

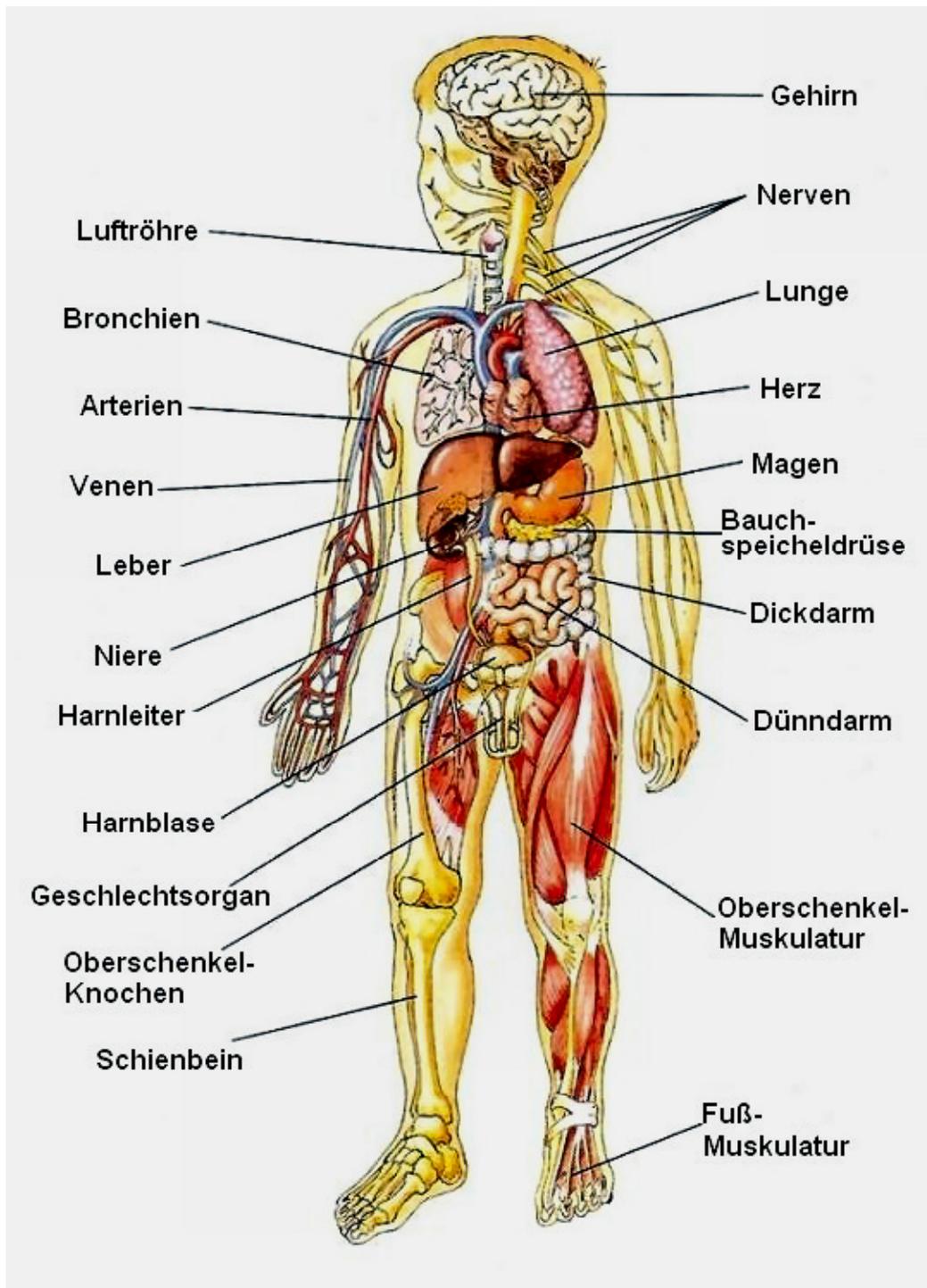
DNA und RNA

Eine Show der Moleküle

© Herbert Paukert

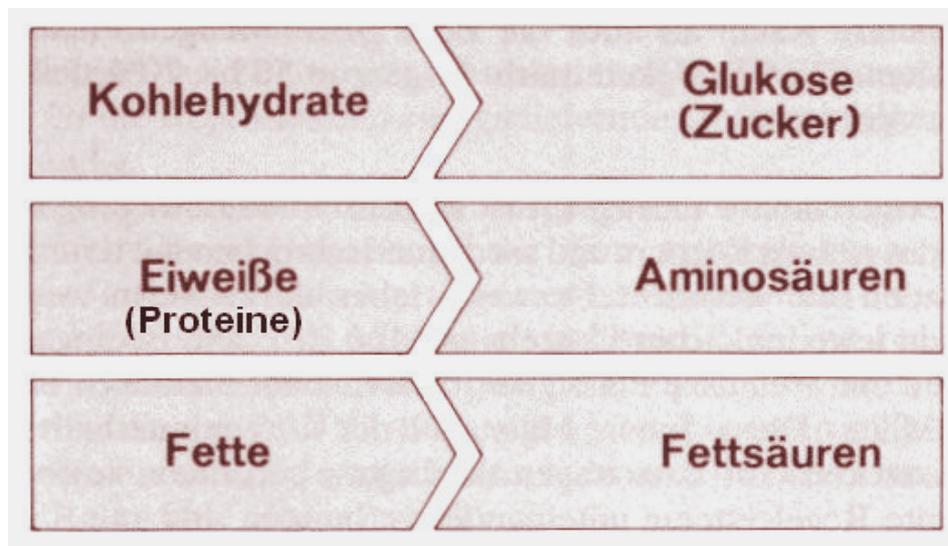
Der menschliche Körper	- 2 -
Baustoffe und ihre Bestandteile	- 3 -
Die Zelle und ihr Stoffwechsel	- 4 -
Organe, Gewebe und Zellen	- 5 -
Die Zelle und ihre Organellen	- 6 -
Der Zellkern mit seinen Genen	- 7 -
Gene steuern die Proteinsynthese	- 8 -
Die vier Basen im DNA-Molekül	- 9 -
DNA- und RNA-Moleküle	- 10 -
Die Formel des DNA-Moleküls	- 11 -
Die Replikation des DNA-Moleküls	- 12 -
Die Synthese von Protein-Molekülen	- 13 -
DNA - RNA – PROTEIN	- 14 -
Proteine sind Aminosäuren-Ketten	- 15 -
Phäne als Resultate der Gene	- 16 -
PCR-Verfahren	- 17 -
DNA-Sequenzierung	- 18 -
DNA-Manipulation	- 19 -
Das Virus SARS-CoV-2	- 20 -
Die mRNA-Impfung (1)	- 21 -
Die mRNA-Impfung (2)	- 22 -
Verschiedene Impfstoffe	- 23 -
Das Immunsystem (1)	- 24 -
Das Immunsystem (2)	- 25 -
mRNA-Technik in der Medizin	- 26 -

Der menschliche Körper



Der menschliche Körper besteht aus **Organen**, deren **Gewebe** hochspezialisierte **Zellen** enthalten. Jede Zelle besteht aus einer Zellmembran, die das Zellplasma und den Zellkern umschließt. Der Zellkern enthält in seinen Genen die Erbinformation, welche den Aufbau des gesamten Organismus steuert.

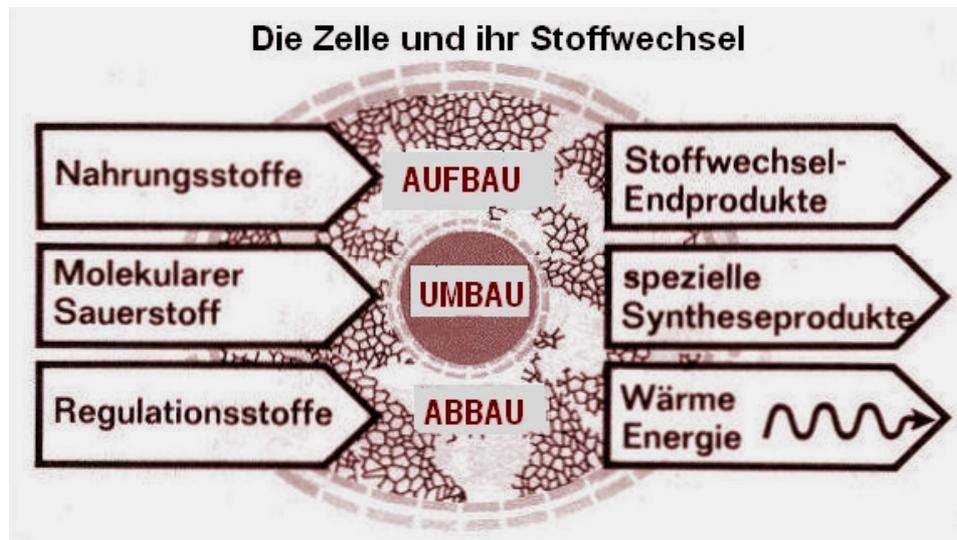
Baustoffe und ihre Bestandteile



Im menschlichen Körper kommen hauptsächlich **sechs** Elemente vor: Sauerstoff (O), Wasserstoff (H), Stickstoff (N), Kohlenstoff (C), Schwefel (S) und Phosphor (P). Dazu kommen fünf Ionen, welche im Wasser H_2O gelöst sind: Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium und Chlor. Damit werden dann drei komplexe Molekülklassen gebildet, welche selbst Bestandteile der Grundnahrungsstoffe sind: die **Aminosäuren** der Eiweiße (Proteine), die **Fettsäuren** der Fette (Lipide) und die **einfachen Zucker** der Kohlenhydrate (Saccharide). Auch müssen Ribonukleinsäuren (**RNA**) und Desoxyribonukleinsäuren (**DNA**) erwähnt werden.

Bei der Verdauung werden die Proteine in Aminosäuren, die Fette in Fettsäuren und die Kohlenhydrate in Zucker zerlegt. Im Stoffwechsel der Zellen können diese Moleküle weiter abgebaut werden, wobei die Endprodukte Wasser H_2O , Kohlendioxid CO_2 und Harnstoff CH_4N_2O ausgeschieden werden.

Die Zelle und ihr Stoffwechsel



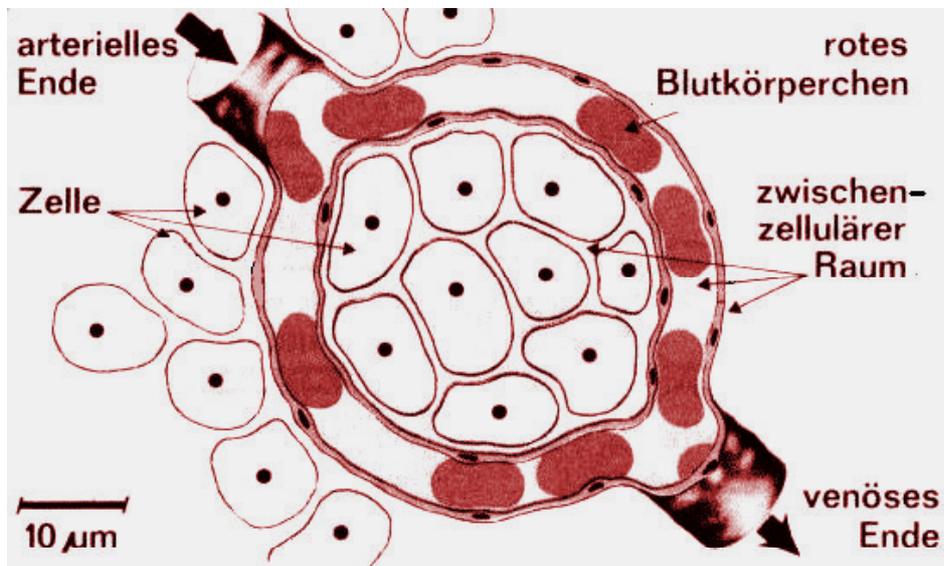
Im Zellplasma läuft der **biochemische Stoffwechsel** ab. Beim Baustoffwechsel werden Moleküle zerlegt und aus ihren Bestandteilen wieder neue aufgebaut. Jeder Stoffwechsel braucht Stoffe. Unsere Nahrungsstoffe werden durch den Mund aufgenommen, wo bereits die Verdauung beginnt, die im Magen und Darm fortgesetzt wird. Dabei werden Kohlenhydrate in Zucker, Eiweiße in Aminosäuren und Fette in Fettsäuren aufgespalten.

Damit der Baustoffwechsel reibungslos funktioniert, muss ihm Energie zugeführt werden. Diese Energie liefert der Betriebsstoffwechsel (**Energiestoffwechsel**) der Zelle. Die Aufnahme der Betriebsstoffe (vor allem von Zucker aus dem Blut) erfolgt durch die Zellmembran. Ihre Verbrennung mittels Sauerstoff in den Mitochondrien des Zellplasmas wird als **biologische Oxidation** bezeichnet und liefert **erstens** weiter verwertbare chemische Bestandteile und **zweitens** frei werdende Energie. Diese wird zur Synthese von Adenosintriphosphat (ATP) aus Adenosindiphosphat (ADP) und Phosphorsäure (H_3PO_4) verwendet. Die ATP-Moleküle sind die Energiespeicher und Energielieferanten für die chemischen Reaktionen im Körper.

Der **Energiekreislauf in der Natur** besteht aus zwei Prozessen:

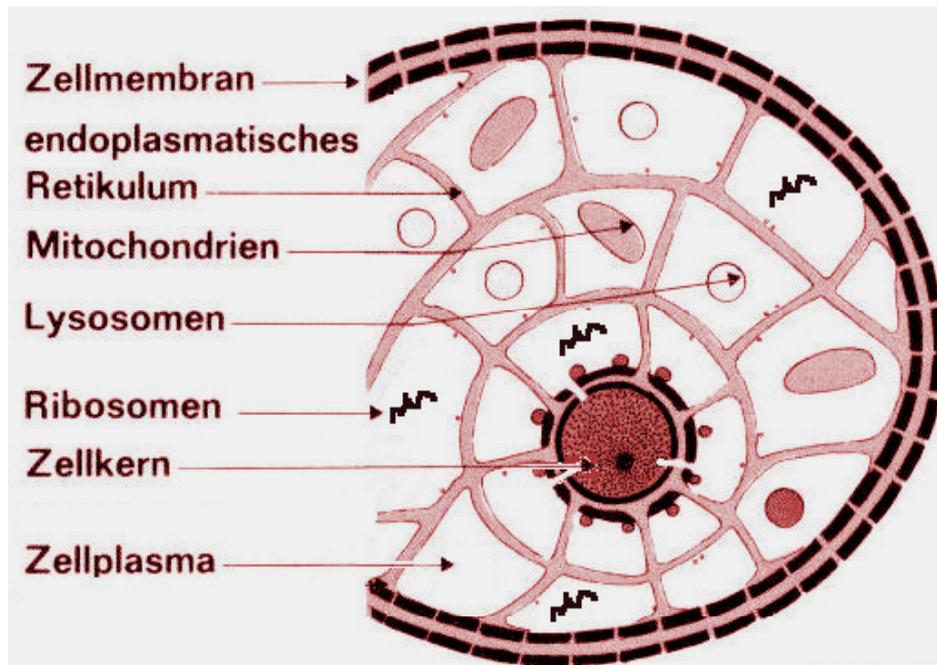
- (1) Bei der **Photosynthese** in Pflanzen werden mithilfe des grünen Blattfarbstoffes (Chlorophyll) und des Sonnenlichts aus Wasser (H_2O) und Kohlendioxid (CO_2) einfache Zuckermoleküle ($C_6H_{12}O_6$) und Sauerstoff erzeugt (O_2).
- (2) Bei der **biologischen Oxidation** in den Körperzellen wird der Zucker mithilfe des Sauerstoffs zu Wasser und Kohlendioxid verbrannt. Dabei wird Energie frei, die für chemische Reaktionen verwendet werden kann.

Organe, Gewebe und Zellen



Das **Gewebe** der menschlichen Organe besteht aus den **Zellen** und dem **zwischenzellulären Raum**. Die Zellen haben im Laufe der Entwicklung hoch spezialisierte Funktionen übernommen (Muskelzellen zur Bewegung, Nervenzellen zur Signalübertragung, Drüsenzellen zur Sekretion, usw.). In der Grundstruktur bestehen sie aus einer Zellmembran, die sie von der Umgebung abgrenzt, und im Inneren aus dem Zellplasma mit den verschiedenen Zellorganellen (Ribosomen, Mitochondrien, usw.) und dem Zellkern mit seinen Chromosomen, welche die Desoxyribonukleinsäure-Moleküle (DNA) enthalten.

Die Zelle und ihre Organellen



Der **Zellkern** ist die Steuerzentrale der Zelle. Er enthält in seinen Chromosomen die DNA verpackt und somit das genetische Erbgut.

Die **Ribosomen** sind die Proteinfabriken. An ihnen werden unter der Kontrolle von DNA und RNA die Aminosäuren zu Protein-Molekülen (Eiweiß) verknüpft.

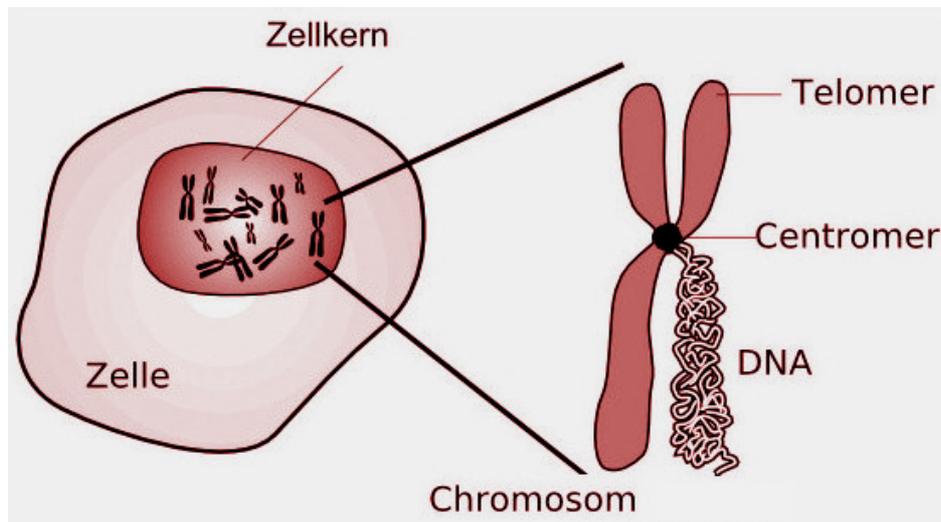
Die **Mitochondrien** sind die Energiekraftwerke der Zellen. In ihnen findet die Verbrennung (Oxidation) organischer Stoffe mithilfe des molekularen Sauerstoffes statt, wobei Energie freigesetzt wird.

Die **Lysosomen** sind kleine von einer Hülle umschlossene Zellareale, in denen aufgenommene Fremdstoffe durch die Enzyme abgebaut werden.

Das **endoplasmatische Retikulum** produziert und transportiert eine Vielzahl von Stoffen im Zellplasma. Der angeschlossene Golgi-Apparat sortiert und verteilt die Stoffe im Zellplasma.

Die **Zellmembran** schließlich ist die Schutzhülle der Zelle. Sie grenzt das Plasma von der Umgebung ab. Durch Kanäle in der Membran erfolgt der Stofftransport zwischen Zellplasma und den kapillaren Blutgefäßen im zwischenzellulären Raum. Der Transport erfolgt dabei entweder passiv ohne Energieverbrauch entsprechend dem Konzentrationsgefälle (Diffusion), oder aktiv mit Energieverbrauch gegen das Konzentrationsgefälle mithilfe von Transportproteinen (Ionenpumpen).

Der Zellkern mit seinen Genen



Die **DNA** im Zellkern wird mit Proteinen (Histonen) zu einem Makromolekül-Komplex verpackt. Dieser wird **Chromosom** (Kernfaden) genannt. Alle menschlichen Zellen besitzen diese Chromosomen, die mit 1, 2, 3, 4, 5, ... 22, X und Y bezeichnet werden.

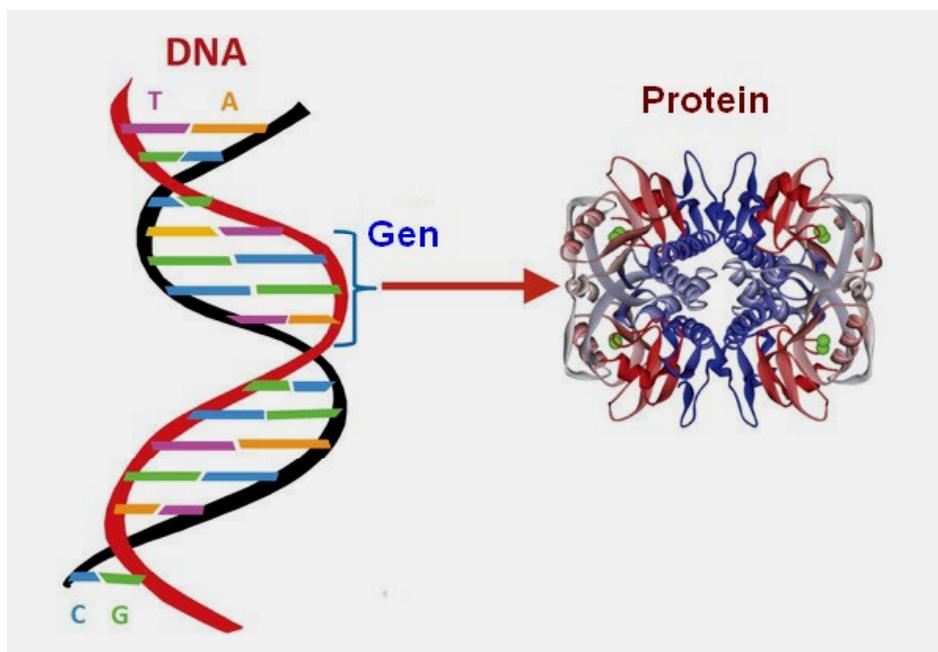
Die ersten 22 Chromosomen sind doppelt vorhanden. Im letzten Chromosomenpaar hingegen können nur die zwei Chromosomenkombinationen **XX** oder **XY** auftreten. Diese Chromosomen sind geschlechtsbestimmend. Die XX-Kombination bestimmt den weiblichen Organismus, XY den männlichen. Weil der ganze Chromosomensatz paarig angelegt ist, nennt man ihn «diploid». Er besteht aus genau 46 Chromosomen und enthält ungefähr 24000 Gene. Ein einfacher Chromosomensatz aus 23 Chromosomen heißt «haploid». Anzumerken ist, dass nur etwa 10% der DNA codierende Gene sind. Die restlichen Gene haben regulative Funktionen.

Die meisten Körperzellen besitzen einen diploiden Chromosomensatz. Keimzellen haben jedoch einen haploiden Chromosomensatz. Die **Samenzellen** besitzen ein Y- oder ein X-Chromosom. **Eizellen** haben nur ein X-Chromosom. Bei der Befruchtung verschmelzen die Samenzellen mit den Eizellen und damit erfolgt die Festlegung des Geschlechts (XY oder XX).

Die, durch fortgesetzte Teilungen (**Mitosen**) entstehenden Zellen des Körpers erhalten dabei diploide Chromosomenpaare mit je einem mütterlichen und auch einem väterlichen Chromosom. Ein Chromosom besteht in der Regel aus zwei identischen Längshälften (Chromatiden), die durch ein Centromer-Protein verbunden sind.

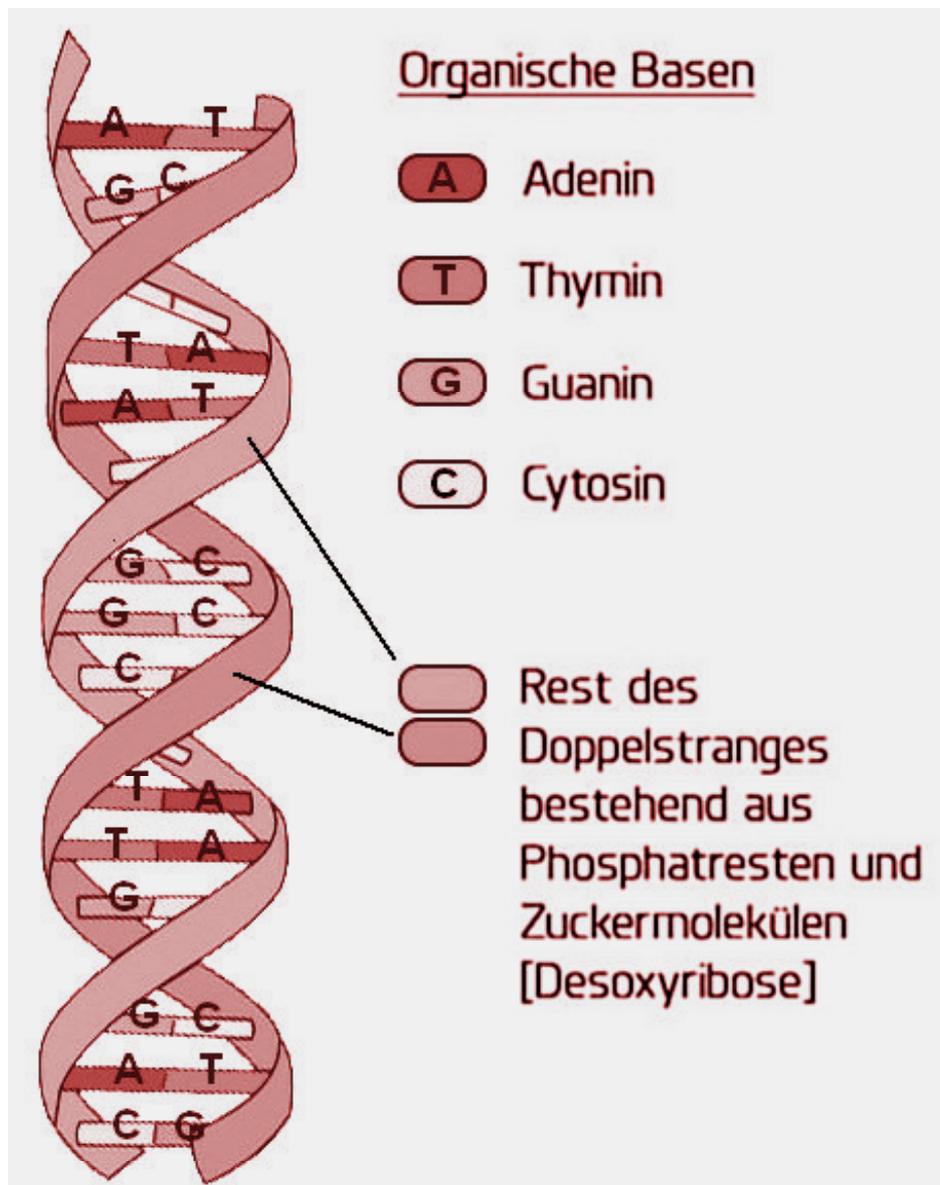
Eine wichtige Rolle spielen die beiden Enden der Chromosomen (**Telomere**). Diese enthalten eine kurze, sich identisch wiederholende Basen-Sequenz (TTAGGG), die eine Schutzkappe für die Chromosomen darstellt. Dadurch können die Chromosomen nicht zusammenkleben oder zerfallen. Bei jeder Zellteilung werden die Telomere **nicht** verdoppelt, d.h. sie werden im Laufe des Lebens kürzer und damit wird auch ihre Schutzfunktion schwächer. Unterschreiten die Telomere eine kritische Länge, dann verändern die in den Chromosomen befindlichen Gene ihre Aktivität, und ihre Teilungsrate sinkt, und schließlich teilt sich die Zelle gar nicht mehr und stirbt. Die Telomer-Verkürzung erweist sich somit als ein wesentlicher Prozess beim Altern.

Gene steuern die Proteinsynthese



Die wichtigste Funktion der **DNA**-Moleküle ist ihre steuernde Mitwirkung bei der Bildung von **Proteinen** (Eiweiß) durch gezielte Verknüpfung von Aminosäuren. Die Proteine werden als Baustoffe für Zellstrukturen oder als **Enzyme** (Katalysatoren) für weitere chemische Reaktionen verwendet. Die Enzym-Proteine bestehen aus langen Ketten von Aminosäuren, welche sich durch Faltungen zu komplizierten räumlichen Strukturen anordnen. Dabei bilden die für die spezifische Enzymleistung wirksamen Aminosäuren eine Vertiefung in der Oberfläche. An dieses aktive Zentrum des Enzym-Proteins wird dann das passende, so genannte Substratmolekül angelagert. Dort können bestimmte Ionen (**Coenzyme**) auf das Substratmolekül einwirken, so dass es beispielsweise chemisch verändert oder überhaupt zerlegt wird. Die Enzyme wirken als Biokatalysatoren für die Stoffwechselforgänge in der Zelle, wodurch bestimmte Merkmalsstrukturen aufgebaut werden können.

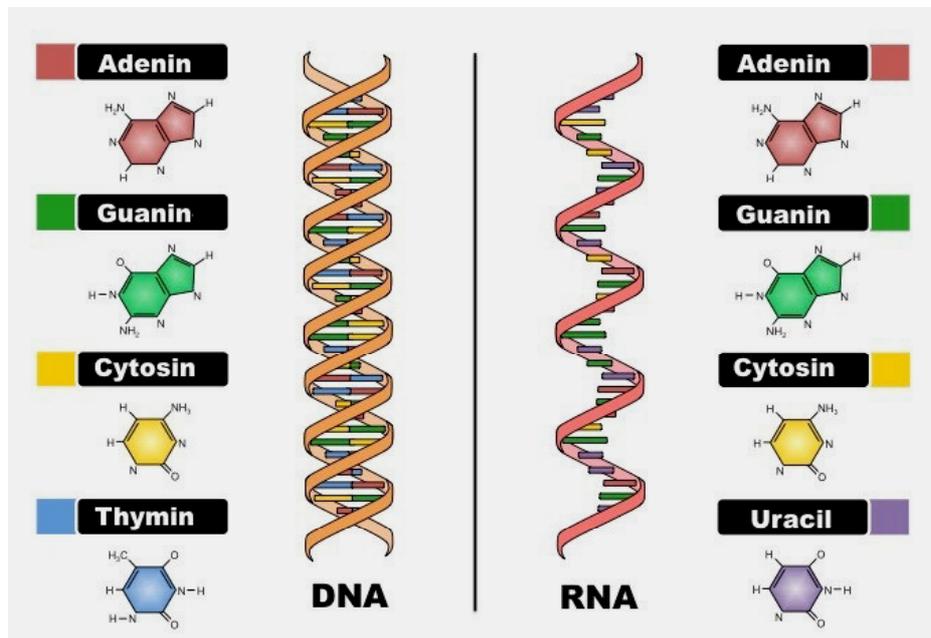
Die vier Basen im DNA-Molekül



Der verdrillte Doppelstrang (Doppelhelix) einer Desoxyribonukleinsäure (DNA) besteht aus Desoxy-Ribose-Zucker, Phosphat-Resten und vier stickstoffhaltigen Basen Adenin (A), Thymin (T), Guanin (G), Cytosin (C). Aus elektrochemischen Gründen können nur bestimmte Basen genau einander gegenüberliegen (**komplementäre Basenpaare** A--T und C--G).

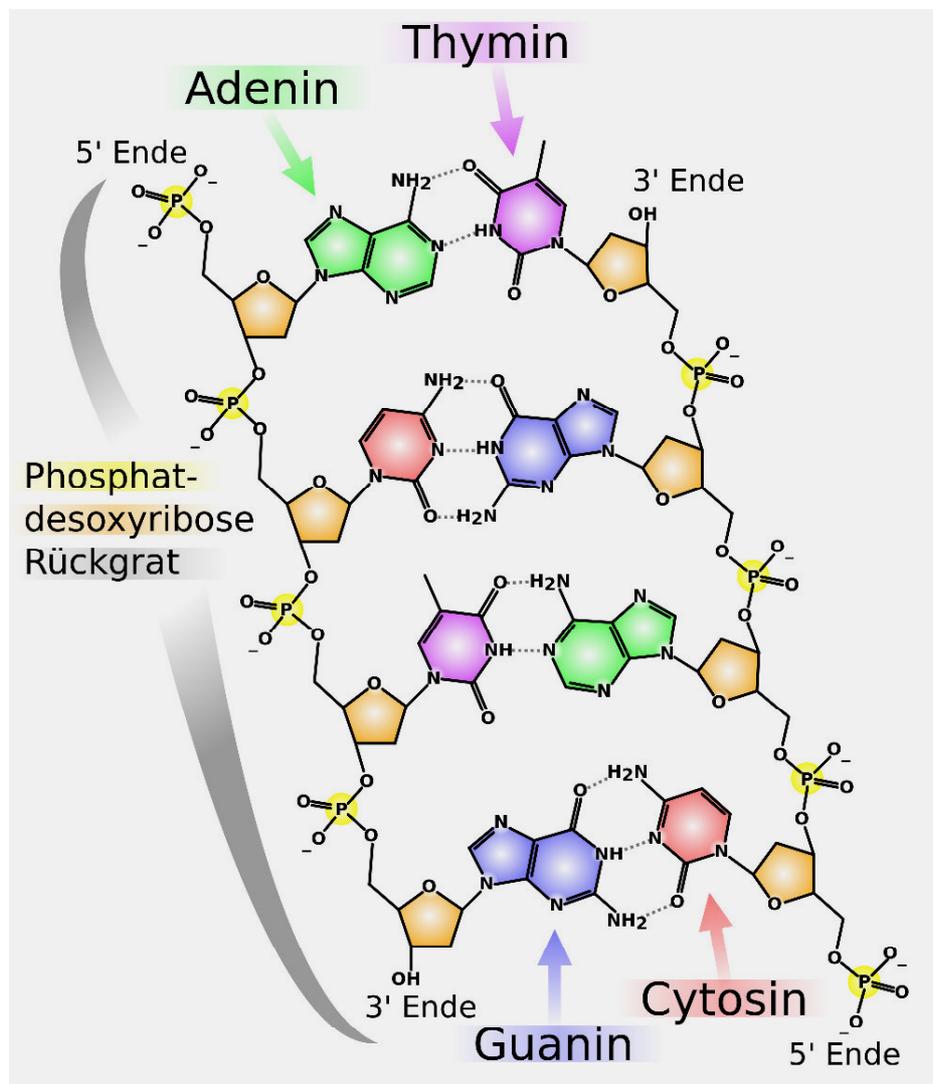
Die Bestandteile der DNA, die aus einem Zucker, einer Base und einem Phosphatrest bestehen, nennt man **Nukleotide**. Alle DNA-Doppelstränge befinden sich geschützt im Zellkern.

DNA- und RNA-Moleküle



Desoxyribonukleinsäure (**DNA**) ist ein Doppelstrang. Ribonukleinsäure (**RNA**) jedoch besteht aus einem leicht modifizierten Teilbereich eines DNA-Einzelstrangs. Dabei wird die Base Thymin (T) durch die Base Uracil (U) ersetzt, und die Desoxyribose durch die Ribose.

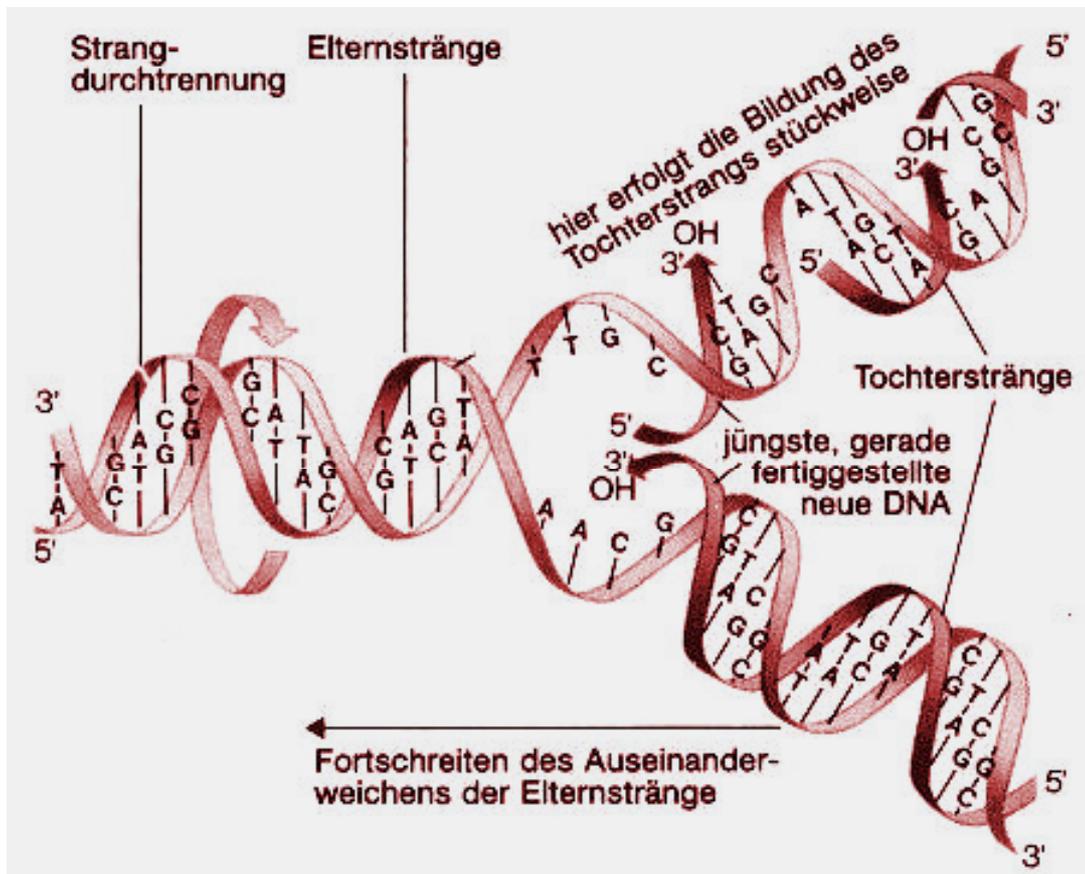
Die Formel des DNA-Moleküls



Das DNA-Molekül hat eine komplexe chemische Struktur, die aus einer spiralg verdrehten Leiter besteht. Die Leiterstangen werden mit Phosphat-Desoxy-Ribose gebildet. Die Leitersprossen bestehen aus komplementären Basenpaaren (A--T) und (G--C). Dabei sind die beiden komplementären Basen durch Wasserstoffbrücken (H) miteinander verbunden. Ein Leiterabschnitt heißt **Nukleotid**.

Die Zahlen 3 und 5 kennzeichnen unterschiedliche Endstücke der zwei Randketten.

Die Replikation des DNA-Moleküls

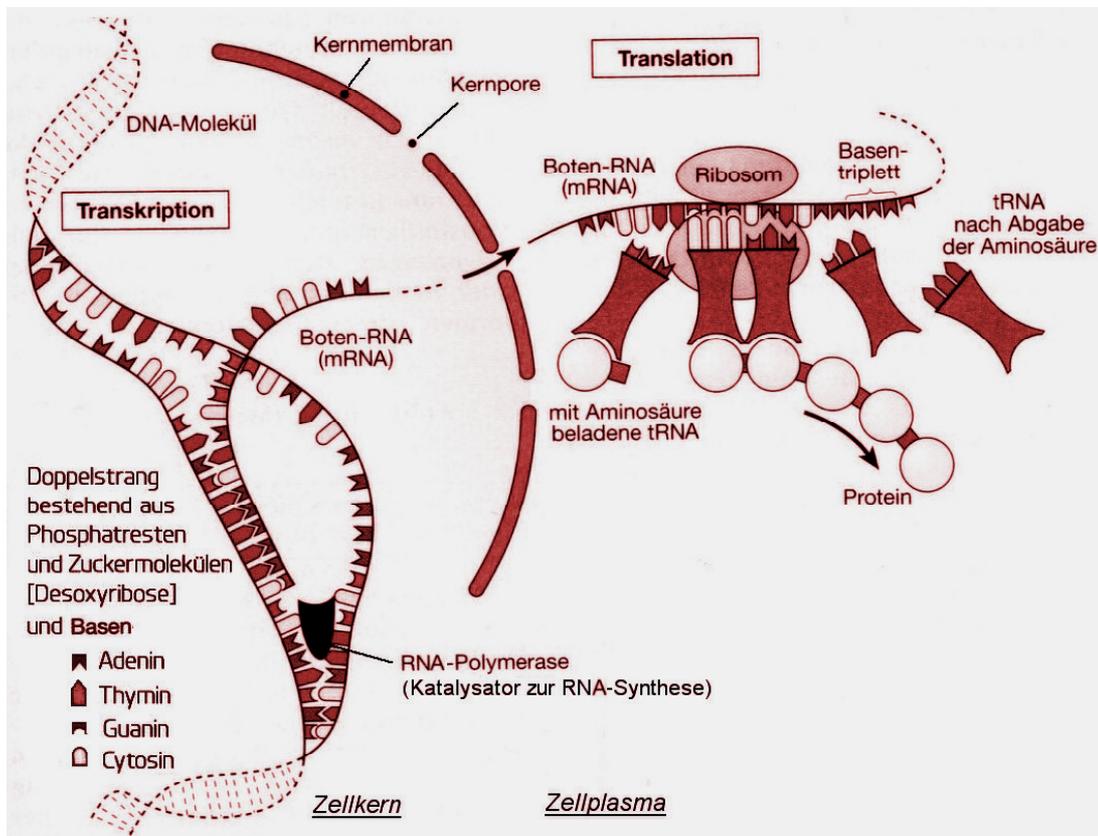


Die DNA-Doppelstränge befinden sich in 46 Kernfäden der Zellkerne (Chromosomen). Bei jeder Zellteilung werden sie mithilfe von **spezialisierten Enzymen** aufgetrennt.

Die *Topoisomerase* entwindet den DNA-Doppelhelix und die *Helicase* trennt den Doppelstrang auf. Die *Primase* synthetisiert einen RNA-Primer, welcher sich an ein Strangende als Startpunkt anheftet. Die *Polymerase* verknüpft frei herum schwimmende, komplementäre Basen ab dem markierten Startpunkt mit dem DNA-Einzelstrang. Zuletzt entfernt eine *RNase* den Primer und *Ligasen* schließen etwaige Löcher. Damit ist ein neuer DNA-Doppelstrang gebildet, welcher identisch mit dem Ausgangsmolekül ist. Durch diese **Replikation** sind die Makromoleküle in der Lage, gleichartig aufgebaute Tochtermoleküle zu erzeugen.

Nach der Zellteilung haben die zwei Tochterzellen die gleiche Genausstattung wie die Mutterzelle. Die Replikation ist ein wesentliches Merkmal, welches die belebte von der unbelebten Natur unterscheidet.

Die Synthese von Protein-Molekülen



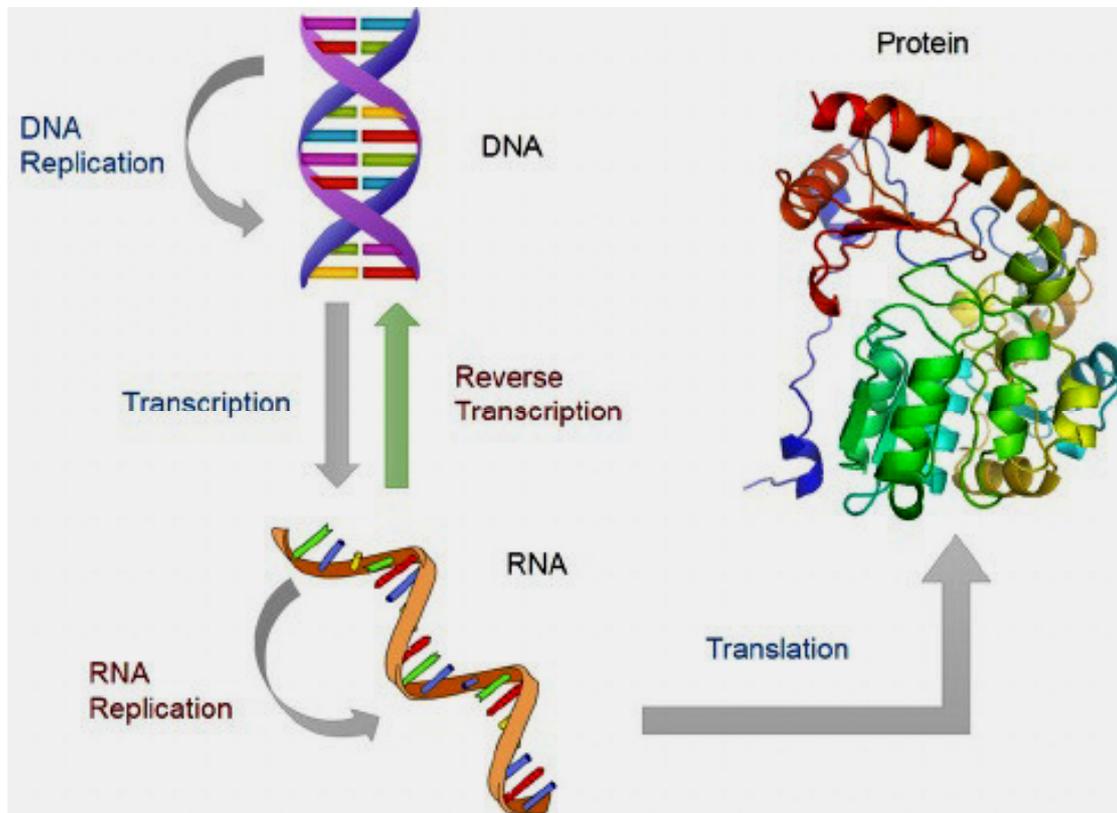
Die **Biosynthese eines Proteins** erfolgt immer in zwei Phasen:

(1) Bei der **Transkription** im Zellkern wird ein **DNA**-Strang mithilfe von Enzymen ab einer Startposition bis zu einer Endposition aufgetrennt. Von diesem Abschnitt wird entsprechend der komplementären Basenpaarung aus Nukleotidstücken eine Kopie erzeugt, welche dann als Messenger-Ribonukleinsäure (**mRNA**) bezeichnet wird. Diese verlässt den Zellkern und wandert ins Zellplasma.

(2) Im Zellplasma erfolgt an eigenen Einrichtungen (Ribosomen) der Vorgang der **Translation**. Dabei steuern jeweils drei Basen der mRNA (Basen-Triplett, Codon) die Anheftung einer bestimmten Aminosäure.

Der eigentliche Aminosäuretransport erfolgt mithilfe der Transfer-RNA (**tRNA**), die auf der einen Seite über die komplementären Basenpaarungen an die mRNA andockt und auf der anderen Seite mit einer Aminosäure beladen ist. Nach der Verknüpfung der Aminosäuren löst sich die tRNA sowohl von der Aminosäure als auch von der mRNA. Übrig bleibt eine Kette von Aminosäuren (ein Protein).

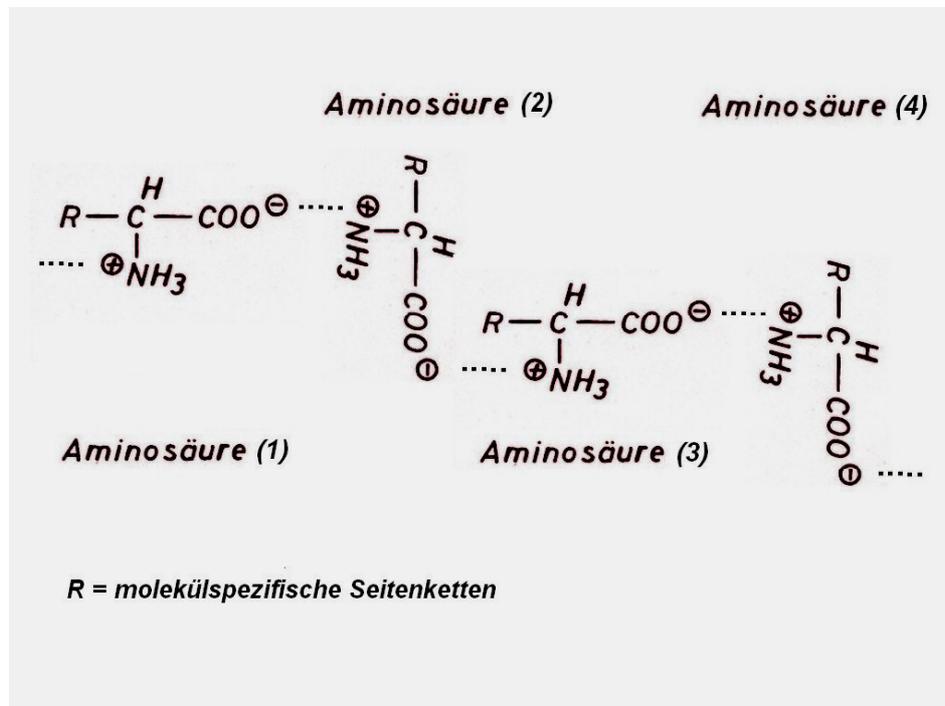
DNA - RNA – PROTEIN



In der **Basensequenz** der Nukleinsäuren ist die Information für die Verknüpfung der verschiedenen Aminosäuren zu Proteinmolekülen (Eiweißen) verschlüsselt. In dem Zusammenhang spricht man auch vom genetischen Code. Ein Gen ist ein bestimmter Abschnitt des DNA-Moleküls, also eine bestimmte Sequenz von Basen-tripletts, welche für die Biosynthese eines Proteins verantwortlich ist.

Transkription und **Translation** sind biochemische Vorgänge, die mit der Druckerei eines Buches vergleichbar sind. Wenn der gesamte Chromosomensatz im Zellkern das «Buch» des Lebens ist, dann ist jedes einzelne Chromosom ein «Kapitel» daraus. Die Gene sind die verschiedenen «Sätze», und die einzelnen Basen sind die «Buchstaben».

Proteine sind Aminosäuren-Ketten

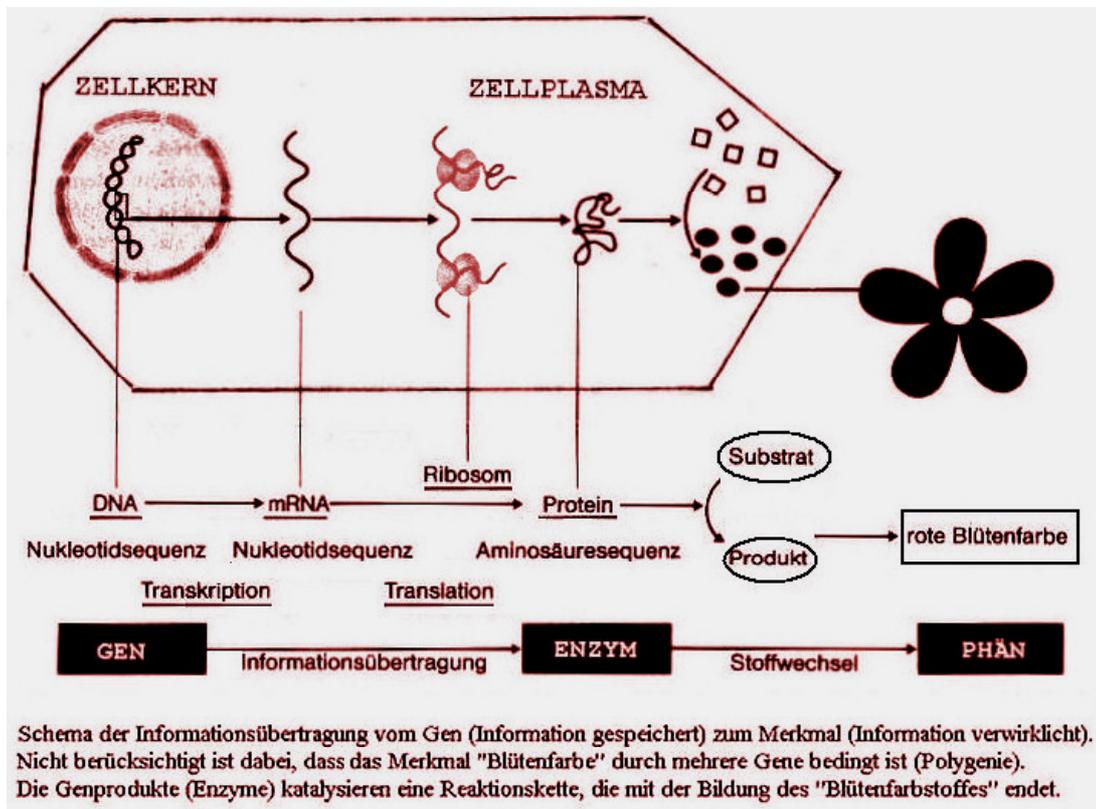


Proteine (EiweiÙe) bestehen aus miteinander verketteten **Aminosäuren**. Diese sind nicht linear angeordnet, sondern bilden komplexe, räumlich gefaltete Strukturen. An der Proteinsynthese sind beim Menschen nur 21 verschiedene Aminosäuren beteiligt, wobei Hunderte davon verkettet werden können.

Die Verkettung erfolgt über eine Peptid-Bindung zwischen einer Carboxy-Gruppe und einer Amino-Gruppe, wobei Wasser abgespalten wird.

Im Organismus gibt es tausende Proteine mit sehr unterschiedlichen Funktionen: Proteine für die Strukturierung von Geweben, für den Transport von Stoffen, für Aufgaben des Immunsystems, für die Bewegungen der Muskeln und schließlich als Enzyme (Katalysatoren) von chemischen Reaktionen.

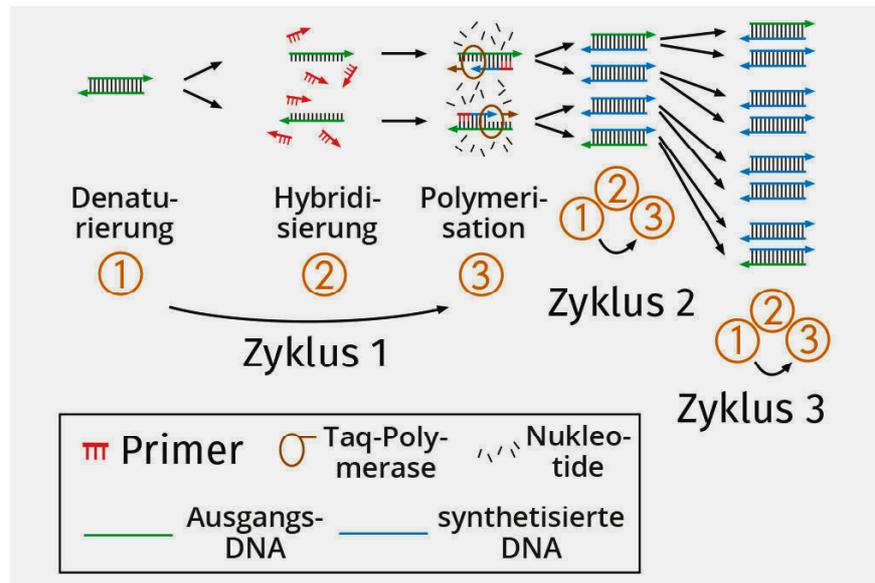
Phäne als Resultate der Gene



Die **Gene** enthalten die Erbinformationen für die Entwicklung aller äußerer Bau- und Leistungsmerkmale des Körpers (**Phäne**), welche durch Enzym-Proteine geregelt werden.

Die gesamte genetische Steuerung der Biosynthese von Proteinen nennt man Gen-expression. Oft sind an einem Phän mehrere Gene beteiligt (Polygenie), oder auch ein Gen an mehreren Phänen.

PCR-Verfahren



Die Polymerase-Kettenreaktion (**PCR**) ist ein Verfahren, um einen DNA-Doppelstrang zu vervielfältigen. Soll diese Methode anstelle von DNA mit RNA ausgeführt werden, muss die RNA zuerst in eine DNA mit dem Enzym «Reverse Transkriptase» umgeschrieben werden.

Neben der DNA benötigt man die **Primer**. Das sind kleine RNA-Moleküle, deren Basensequenz genau komplementär zur Startsequenz im DNA-Molekül ist. Weiters müssen ein passendes **Polymerase-Enzym** und Magnesium-Ionen in einer Pufferlösung vorliegen. Das gesamte PCR-Verfahren läuft dann in drei Schritten ab:

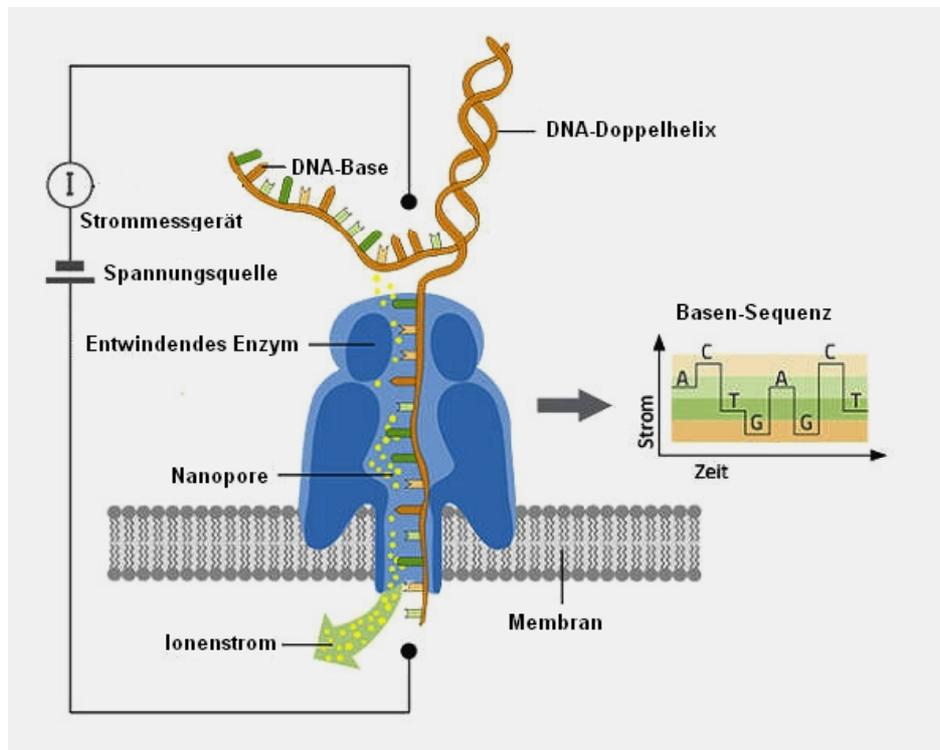
(1) Bei der **Denaturierung** wird die Lösung auf 95° erhitzt, um den DNA-Doppelstrang in zwei Einzelstränge aufzutrennen.

(2) Bei der **Hybridisierung** wird die Temperatur abgesenkt, um die Anlagerung des Primers mit komplementärer Basenpaarung an den Startpunkt der DNA-Sequenz zu ermöglichen.

(3) Bei der **Polymerisation** werden mithilfe der DNA-Polymerase an dem durch den Primer markierten einsträngigen DNA-Abschnitt die entsprechenden Nukleotide angefügt, so dass ein neuer DNA-Doppelstrang entsteht. Dieser Zyklus wird mehrmals wiederholt, bis eine genügende Anzahl von DNA-Molekülen vorhanden ist. Zusätzlich können noch Fluoreszenzfarbstoffe beigemischt werden, deren Farbsignale umso stärker sind, je mehr PCR-Material produziert wird.

Hauptanwendungsgebiete sind der genetische Fingerabdruck in der Gerichtsmedizin und das Erkennen von viralen Krankheitserregern.

DNA-Sequenzierung

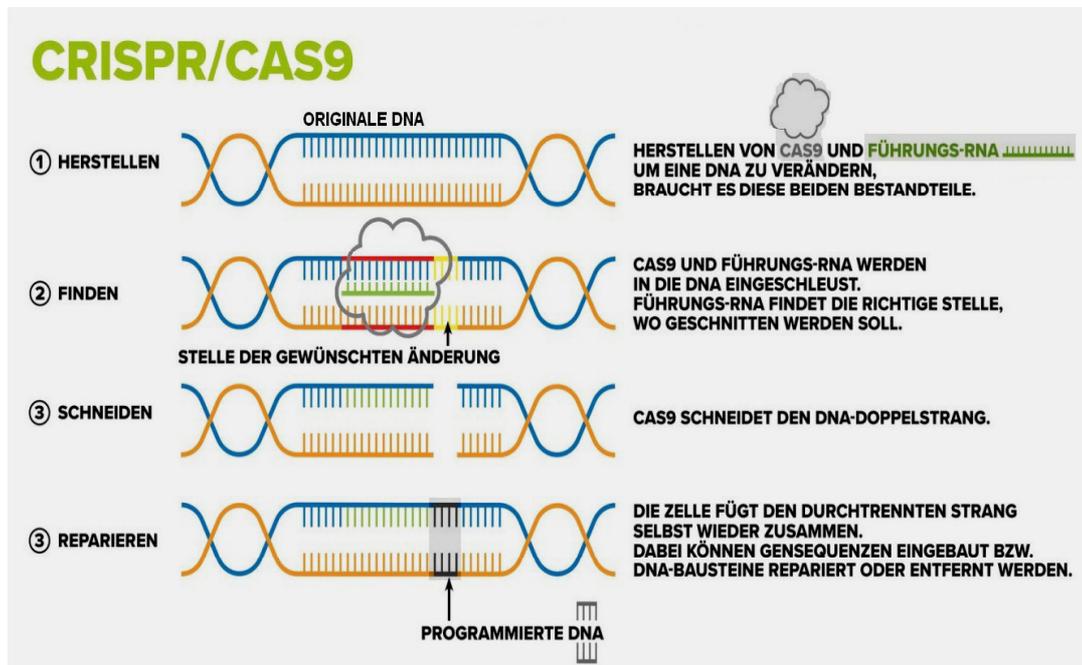


Mithilfe der **DNA-Sequenzierung** wird die Abfolge der Basen in einem DNA-Molekül bestimmt. Es wurden unterschiedliche Methoden dafür entwickelt. Die modernste ist die so genannte **Nanoporen-Sequenzierung**. Dazu wird ein Gerät verwendet, das die Größe eines Smartphones hat und über ein USB-Kabel mit einem Laptop verbunden ist.

Das Gerät enthält im Innern einen Gleichstromkreis, in welchem sich eine Membran mit hohem Leitwiderstand befindet. In dieser Membran ist eine **Nanopore** in der Breite eines DNA-Moleküls eingebaut. Beim Anlegen einer Spannung fließt durch die Pore ein konstanter Ionenstrom. Wenn ein DNA-Molekül diese Pore passiert, dann erfolgen Änderungen der Stromstärke, weil jede der vier Basen einen anderen Widerstand hat. Der Ionenstrom wird gemessen, die Daten an den Computer übertragen und von einer spezialisierten Software analysiert und grafisch dargestellt. Das Ergebnis ist dann die entsprechende **DNA-Sequenz**.

Die DNA-Sequenzierung wird zur Identifizierung von Viren und Bakterien verwendet, aber auch zur Feststellung von genetisch bedingten Erkrankungen.

DNA-Manipulation



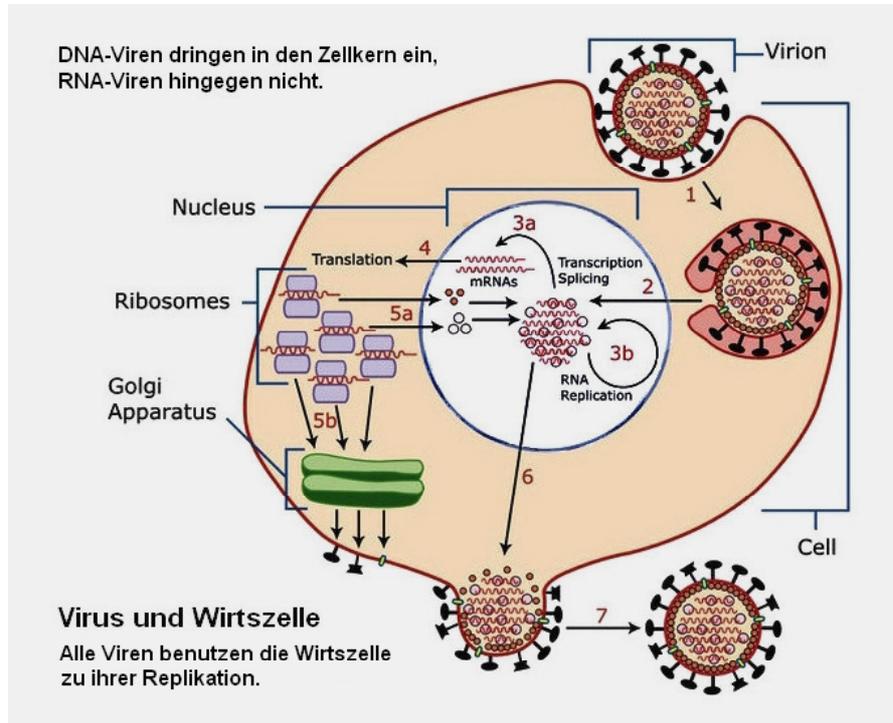
In der **Gentechnik** sind Verfahren zur **DNA-Manipulation** entwickelt worden.

Eine moderne und effektive Methode der Gentechnik ist die **CRISPR/Cas9**-Methode. Im Jahr 2005 wurden in Bakterien besondere DNA-Sequenzen entdeckt, die als Erinnerungsspuren an zurückliegende Virus-Infektionen erkannt wurden. Bei einem erneuten Virus-Befall werden diese Sequenzen aktiviert und in RNA-Moleküle umgeschrieben, welche als «clustered regularly interspaced palindromic repeats» (CRISPR) bezeichnet werden. Mit dieser RNA können dann die DNA-Sequenzen der eingedrungenen Viren gezielt aufgespürt werden. Das Enzym «**Cas9**» ist eine Nuklease, die eine DNA zerschneiden kann. Zusammen mit diesem Enzym wirkt das CRISPR/Cas9-System wie eine **Gen-Schere**, die ein DNA-Molekül gezielt an einer gewünschten Stelle aufschneiden kann. Für dieses Design einer programmierbaren Gen-Schere erhielten zwei Forscherinnen im Jahr 2020 den Chemie-Nobelpreis.

Auf diese Weise können Teile eines Gens gelöscht oder auch neue Genteile eingesetzt werden. Dadurch sind unterschiedliche Manipulationen am DNA-Molekül möglich.

Das Verfahren kann verwendet werden, um das Erbgut von Menschen, Tieren und Pflanzen fast beliebig zu verändern.

Das Virus SARS-CoV-2



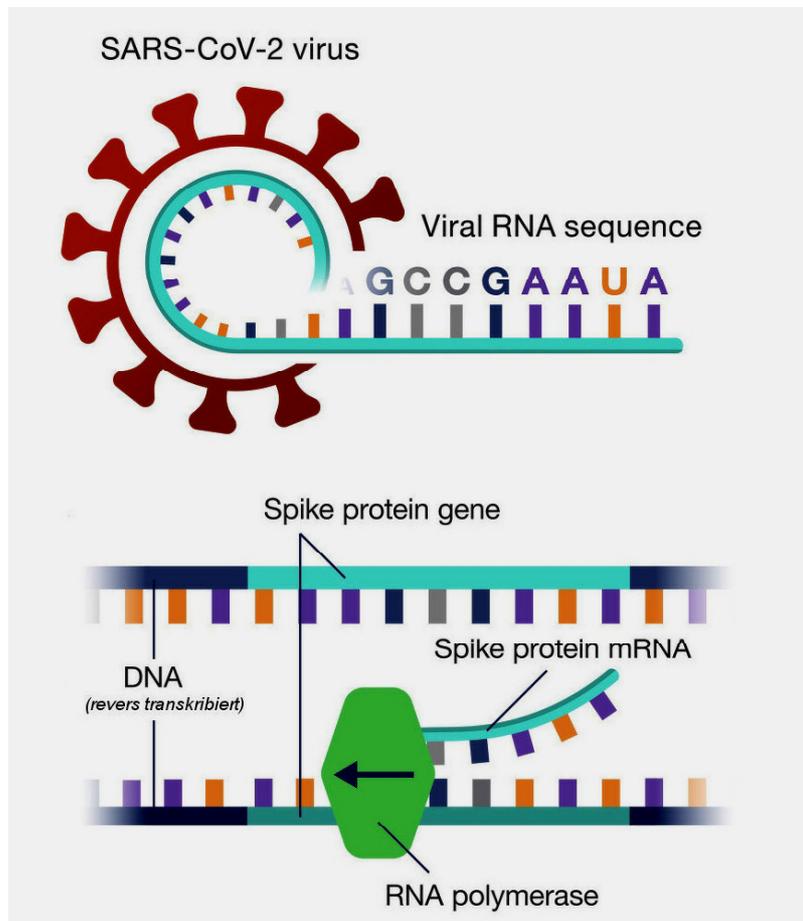
Das Virus **SARS-Cov-2** wurde 2020 identifiziert und ist 2021 bereits in fünf Hauptvarianten mit unterschiedlicher Infektiosität mutiert. Die Ansteckung erfolgt über eine Tröpfcheninfektion in den oberen Atemwegen oder eine Schmierinfektion.

Das Virus besitzt eine äußere Hülle und verfügt im Inneren über ein einzelsträngiges **RNA-Genom**. Dieses enthält den Code für Enzym-Proteine, die für die Replikation in Wirtszellen zuständig sind und auch den Code für 4 Strukturproteine. Das **S-Protein** bildet die **typischen Spikes** an der äußeren Hülle und ist für den Eintritt in die Wirtszelle zuständig, indem es auf der Zellmembran mithilfe des Enzyms «**ACE-2**» als Rezeptor in die Zelle gelangt. **DNA-Viren** dringen in den **Zellkern** ein, **RNA-Viren** jedoch nicht. In beiden Fällen verwendet das Virus die Wirtszelle zu seiner Vervielfältigung (**Replikation**), und die so gebildeten, neuen Viren wandern aus der Zelle.

Mögliche Auswirkungen davon sind die Beschädigung von Wirtszellen und eine überschießende Immunantwort mit organspezifischen Entzündungsreaktionen.

Im **Infektionsverlauf** treten ca. 4 bis 6 Tage nach dem Infektionszeitpunkt die ersten Symptome auf (Fieber, Husten, Kurzatmigkeit, Verlust von Geruch und Geschmack, allgemeine Schwäche) – aber auch Symptomlosigkeit. Nach dieser Inkubationszeit kann bei einer Abwehr durch das Immunsystem (durch Antikörper und T-Zellen) nach einigen Wochen eine Genesung eintreten. Vor allem bei vorgeschädigten Patienten können aber auch schwere Krankheitsverläufe auftreten (z.B. Entzündung von Lunge und Herzmuskel, Thrombosen, Tod). Zu dieser Risikogruppe zählen ältere Menschen und solche mit Vorerkrankungen wie Asthma, Herz-/Kreislauf-Schwächen, Diabetes.

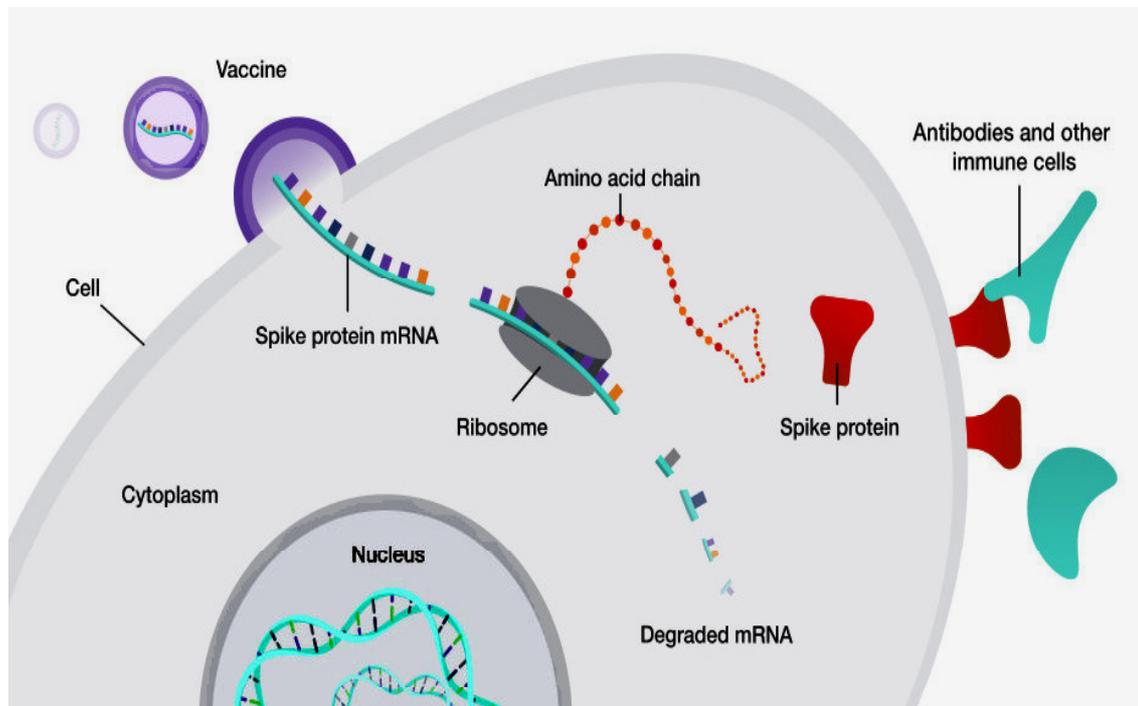
Die mRNA-Impfung (1)



Bei der **mRNA-Impfung** wird jener **virale RNA-Code**, der für die Produktion der Spike-Proteine zuständig ist, im Labor mithilfe von PCR-Verfahren synthetisch hergestellt.

Dabei wird zuerst die **Virus-RNA** mithilfe des Enzyms «*Reverse Transkriptase*» in eine **DNA** umgeschrieben und dann mithilfe des Enzyms «*RNA-Polymerase*» in eine **mRNA** kopiert, welche den genetischen Code für die **Spike-Proteine** enthält.

Die mRNA-Impfung (2)



Die **mRNA** gelangt als **Impfstoff** in die menschliche Zelle und produziert an den Ribosomen im Zellplasma die viralen **Spike-Proteine**. Diese erkennt das Immunsystem als Fremdkörper (**Antigene**) und erzeugt dann die spezifischen **Antikörper**. Bei der Immunabwehr sind auch **T-Zellen** maßgeblich am Immungedächtnis beteiligt.

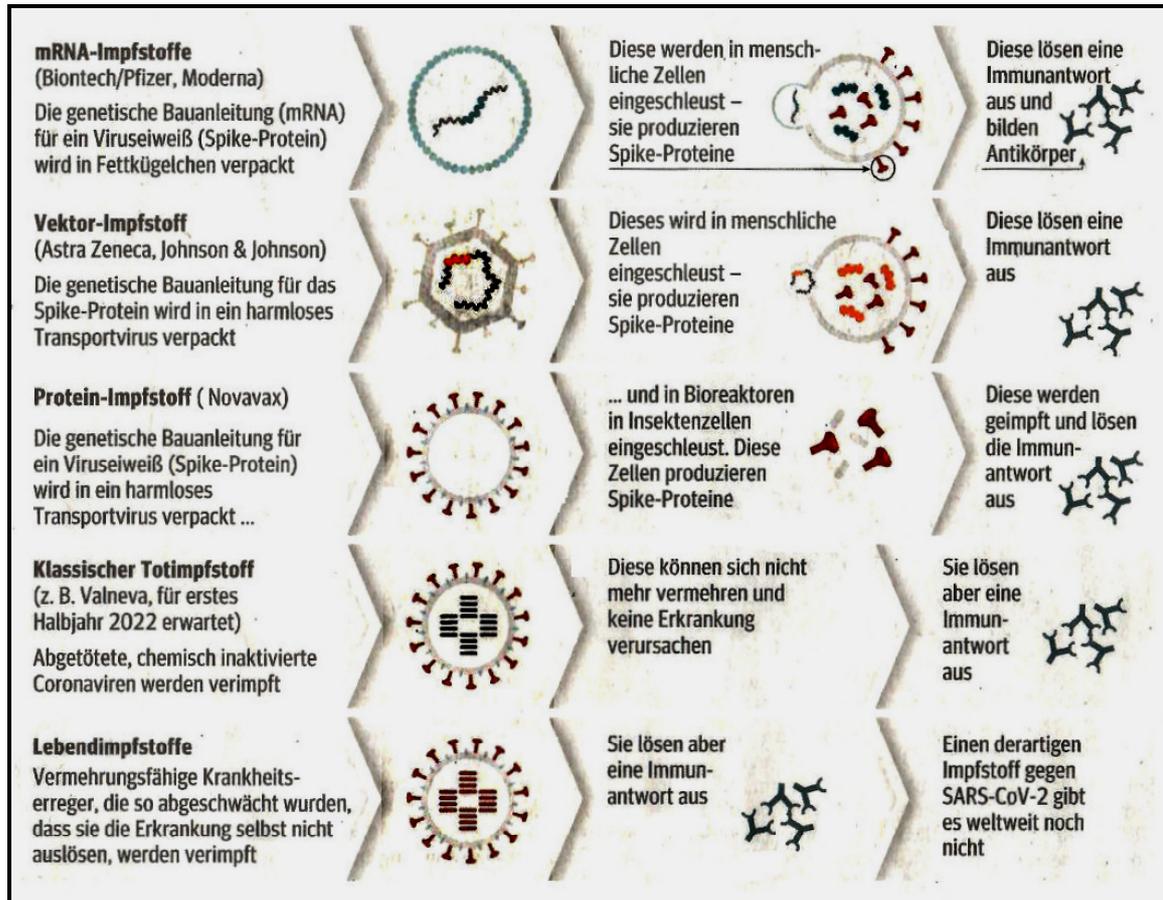
Erfolgt nach der Impfung eine **Virusinfektion**, dann ist das Immunsystem bereits vorbereitet und kann sofort mit der Bekämpfung des Virus beginnen.

Zum Feststellen einer aktuellen Infektion wird mit einem **PCR-Test** überprüft, ob ein Schleimhautabstrich der oberen Atemwege Virusmengen enthält oder nicht. Dabei gibt der **Ct-Wert** (cycle-threshold) die Anzahl der Messzyklen an, die innerhalb einer PCR-Probe durchgeführt wurden, um das Coronavirus nachweisen zu können. Ein $Ct < 30$ ist ein Hinweis auf eine hohe Viruslast und damit auf eine hohe Infektiosität. Bei einem $Ct > 30$ ist, trotz positivem PCR-Befund, davon auszugehen, dass die getestete Person nicht mehr ansteckend ist.

Bei **Antigen-Tests** fließt der Schleimhautabstrich über virus-spezifische Antikörper, welche im Testgerät fixiert sind. Dann wird überprüft, ob sich Antigen-Antikörper-Komplexe gebildet haben.

Bei den **Antikörper-Tests** wird mit geeigneten Geräten die Menge der Antikörper im Blut überprüft.

Verschiedene Impfstoffe



Neben den mRNA-Impfstoffen gibt es auch **andere Impfstoffe**. Es können fünf Arten von Impfstoffen unterschieden werden, die auf verschiedene Art und Weise wirken, wie es in der Grafik dargestellt wird.

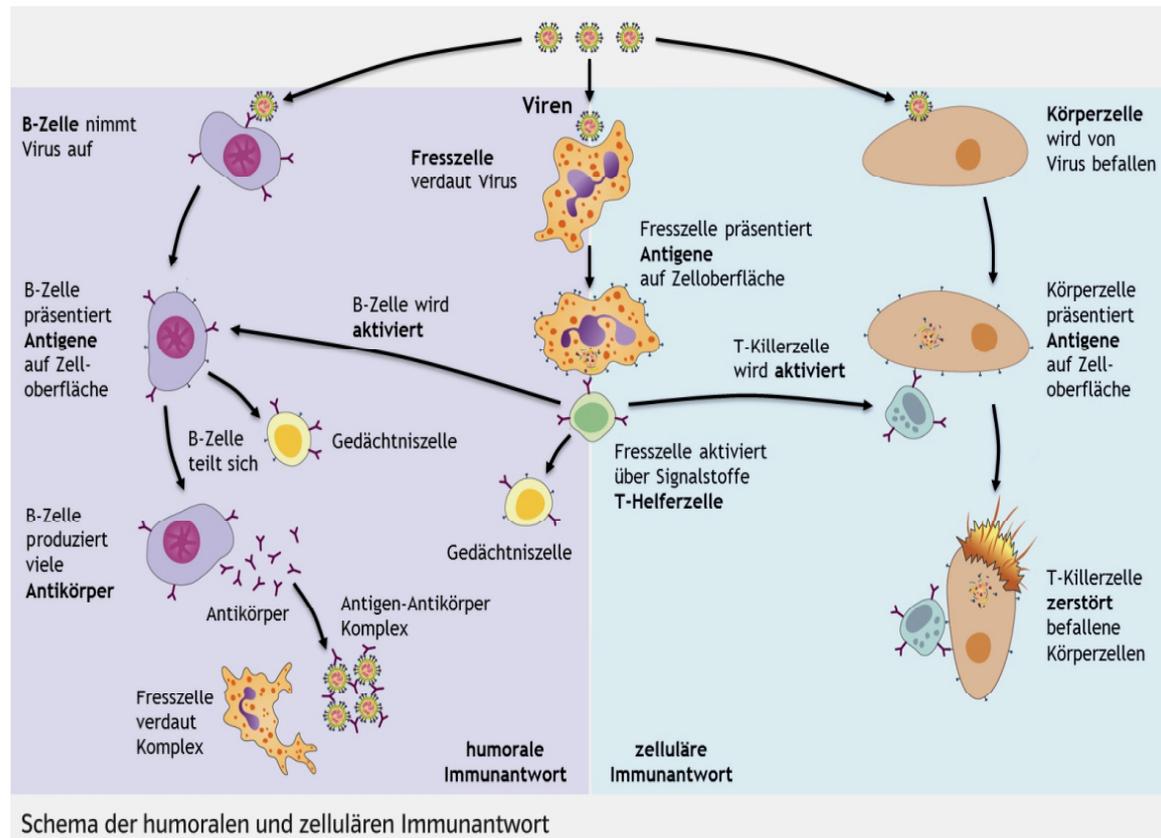
- (1) mRNA-Impfstoffe (Fa. Biontech/Pfizer, Moderna)
- (2) Vektor-Impfstoffe (Fa. Astra Zeneca, Johnson & Johnson)
- (3) Protein-Impfstoffe (Fa. Novavax)
- (4) Klassische Tot-Impfstoffe (Fa. Valneva)
- (5) Lebend-Impfstoffe

Vier der hier aufgelisteten Impfstoffarten werden gegen das Virus SARS-CoV-2 verwendet und sind zugelassen und seit 2021 am Markt erhältlich. Die fünfte Impfstoffart gibt es zur Zeit gegen das Virus SARS-CoV-2 noch nicht.

Bauanleitung für den Protein-Impfstoff der Fa. Novavax gegen SARS-CoV-2:

- [1] Herstellung der Sequenz des Spike-Proteins-S1 im Labor.
- [2] Transfer der Protein-Sequenz in Insektenzellen zur Protein-Vermehrung.
- [3] Aufwendige Reinigungsverfahren der Protein-Nanopartikeln.
- [4] Beimengung eines Adjuvans als Wirkverstärker.
- [5] Injektion und damit Aktivierung des Immunsystems zur Antikörper-Bildung.

Das Immunsystem (1)

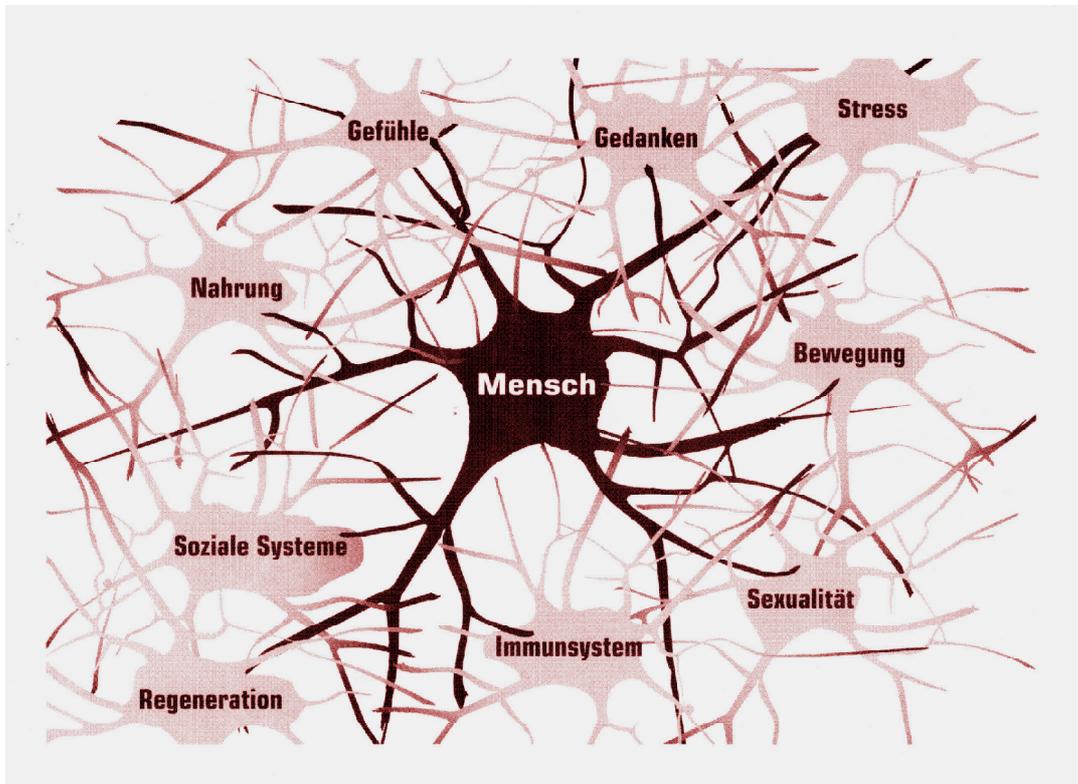


Das **Immunsystem** besteht aus unterschiedlichen Immunzellen, die von den weißen Blutkörperchen (Leukozyten) abstammen. Grundsätzlich gibt es eine angeborene, unspezifische (AUI) und zusätzlich eine erlernte, spezifische Immunabwehr (ESI).

Das **AUI** ist ein stammesgeschichtlich festgelegtes, vererbtes Abwehrsystem, das aus physiologischen Barrieren (z.B. Magensäure), zellvermittelter Phagozytose durch Fresszellen, reaktiven Entzündungsreaktionen und dem Komplementsystem besteht.

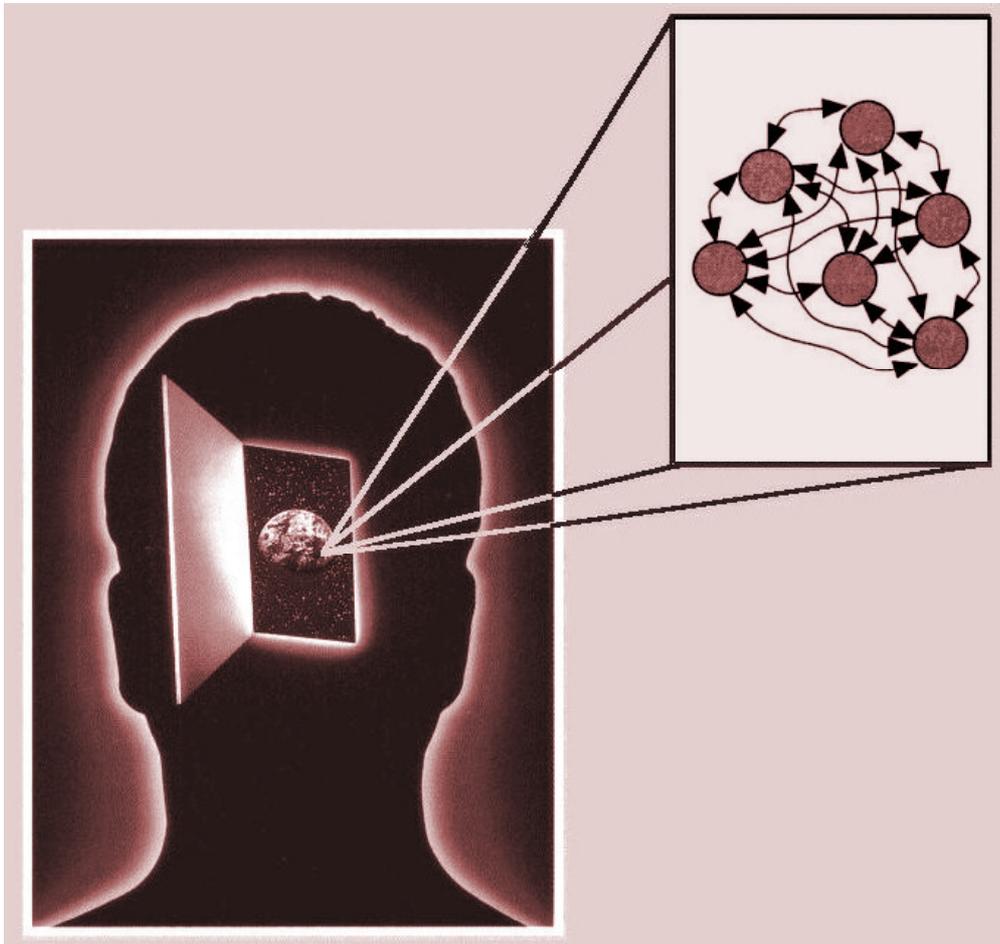
Das **ESI** entwickelte sich aus dem AUI. Es zeichnet sich durch eine Anpassungsfähigkeit gegenüber neuen oder veränderten Krankheitserregern aus. Bei einer Erstinfektion erkennen die Makrophagen typische Merkmale der Krankheitserreger, die sie aufnehmen und dann an ihrer Oberfläche den T-Lymphozyten präsentieren. Diese leiten daraufhin die **zelluläre Immunabwehr** ein, welche mit einer Zerstörung der befallenen Körperzelle durch die Killerzellen beendet wird. Zusätzlich aktivieren T-Lymphozyten die B-Lymphozyten und starten die **humorale Immunabwehr**, die in den Körperflüssigkeiten stattfindet. Bei dieser Abwehr erzeugen die B-Lymphozyten so genannte **Antikörper**, die sich mit dem **Antigen** zu einem Komplex verbinden, welcher dann von den Fresszellen zerstört wird. Die B-Lymphozyten bilden auch die Plasmazellen, die das **Immungedächtnis** repräsentieren, so dass bei einer neuerlichen Infektion sofort und schnell die passenden Antikörper erzeugt werden können.

Das Immunsystem (2)



Wie der menschliche Körper mit dem **Immunsystem** auf Antigene (Viren, Bakterien) reagiert, kann in dem ausführlichen Skriptum «**immun.pdf**» nachgelesen werden, welches der Autor auf seiner Homepage unter «Somatologie» veröffentlicht hat.

mRNA in der Medizin



In der modernen Medizin ist die so genannte **mRNA-Technik** eine echte Revolution. Einen sehr guten Überblick bietet ein Informationsschreiben «**mrna.pdf**», das von der Goethe-Universität in Frankfurt herausgegeben wurde, und welches auch auf der Homepage des Autors unter «Somatologie» nachgelesen werden kann.