- extrazellulärer Raum (Apoplast)
- Inhalt von ER, Golgi-Zisternen, -Vesikeln, Peroxisomen, Vakuolen
- Räume zwischen den beiden Hüllmembranen von Plastiden, Mitochondrien, Kernen
- Inhalt der Thylakoide in den Chloroplasten

Um von einer **plasmatischen** Phase in eine andere zu gelangen, müssen also immer zwei Biomembranen und die dazwischen liegende **nicht-plasmatische** Phase passiert werden.

Bei Fusions- und Vesikulationsvorgängen können nur **plasmatische** bzw. **nicht-plasmatische** Phasen sich

mischen oder auseinander hervorgehen.

Ribosomen

Ribonucleoprotein(RNP)–Partikel

	<u>prokaryot</u>	<u>eukaryot</u>
Masse	$2,8 \times 10^6$ (70 S*)	$\sim 4 \times 10^6$ (80 S*)
große UE		
Masse	$1,6 \times 10^6$ (50 S)	$\sim 2,8 \times 10^6$ (60 S)
rRNA	5 S, 23 S	5 S, 28 S, 5,8 S
Proteine	34	~ 49
kleine UE		
Masse	$0,9 \times 10^6$ (30 S)	$1,4 \times 10^6$ (40 S)
rRNA	16 S	18 S
Proteine	21	~ 33

Polysomen

Ribosomen, die an eine mRNA gebunden haben und sie ablesen

*Sedimentationskonstante $k = V(d' - d)/ f$ in Svedberg Einheiten (S) von 10^{-13} sec (V = Partikelvolumen, d' = Dichte des Partikels, d = Dichte des Mediums, f = Reibungsfaktor)

Trotz des unterschiedlichen Aufbaus von Mikrotubuli und Actinfilamenten ergeben sich die folgenden grundsätzlichen Gemeinsamkeiten.

- Beide Filamenttypen sind helikale Aggregate aus globulären Untereinheiten (Actin, Tubulin).
- Die Monomeren beider Filamenttypen binden NTP (Actin ATP, Tubulin GTP) und hydrolysieren NTP zu NDP und Phosphat bei der Aggregation in einer 1:1–Stöchiometrie.
- Beide Filamenttypen besitzen strukturelle Polarität und kinetische Polarität (die Nettoaggregationsrate ist an einem Ende (Plus–Ende) größer als an dem anderen).
- Beide Filamenttypen können zahlreiche Proteine binden und über besondere Proteine mit Membranen in Wechselwirkung treten.

Nucleus, das genetische Steuerzentrum

Die genetische Information ist in linearen DNA-Doppelsträngen gespeichert. Durch ihre Bindung an Histone entstehen die Nucleosomen (Grundpartikel des Chromatins).

Der Zellkern ist der Ort der

- Replikation (DNA-Synthese),
- Transkription (Synthese und Reifung der verschiedenen RNA-Klassen),
- Präribosomen-Bildung.

Die Translation kernkodierter Gene erfolgt dagegen im Cytoplasma. Somit müssen alle im Zellkern lokalisierten Proteine aus dem Cytoplasma importiert und die für die Translation erforderlichen RNAs und RNPs aus dem Zellkern exportiert werden.

Strukturkomponenten des Zellkerns

- Kernhülle (mit ER verbunden) und Porenkomplexe für den bidirektionalen Transport der Makromoleküle
- Karyoplasma mit Kernskelett und Lamina
- Chromatin – das sich bei der Kernteilung in den Chromosomen wiederfindet (einige Strukturproteine ausgenommen), Heterochromatin – kondensiertes Chromatin im Interphasekern, Euchromatin – aufgelockertes Chromatin im Interphasekern
- Nucleolen – kugelförmige, kompakte Körper, Ort der Präribosomen-Bildung, sie entstehen an den den Nucleolus organisierenden Regionen (NOR) der Chromosomen (Gene für rRNA, außer 5S rRNA)

Größen und Längen der Genome von Proto- und Eucyten

Organismus	Größe [Mbp]	Länge [mm]
<i>Mycoplasma genitalium</i>	0,58	0,2
<i>Rickettsia prowazekii</i>	1,11	0,4
<i>Escherichia coli</i>	4,2	1,4
<i>Synechocystis</i> sp.	3,6	1,2
<i>Saccharomyces cerevisiae</i> *	13	4,4
<i>Caenorhabditis elegans</i> *	100	34
<i>Arabidopsis thaliana</i> *	145	49
<i>Drosophila melanogaster</i>	165	56
<i>Oryza sativa</i> *	441	150
<i>Zea mays</i> *	2 504	851
<i>Homo sapiens</i>	3 500	1 200
<i>Triticum aestivum</i> *	15 966	5 428
<i>Tulipa spec.</i> *	30 687	10 434

* haploides Genom (10 bp = 3,4 nm)

Spezifischer Transport durch Biomembranen im Unterschied zur Permeation

- Er erfolgt über Membran-Transportproteine (Translokatoren, Carrier-Protein, Proteinkanäle).
- Er ist in der Regel schneller als Permeation.
- Er ist meist substratspezifisch.
- Er zeigt Sättigungskinetik.
- Er ist meist spezifisch hemmbar.

Nach dem Mechanismus unterscheidet man zwei Typen:

katalysierte Diffusion (Permeation)

Sie erfolgt entlang eines Konzentrationsgefälles (passiver Transport). Wie die Permeation kann auch die katalysierte Diffusion nur zu einem Konzentrationsausgleich führen.

aktiver Transport

Er kann im Unterschied zur katalysierten Diffusion gegen einen Konzentrationsgradienten erfolgen und er ist strikt an einen energieverbrauchenden Prozeß gekoppelt (primär bzw. sekundär aktiver Transport).

Bei beiden Typen gibt es die Möglichkeit, daß ein Molekül bzw. Ion allein transportiert wird (Uniport) oder daß zwei verschiedene Moleküle bzw. Ionen zusammen in gleicher Richtung (Symport) oder in entgegengesetzter Richtung (Antiport) transportiert

werden.

Endoplasmatisches Retikulum (ER)

A. rauhes ER

- Synthese der sog. sekretorischen Proteine, d.h. Proteine des Apoplasten und der von ER-Membranen (Kernhülle), Golgimembranen und Tonoplast begrenzten nicht-plasmatischen Phasen
- Synthese der meisten Membranproteine von ER, Golgi, Tonoplast und Plasmamembran (Synthese der übrigen kernkodierten Proteine im Cytoplasma an freien Ribosomen)
- Glycoproteinbiosynthese (N-Glycosilierung an bestimmten Asparaginresten der Proteine)
- Qualitätskontrolle der synthetisierten Proteine
- Sortieren der Stoffe, die im ER bleiben sollen bzw. über den Golgi-Apparat weiter transportiert werden sollen

B. glattes ER

- Synthese der Membranlipide aller Kompartimente (ausgenommen bestimmter plastidärer und mitochondrialer Lipide)
- Synthese der Reservelipide
- Wachsbiosynthese
- Speicher für Ca^{2+} (Ausschleusung ins Cytoplasma über einen spezifischen Translokator auf ein Signal hin)

Golgi-Apparat

"Kohlenhydratfabrik" und "Verschiebebahnhof"

- Synthese von Polysacchariden, z. B. Hemizellulosen und pektinähnliche Substanzen der Zellwand (aber Zellulosesynthese an der Plasmamembran)
- Glycosylierung von Membranlipiden
- Modifikation der N-Glycoproteine und O-Glycosilierung an bestimmten Serin- bzw. Threoninresten
- Sortieren und Transport der Substanzen zur Vakuole, zur Plasmamembran bzw. zurück zum ER

Plasmamembran

Barriere und zugleich Vermittler zur Außenwelt

- spezifische Translokatoren und regulierbare Kanäle zur Substanzaufnahme und -abgabe sowie ATPasen für aktive Transportprozesse
- Rezeptoren für Signalaufnahme und -weiterleitung
- Rezeptoren für die Substanzaufnahme durch Endocytose
- Strukturen zur Abwehr von Parasiten oder Toxinen
- enge Interaktion mit dem Cytoskelett
- Ort der Zellulosesynthese

Vakuole

- Speicherkompartiment für unterschiedlichste Verbindungen, wie z. B. Ionen, organische Säuren, Zucker, Proteine, Pigmente, Toxine, Gerbstoffe
- lytisches Kompartiment
- Turgorgenerator (wichtig für Festigkeit krautiger Pflanzen bzw. Pflanzenteile)

Peroxisomen (Microbodies)

- Markerenzym: Katalase ($\text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + 1/2 \text{O}_2$)
- Fettsäureabbau über β -Oxidation
- Teilreaktionen der Photorespiration (Umwandlung von Glycolat in Glycin und Serin in Glycerat)
- Glyoxysomen (spezielle Form der Peroxisomen) besitzen die Enzyme des Glyoxylatzyklus außer Aconitase (Cytoplasma) und katalysieren eine Teilreaktionssequenz bei der Umwandlung von Fett in Kohlenhydrate.

Peroxisomen \leftrightarrow Glyoxysomen

Beim Ergrünen fett-speichernder Kotyledonen werden Glyoxysomen in Peroxisomen umgewandelt. Dagegen werden während der Blattseneszenz Peroxisomen in Glyoxysomen umgewandelt.

Mitochondrien und Plastiden

die semiautonomen Organellen mit typisch prokaryoten Merkmalen

von einer doppelten Hüllmembran umgeben

- Außenmembranen enthalten porenbildende Membranprotein (Porine) \Rightarrow Membranen durchlässig für Ionen und Moleküle (bis ca. 6 kDa, Chloroplasten ca. 10 kDa, Permeabilität der Poren aber modifizierbar)
- Innenmembranen reich an Translokatoren für kontrollierten Stoffaustausch zwischen den Organellen und dem Cytoplasma

enthalten eigene Genome und Ribosomen und sind zur Replikation, Transkription und Translation befähigt

Vermehrung durch Teilung

Genome kodieren aber nur für einen Teil der mitochondrialen bzw. plastidären Proteine, Rest ist kernkodiert und wird aus dem Cytoplasma importiert \Rightarrow semiautonome Organellen

Ursprung aus Protocyten – Endosymbionten–Theorie

Mitochondrien, die Kraftwerke der Zelle

Ort der Zellatmung:

oxidativer Abbau organischer Verbindungen über Citratzyklus (Matrix bzw. Innenmembran) und Elektronentransportkette (Innenmembran) und Nutzung der freiwerdenden Energie (ca. 50 %) zur ATP-Synthese (Innenmembran)

Synthese eines Teils ihrer Membranlipide

Hauptsyntheseort von Tetrahydrofolat-Polyglutamat in der Zelle

de novo Fettsäuresynthese zur Produktion von Liponsäureamid

Charakteristika pflanzlicher Mitochondrien

Elektronentransportkette:

- CN^- -insensitive Atmung über alternative Oxidase
- neben Komplex I weitere NAD(P)H-Dehydrogenasen an der Innen- und Außenseite der Innenmembran

Oxidation von Glycin (Teilreaktion der Photorespiration)

vermutlich kein Fettsäureabbau über β -Oxidation

Funktion der Mitochondrien in photosynthetisch aktiven Zellen

- ATP-Synthese für den extraplastidären Raum
- Aufrechterhaltung des Redox-Gleichgewichts der Zelle

- Bereitstellung von C-Gerüsten z. B. Citrat bzw. 2-Oxoglutarat für die Glutamatsynthese

Chloroplasten

Ort der Photosynthese

Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie (ATP) und Reduktionsäquivalenten (NADPH + H⁺) unter Freisetzung von O₂ aus H₂O

Nutzung der Produkte für verschiedene Synthesewege

- CO₂-Fixierung im Calvin-Zyklus
- Stärkesynthese und Speicherung
- Fettsäurebiosynthese
- Membran- und Reservelipidbiosynthese
- Chlorophyll-, Häm- und Carotinoidbiosynthese
- Teilreaktionen der Nitrat-Assimilation (Nitritreduktase)
- Aminosäuresynthese
- Replikation, Transkription und Translation

Plastiden

Proplastiden: wenig differenzierte farblose Plastiden meriste-matischer Zellen

Chloroplasten: Plastiden photosynthetisch aktiver Zellen bei höheren Pflanzen einheitlich strukturiert

äußere Hüllmembran

innere Hüllmembran

Stroma (Plastoplasma)

Thylakoide: enthalten die membrangebundenen Kompo- nenten des Photosyntheseapparats, leiten sich von der inneren Hüllmembran ab, stehen mit dieser jedoch nicht in kontinuierlicher Verbindung, liegen teilweise einzeln als sog. **Stromathylakoide**, teilweise in Stapeln als sog. **Granathylakoide** im Stroma

(Bei Algen große Variation in Größe und Gestalt der Plastiden, in der Anordnung der Thylakoide und z. T. auch in der Anzahl der Hüllmembranen.)

Leukoplasten: farblose Plastiden in nicht-photosynthetischen Geweben, haben oft Speicherfunktion

Amyloplasten: Leukoplasten, die Stärke speichern

Proteinoplasten: Leukoplasten, die Protein speichern

Elaioplasten: Leukoplasten, die Lipide speichern

Chromoplasten: gelb bis rot gefärbte Plastiden in Blüten und Früchten (globulöse, membranöse, tubulöse, kristallöse For- men)

Gerontoplasten: gelb bis rot gefärbte Plastiden in alternden Blättern

Zellen bestehen aus ungeheuer vielen und verschiedenen Molekülen. Für unsere zellulären Betrachtungen bietet sich eine Einteilung in die folgenden drei großen Gruppen an.

- **organische Moleküle, deren Struktur direkt im Genom der Zelle festgelegt ist**

Nukleinsäuren (DNA und RNA) und Proteine

- **alle übrigen organischen Moleküle**

Palette der Intermediate bis zu den Endprodukten

- **anorganische Moleküle und Ionen**

z. B. H_2O , O_2 , CO_2 , HPO_4^{2-} , SO_4^{2-} , NO_3^-

als H-, O-, C-, N-, S- und P-Quellen für die Synthese organischer Verbindungen (P-Einbau als Phosphat-Gruppe)

Ionen frei im Cytoplasma: Cl^- und K^+ ca. 100 mM, Mg^{2+} ca. 3 mM, Ca^{2+} nur 0,1 bis 10 μM

///

///

///

///

///

///

///

///

///

///

///

///

///

///

///

Das Wasserpotential Ψ

bezeichnet den Unterschied im Energiegehalt (in der Fähigkeit, Arbeit zu leisten,) eines Systems zu einem Standardsystem (reines Wasser).

Ψ wird in Energie (Arbeit)/ Volumen =

$$\text{Kraft} \cdot \text{Weg} / \text{Volumen} = \text{Kraft} / \text{Fläche},$$

also in der Dimension eines Drucks angegeben.

Wasser strömt spontan von einem Ort mit höherem Potential zu einem mit niedrigerem Potential.

Da Zellen Wasser nicht aktiv aufnehmen können, erfolgt die Wasseraufnahme und der Transport immer einem abfallenden Wasserpotentialgradienten entlang.

Je kleiner das Wasserpotential einer Zelle ist, desto größer ist ihre Fähigkeit, Wasser aufzunehmen.

Das **Wasserpotential (Ψ_z)** einer Zelle ist abhängig von verschiedenen Teilpotentialen.

Ψ_π = osmotisches Wasserpotential

abhängig von der Konzentration der osmotisch wirksamen Teilchen in der Zelle (vor allem der Vakuole), je größer die Konzentration der Teilchen, desto kleiner die des Wassers und desto größer die Fähigkeit der Zelle, Wasser aufzunehmen

Ψ_τ = Matrixpotential (matrikales Wasserpotential)

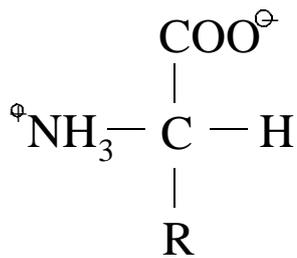
abhängig vom Gehalt an Quellkörpern: z. B. hydratisierbare Makromoleküle wie Zellulosefibrillen, je mehr Wasser in Hydrathüllen und Kapillaren gebunden werden kann, desto größer die Fähigkeit der Zelle, Wasser aufzunehmen

Ψ_p = Druckpotential

abhängig vom Gegendruck der Zellwand, je größer das Druckpotential, desto kleiner die Fähigkeit der Zelle, Wasser aufzunehmen

$$\Psi_z = \Psi_\pi + \Psi_\tau + \Psi_p$$

Proteine (Polypeptide) sind aus Aminosäuren aufgebaut.



L-Konfiguration

20 verschiedene Reste:
unpolar, polar ungeladen, polar
geladen

Aminosäuren werden über **Peptidbindungen** miteinander verknüpft, wobei die Carboxylgruppe der einen Aminosäure mit der Aminogruppe der nächsten unter H_2O -Abspaltung reagiert. Daher besitzt eine Peptidkette **Polarität** mit einer freien Aminogruppe (**N-Terminus**) an dem einen und einer freien Carboxylgruppe (**C-Terminus**) an dem anderen Ende.

Die **Aminosäuresequenz** (Primärstruktur), also die Reihenfolge der Aminosäurereste im Polypeptid, bedingt die **native Konformation** des Proteins (Anordnung der Polypeptidkette im Raum unter natürlichen Bedingungen), die durch Wasserstoffbrückenbindungen, ionische und hydrophobe Bindungen stabilisiert ist. Die Konformation kann darüber hinaus durch kovalente Bindungen zwischen zwei Cystein-Resten unter Ausbildung einer Disulfid-Bindung fixiert werden.

Im einfachsten Fall bildet das Polypeptid nur eine **Sekundärstruktur** wie **α -Helix** oder **β -Faltblatt** aus. In der Regel werden diese Sekundärstrukturen aber nur von kurzen Bereichen der Polypeptidkette ausgebildet zwischen denen Loop-Strukturen oder relativ ungeordnete Bereiche liegen.

Nucleinsäuren (DNA, RNA) sind Polymere aus Nucleotiden.

Nucleotide bestehen aus

- einer Phosphatgruppe
- einer Pentose – Desoxyribose (DNA), Ribose (RNA)
- einer stickstoffhaltigen Base: Adenin, Guanin, Cytosin oder Thymin (DNA) bzw. Adenin, Guanin, Cytosin oder Uracil (RNA)

Die Phosphatgruppe ist am C5 der Pentose verestert und die Pentose β -glycosidisch mit der Base verknüpft.

In den Polymeren sind die Nucleotide über **Phosphodiesterbindungen** zwischen dem Phosphat eines Nucleotids und der Pentose des anderen Nucleotids miteinander verknüpft. Damit entsteht ein Rückgrat mit einer sich wiederholenden Abfolge von Phosphat – Pentose – Phosphat – Pentose usw.. An dieses Rückgrat sind die Basen in für das Polymer charakteristischen Reihenfolge angehängt. In dieser Reihenfolge ist die genetische Information festgelegt.

Die DNA-Moleküle einer Zelle bestehen aus zwei Nucleotidketten, die eine **Doppelhelix** ausbilden: Pentose-Phosphat-Rückgrate an der Außenseite

Basen im Inneren der Helix über H-Brücken gepaart.

Nur bestimmte Basen sind kompatibel: **A – T** und **G – C**, damit sind die beiden Nucleotidketten in der Helix **komplementär**.

Replikation

Verdopplung der DNA-Moleküle, die beiden Stränge treten auseinander und dienen als Matrize um Nucleotide zu einem neuen komplementären Strang zusammen zu fügen.

Die Struktur der DNA bildet also die Grundlage für ihre Funktion, die genetische Information auf die Tochterzellen zu übertragen.

Membranlipide

Ihre Strukturen sind vielfältig, sie besitzen aber fast alle das gleiche Bauprinzip. Sie bestehen aus

einem **hydrophoben** Bereich und
einem **hydrophilen** Bereich.

Solche Verbindungen bezeichnet man als **amphiphil**.

Hydrophober Bereich

Ihn bilden die Fettsäurereste, die über Esterbindung an Glycerin oder über Amidbindung an Sphingosin gebunden sind. Seltener sind langkettige Alkohole über Etherbindung gekoppelt (Plasmalogene bei Tieren und Membranlipide der Archaeobakterien).

Hydrophiler Bereich

Ihn bilden polare Phosphorsäureester (Phospholipide) oder Zucker, Mono- bis Oligosaccharide (Glycolipide).

Die **amphiphilen** Lipide zeigen in wässrigem Milieu "self-assembly", Ausbildung von Aggregaten, die meist die typische Doppelschicht-Struktur aufweisen (Entropie des Wassers).

Die Membranlipide sind für wesentliche Eigenschaften der Biomembranen wie Stabilität, Flexibilität, Semipermeabilität, Fluidität verantwortlich.

1. Hauptsatz der Thermodynamik
(**Energierhaltungssatz**)

Die Energie des Universums (System plus Umwelt) ist konstant. Energie kann übertragen und umgewandelt, aber weder erzeugt noch zerstört werden.

$\Delta Q = \Delta E - \Delta A$ (Q: aufgenommene Wärmeenergie, E: innere Energie, A: abgegebene Arbeit ($\Delta A = -p\Delta V$, da Arbeit = Kraft x Weg und Kraft = Druck x Fläche))

2. Hauptsatz der Thermodynamik (**Entropie nimmt zu**)
Jeder Energietransfer und jede Energieumwandlung vergrößert die Unordnung (Entropie, S) des Universums. Ein Prozess kann nur dann spontan ablaufen, wenn die Summe der Entropieänderungen des Systems und seiner Umwelt zunimmt ($\Delta S \geq 0$).

Gibbssche **freie Energie** ist derjenige Teil der Energie eines Systems, der **Arbeit leisten** kann, wenn Temperatur und Druck im System einheitlich sind.

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad \Delta H = \text{Enthalpieänderung} = \Delta E + p\Delta V$$

Nach der Änderung ihrer freien Energie werden chemische Reaktionen in **exergonische** (**energieabgebende**) und **endergonische** (**energieaufnehmende**) Prozesse unterteilt.

Nur **exergonische Reaktionen können spontan ablaufen** (ΔG negativ, da Enthalpie abnimmt und/oder die Entropie zunimmt).

Endergonische Reaktionen laufen in Zellen nur als

Teilreaktionen einer exergonischen Gesamtraktion.

Thermodynamik sagt aus, ob Reaktionen spontan ablaufen können.

Kinetik sagt aus, mit welcher Geschwindigkeit die Reaktionen ablaufen.

Reaktionsgeschwindigkeiten (Umsatz/Zeit) sind also unabhängig von ΔG , aber abhängig von der freien Aktivierungsenergie (ΔA). Die Geschwindigkeit der Reaktion $S \rightarrow P$ ist der Konzentration von S im aktivierten Zustand direkt proportional.

Freie Aktivierungsenergie ist der Energiebetrag, der benötigt wird, um alle Moleküle in 1 Mol einer Substanz ($6,0221 \times 10^{23}$ Moleküle) bei definierter Temperatur in den aktivierten Zustand zu bringen.

Möglichkeiten die Reaktionsgeschwindigkeit zu steigern:

1. Temperaturerhöhung
2. Zugabe von **Katalysatoren**

