

1 Medizin und Physik

1.1 Organisatorisches

Die Vorlesung "Einführung in die Medizinphysik" soll eine Übersicht über physikalische Themen geben, welche für die Medizin relevant sind. Es sind drei Schwerpunkte vorgesehen:

- Physik des Körpers
- Diagnostische Methoden
- Therapeutische Methoden

Die Vorlesung findet jeweils Montags von 8:15 - 9:00 Mittwochs von 8:30 - 10:00 statt. Die zugehörenden Übungen finden Freitags von 8:30-10:00 ebenfalls im Raum P1-02-323 statt.

Es gibt eine Reihe von guten Lehrbüchern und Nachschlagewerken, welche Teile des hier behandelten Stoffes abdecken. Ohne den Anspruch der Vollständigkeit können folgende Werke empfohlen werden:

- Medizinische Physik, Band 1-3; J. Bille, W. Schlegel (Hrsg.); Springer-Verlag 1999-2005
- Biophysics; R. Glaser; Springer-Verlag 2001
- Biophysik; W. Hoppe, W. Lohmann, H. Markl, H. Ziegler (Hrsg.); Springer-Verlag 1982
- Bildgebende Verfahren in der Medizin; O. Dössel; Springer-Verlag 2000

1.2 Medizin

1.2.1 Fachgebiete

Das Wort **Medizin** stammt aus dem Lateinischen *ars medicina* ab, was Heilkunst oder Heilkunde bedeutet. Die Medizin ist die Wissenschaft vom gesunden und kranken Lebewesen und umfasst die Bereiche

- Humanmedizin
- Zahnmedizin
- Veterinärmedizin
- Phytomedizin (Behandlung von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen)

Die **Humanmedizin** beschäftigt sich mit der Gesundheit und Krankheit des Menschen sowie der Zeugung, Schwangerschaft, Geburt und Tod.

Die Vielfalt der Krankheiten und Behandlungsmöglichkeiten äußert sich in einer Aufgliederung in eine große Anzahl von Fachgebieten und Spezialisierungen. Als gute Übersicht dient die Weiterbildungsordnung, die der 106. Deutsche Ärztetag in Köln im Jahr 2003 verabschiedet hat.

(Muster-) Weiterbildungsordnung, Stand Mai 2005
<http://www.baek.de/30/Weiterbildung/index.html>

1. Anästhesiologie
2. Anatomie
3. Arbeitsmedizin
4. Augenheilkunde
5. Biochemie
6. Chirurgie
7. Frauenheilkunde und Geburtshilfe
8. Hals-Nasen-Ohrenheilkunde
9. Haut- und Geschlechtskrankheiten
10. Humangenetik
11. Hygiene und Umweltmedizin
12. Innere Medizin

13. Kinder- und Jugendmedizin
14. Kinder- und Jugendpsychiatrie
15. Laboratoriumsmedizin
16. Mikrobiologie, Virologie und Infektionsepidemiologie
17. Mund-Kiefer-Gesichtschirurgie
18. Neurochirurgie
19. Neurologie
20. Nuklearmedizin
21. Öffentliches Gesundheitswesen
22. Pathologie
23. Pharmakologie
24. Physikalische und Rehabilitative Medizin
25. Physiologie
26. Psychiatrie und Psychotherapie
27. Psychosomatische Medizin und Psychotherapie
28. Radiologie
29. Rechtsmedizin
30. Strahlentherapie
31. Transfusionsmedizin
32. Urologie

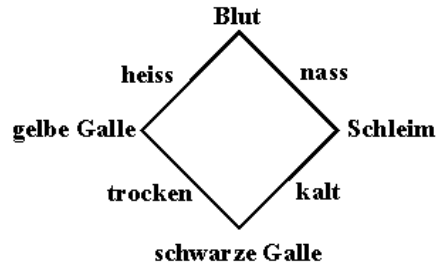


Abbildung 1.1: Die 4 Säfte von Hippokrates

eine (für das damalige Umfeld) rationale Theorie der Medizin. Der Kern dieser Theorie war die Lehre von den vier Säften, welche auch im Mittelalter noch akzeptiert wurde. Bei den vier Säften handelte es sich um das Blut, den Schleim, die gelbe Galle und die schwarze Galle. Diesen wurden die Eigenschaften "warm", "kalt", "trocken" und "nass" zugeschrieben. Die Aufteilung in vier Grundbestandteile knüpft an an die Elementlehre der vorsokratischen Naturphilosophie und wurde später auch von Aristoteles in seiner Theorie der Elemente verwendet. Krankheitssymptome werden in dieser Lehre nicht durch übernatürliche Ursachen hervorgerufen, sondern sie werden als Ungleichgewicht der Körpersäfte interpretiert. Dies kann der Arzt durch Lebensumstellung, Diät, Arzneimittel und operative Eingriffe unterstützen.

Aus der hippokratischen Säftelehre waren zahllose Behandlungsmaßnahmen begründet, insbesondere die bis in die frühe Neuzeit übliche Anwendung von Aderlässen, Schröpfköpfen und Abführmitteln. Auch die Temperamentenlehre mit ihrer Unterscheidung in Melancholiker (schwarze Galle dominiert), Choliker (gelbe Galle dominiert), Sanguiniker (Blut dominiert) und Phlegmatiker (Schleim dominiert) geht darauf zurück.

Es gibt mindestens 60 Schriften, die Hippokrates zugeschrieben werden und als Corpus Hippocraticum bekannt sind. Das Entstehungsdatum dieser Schriften reicht vom 4. Jh. v. Chr. bis zum 1. Jh. n. Chr. Welche davon Hippokrates selbst verfasst hat, ist weitgehend unbekannt. Diese Schriften bildeten die Grundlage des medizinischen Wissens in griechisch-römischer Zeit. Auch im römischen Reich wurde die medizinische Literatur in griechischer Sprache wei-

1.2.2 Die Anfänge der Medizin

Die Medizin ist ein Teilbereich der menschlichen Kultur, daher ist ihr Erscheinungsbild variabel. In primitiven Kulturen ist sie zwischen Empirie und Dämonenglaube angesiedelt, während sie in einer industriell orientierten Kultur von Naturwissenschaft und Technik sowie der Ökonomie dominiert wird.

Die Wurzeln der europäischen Medizin lassen sich zum Mindesten bis in griechische Zeit zurückverfolgen. Hippokrates von Kos (ca. 460-360 v. Chr.) schuf

tergegeben.

1.2.3 Medizin im Mittelalter

Im Mittelalter beherrschten Tradition, Religion und Glaube die Heilkunst. Krankheiten und Gebrechen wurden häufig als Strafe Gottes interpretiert. Diese Haltung wurde z.B. von Noah Gordon im Roman "Der Medicus" so ausgedrückt: "Medicus, Chirurg oder Bader - sie alle leugnen die unbestreitbare Wahrheit, dass die Dreifaltigkeit und die Heiligen allein die Kraft haben, zu heilen." Medizinisches Wissen wurde vor allem in den Klöstern gepflegt; so gehörte die Fürsorge für Kranke, Schwache und Arme zu den Grundregeln des Benediktinerordens. Eine auch heute noch populäre Vertreterin der Klostermedizin war Hildegard von Bingen (1098-1179). Als Äbtissin des Klosters auf dem Rupertsberg bei Bingen sammelte sie das Wissen über die medizinische Wirkung von pflanzlichen, mineralischen und tierischen Arzneimitteln, welches sie in mehreren Büchern zusammenfasste.

Erst im zwölften Jahrhundert wurden die griechischen Schriften (sowohl Medizin wie Naturwissenschaft) wieder entdeckt, zum Teil über Umwege, insbesondere über orientalische Länder und Sprachen. Weil die Synode von Clermont 1130 den Klerikern das Studium der Medizin verbot verschob sich die Medizin von den Klöstern in den weltlichen Bereich. Dies hing z.T. damit zusammen, dass die Medizin auch begann, chirurgische Eingriffe vorzunehmen. Einem Mönch oder Priester war es aber nicht gestattet, den Körper zu verletzen. Ausgehend von Salerno wurden im Spätmittelalter in den neu gegründeten Universitäten auch medizinische Fakultäten eingerichtet.

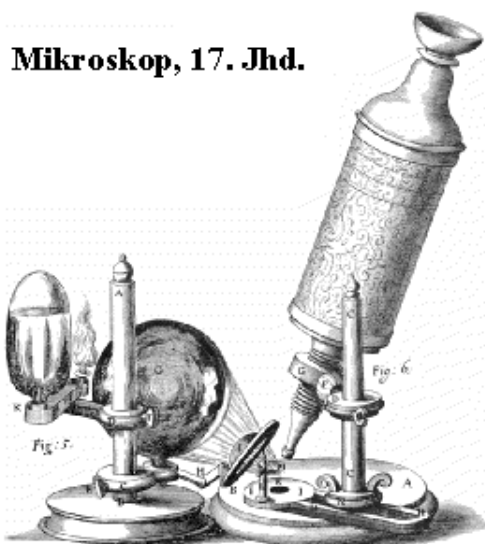
1.2.4 Wissenschaftliche Ansätze

Figur 1.2 zeigt ein Gemälde von Rembrandt: "Die Anatomie des Dr. Tulp" (1632, 2,17 x 1,63 Meter, Mauritshuis in Den Haag). Es zeigt den der Arzt Dr. Nicolaas Tulp, der einen Toten (Adriaan Adriaanszoon, ein Straßenräuber, der gehängt worden war) seziiert und den anwesenden Zuschauern die Skelettmuskulatur erklärt. Anatomie-Vorführungen waren



Abbildung 1.2: Die Anatomie des Dr. Tulp, Rembrandt (1632).

im 17. Jahrhundert ein gesellschaftliches Ereignis: Sie fanden in hösaalähnlichen so genannten anatomischen Theatern statt. Damit gelang es den Ärzten, ein weit besseres Verständnis für den Aufbau und die Funktion des menschlichen Körpers zu erlangen.



Mikroskop, 17. Jhd.

Abbildung 1.3: Im 17. Jhd. wurde das Mikroskop entwickelt.

Die Entwicklung naturwissenschaftlicher Technik (z.B. des Mikroskops im 17. Jhd. ermöglichte präzisere Untersuchungen und führte u.a. zur Entdeckung von Bakterien und Viren.

1.2.5 Naturwissenschaftliche Basis

Im 19. und 20. Jahrhundert wurde die Medizin vollständig auf naturwissenschaftliche Basis gestellt. Fortschritte in der Physik, Chemie und Biologie, sowie die Integration der Naturwissenschaften mit der Medizin führten zu neuen Untersuchungs- und Behandlungsmethoden sowie zu einem besseren Verständnis für die meisten Krankheiten.

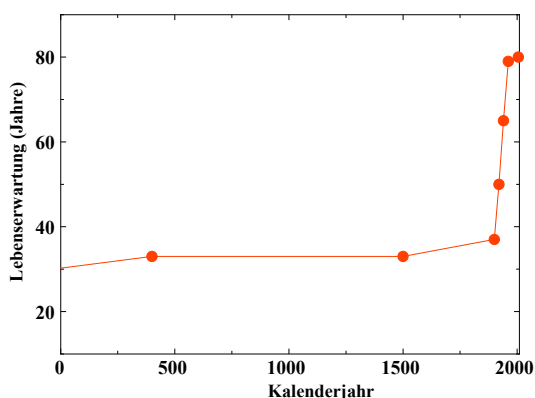


Abbildung 1.4: Anstieg der Lebenserwartung in den letzten 2000 Jahren.

Der Erfolg dieser Neuerung zeigte sich u.a. im rasanten Anstieg der Lebenserwartung (Siehe Figur 1.4). Zu den wichtigsten Beispielen gehörten die Röntgentechnik, die Entwicklung von Antibiotika und die Entwicklung der Molekularbiologie, welche das Verständnis für diejenigen Prozesse revolutioniert hat, welche den Funktionen des menschlichen Körpers zu Grunde liegen.

Die deutsche Gesellschaft für Medizinphysik (DGMP) formuliert das so: "Der Fortschritt der Medizin gründet sich in praktisch allen Bereichen auf Beiträge aus Naturwissenschaft und Technik." Natürlich sollte in diesem Zusammenhang auch gesehen werden, dass die naturwissenschaftlich-technischen Einflüsse auf unseren Alltag auch zu neuen Problemen, wie z.B. Zivilisationskrankheiten, Umweltgifte oder Allergien geführt haben. Solche negativen Entwicklungen sollten in einem ganzheitlichen Ansatz ebenso berücksichtigt werden.

Um die Möglichkeiten, welche der naturwissen-

schaftliche Ansatz in der Medizin bietet, effektiv nutzen und weiter entwickeln zu können (sowohl im klinischen Alltag als auch in den Forschungseinrichtungen der Biowissenschaften) ist die Mitarbeit der PhysikerInnen immer stärker gefragt. Im Zuge dieser Entwicklung hat sich in manchen Feldern der Krankenversorgung eine enge Zusammenarbeit zwischen Arzt, Physiker und medizinischem Assistenzpersonal herausgebildet. In der Forschung spielt außerdem die Zusammenarbeit mit weiteren naturwissenschaftlichen Disziplinen (Chemie, Biologie, etc.) und Ingenieuren eine entscheidende Rolle.

Beispiele für Gebiete, in denen PhysikerInnen direkt in einer klinischen Umgebung arbeiten sind

- ionisierende Strahlung : Erzeugung, Wirkung
- Laser
- Roboter und Navigationstechniken
- Bildgebung
- Audiologie und die Ophthalmologie

1.3 Ausbildungsangebot

1.3.1 Überblick über die Vorlesung

Das Ziel dieser Lehrveranstaltung ist es, einen Überblick zu geben über aktuelle physikalische Forschung, welche auf medizinische Probleme angewandt wird. Dabei werden drei Teilgebiete behandelt:

- Im ersten Teilgebiet (voraussichtlich Kapitel 2-5 der Vorlesung) wird eine physikalische Beschreibung des menschlichen Körpers diskutiert. Dies umfasst ausgewählte Teile der Biomechanik, des Blutkreislaufs und der Sinnesorgane Ohr und Auge.
- Im zweiten Block werden die wichtigsten **diagnostischen Methoden** vorgestellt, wobei das Schwergewicht auf bildgebenden Verfahren

liegt. Dazu gehören die Röntgendiagnostik, Nuklearmedizin, Ultraschall, Kernspintomographie (MRI) sowie Abbildung magnetischer und elektrischer Quellen (Kapitel 6 bis 10).

- Der abschließende Teil behandelt **therapeutische Methoden** mit Hilfe von ionisierenden Strahlen und Lasern (Kapitel 11 und 12).

Neben den Übungen wird als zusätzliche Vertiefungsmöglichkeit ein eintägiger Besuch am Forschungszentrum Jülich angeboten.

1.3.2 Physik & Medizin als Nebenfach

Neben dieser Einführungsvorlesung gibt es eine Reihe von weiteren Veranstaltungen, welche für PhysikerInnen, die sich für medizinische Anwendungen interessieren, relevant sind. Spezialvorlesungen, welche einzelne Themen vertiefen, sind

- Principles of Magnetic Resonance Imaging J. Shah; 2V im WS
- Innovative Verfahren in der Strahlentherapie S. Levegrün, 1V im SS
- Brachytherapie und Spezialverfahren in der Strahlentherapie D. Flühs, 1V im SS
- Dosimetrie mit Anwendungen M. Bambynek, 1V im WS

Wer sich selbständig in eines der Themen vertiefen möchte, kann dies in unterschiedlichen Seminaren tun, wie z.B.

- Festkörperspektroskopie
- Beschleunigerphysik und Synchrotronstrahlung
- Aktuelle Fragen der Teilchenphysik, Astroteilchen- und Medizinphysik

Damit steht eine Reihe von Kombinationsmöglichkeiten für ein physikalisches Nebenfach (Umfang: 6-8 SWS) zur Verfügung.

1.3.3 Theoretische Medizin

Ein dazu passendes nicht-physikalisches Nebenfach ist die theoretische Medizin, welche von der Universität Bochum angeboten wird. Sie umfasst insgesamt 6 Lehrveranstaltungen:

- Anatomie (I und II) (4 SWS)
- Biochemie (I und II) (4 SWS)
- Physiologie (I und II) (4 SWS)

Eine weitere mögliche Ergänzung sind die Veranstaltungen des Lehrstuhls für Biophysik am Fachbereich Biologie der Universität Bochum. Sie umfassen

- Einführung in die Biophysik (Struktur der Materie) (3 V + 1 Ü im SS)
- Biophysik II: Biomolekulare Struktur und Dynamik (2 V + 1 Ü im WS)
- Seminar (1 von 2) (1 SWS im WS)
- 4 Praktikumsversuche

1.3.4 Medizinische Physik und Technik

Die Universität Kaiserslautern bietet einen Fernstudiengang "Medizinische Physik und Technik" an (<http://www.zfuw.uni-kl.de/mnt/mpt-top.html>), bisher als Zertifikatsstudium, neuerdings auch als Master-Studium. Das 4-semestrige Zertifikatsstudium ist für berufstätige Physiker und Elektroingenieure gedacht, daher ist die Voraussetzung für eine Teilnahme eine abgeschlossene Hochschulbildung (Diplom oder Master). Der Master-Studiengang dauert 6 Semester und ist für berufstätige Absolventen bestimmter ingenieur- oder naturwissenschaftlichen Studiengänge gedacht. Eingangsvoraussetzung sind ein Abschluss an einer Uni oder Fachhochschule.

Der Aufbau des Zertifikatsstudiums

Im **ersten Semester** müssen zu drei Lehrbriefen Einsendeaufgaben bearbeitet werden:

- Informatik: Grundlagen und Einsatz in der Medizin
- Biomathematik, insbesondere Statistik
- Organisatorische und rechtliche Grundsätze im Gesundheitswesen (Krankenhaus: Organisation, Verantwortlichkeiten, Haftung, Haushaltsrecht, ...)

In der Präsenzphase des ersten Semesters, die unter anderem dem Kennenlernen der KommilitonInnen dient, wird eine Klausur geschrieben über die beiden Lehrbriefe

- Medizintechnik (Beatmung und Narkose, Geräte zur Kreislaufunterstützung, Monitoring, Dialyse, ...)
- Gesetzlicher Rahmen für den Umgang mit Medizintechnik (Medizinproduktegesetz (MPG), Medizinprodukteberegungsverordnung (MPBetrV), Aufgaben von Sicherheitsbeauftragten, Klinische Prüfung und Bewertung, ...)

Im **zweiten Semester** muss der Lehrbrief

- Biochemie und Biophysik (Molekularbiologie, Stoffwechsel, Biophysik der Zelle, Bioelektrizität und -magnetismus, Sinnesorgane, Strahlenbiophysik, ...)

samt Einsendeaufgaben bearbeitet werden. In der Präsenzphase gibt es zwei Klausuren zu den beiden Themen

- Anatomie und Physiologie (Der menschliche Körper)
- Einführung in den Strahlenschutz (Strahlenphysik, -biologie, Dosimetrie, Strahlenschutz, Rechtsvorschriften, ...)

Außerdem findet vorher ein Tutorium Anatomie und Physiologie statt sowie ein Praktikum Strahlenschutz.

Im **dritten** und **vierten Semester** wählt man eine von drei möglichen Vertiefungen mit den folgenden Lehrbriefen:

- Physik und Technik der Nuklearmedizin; Physik und Technik der Röntgendiagnostik; Physik und Technik der Strahlentherapie
- Medizinische Optik; Grundlagen von Lasern; Medizinische Anwendung von Lasern
- Bilderzeugung und -verarbeitung in der Medizin; Physik und Technik der Ultraschallanwendung in der Medizin; Kernspintomographie und -spektroskopie; Bilderzeugung und -bewertung in der Strahlenphysik

Begleitend zu jeder Vertiefung gibt es zwei Präsenzphasen mit Praktika und Klausuren. Unabhängig von der gewählten Vertiefung müssen Einsendeaufgaben zu dem Lehrbrief

- Physikalische Messtechniken in der Medizin

bearbeitet werden.

Aufbau des Masterstudiums

Die **ersten vier Semester** des Masterstudiums entsprechen denen des Zertifikatsstudiums. Im **5. Semester** wird eine weitere Vertiefung gewählt, und im **6. Semester** gibt es zusätzlich die Veranstaltungen

- Klinische Studien
- Qualitätsmanagement

Am Ende wird eine Masterarbeit angefertigt.

1.3.5 Fachanerkennung Medizinische Physik

Medizinphysiker ist derzeit in Deutschland keine geschützte oder staatlich definierte Berufsbezeichnung, im Gegensatz zu anderen europäischen Ländern. Das Berufsbild des Medizinphysikers mit Fachanerkennung (FAMP) wird (in Anlehnung an sich abzeichnende europäische Standards auf freiwilliger Basis von der DGMP (Deutsche Gesellschaft für Medizinische Physik) in ihrer Weiter- und Fortbildungsordnung geregelt.

Das von der DGMP für die FAMP vorgesehene Verfahren sieht (nach einem Diplom oder Master in Physik) eine dreijährige Weiterbildungsphase unter Anleitung eines dazu ermächtigten Mentors vor. Es müssen 360 Stunden Fortbildungsleistungen gemäß einem Punktekatalog erbracht werden. Bis zur Hälfte der Punkte (180 Stunden) können erlassen werden, wenn einschlägige Lehrveranstaltungen aus dem Studium nachgewiesen werden. Der Katalog ist dabei relativ weit gefasst, z.B. ist Computational Physics ausdrücklich genannt. Außerdem kann eine einschlägige Diplomarbeit die Weiterbildungsphase um ein halbes Jahr, eine Promotion um ein Jahr abkürzen. Der Erwerb eines Physikdiploms mit einschlägigem Studienschwerpunkt erscheint daher als sinnvolle Vorstufe zum Erwerb der FAMP.

Weitere Einzelheiten findet man unter DGMP Weiterbildung http://www.dgmp.de/Page_Weiterbildung/WFBO.pdf.

1.3.6 Das Berufsbild

Physiker im Bereich der Medizin arbeiten allgemein eng mit Ärzten zusammen.

Als die wichtigsten Tätigkeiten eines Medizinphysikers bezeichnet z.B. die "American Association of Physicists in Medicine" die folgenden drei Punkte:

- Clinical service and consultation
- Research and development
- Teaching

Weitere Details findet man unter AAPM: Types of work http://www.aapm.org/medical_physicist/types_work.asp.

1.4 Physik und Leben

1.4.1 Physik als Grundlagenwissenschaft

Die Physik hat den Anspruch, ausgehend von möglichst wenigen einfachen Prinzipien, ein möglichst vollständiges Verständnis der Natur zu erlangen. Newton formulierte das so: "Die Natur ist nämlich einfach und schwelgt nicht in überflüssigen Ursachen der Dinge". Dass dieses Programm erfolgreich ist formulierte wiederum Peter Atkins so: "Ein Großteil des Universums bedarf keiner Erklärung. Elefanten zum Beispiel. Sobald Moleküle gelernt haben, miteinander in Wettbewerb zu treten und andere Moleküle nach ihrem Bild zu erschaffen, werden nach einiger Zeit Elefanten und Dinge, die ihnen ähneln, durch die Lande ziehen."

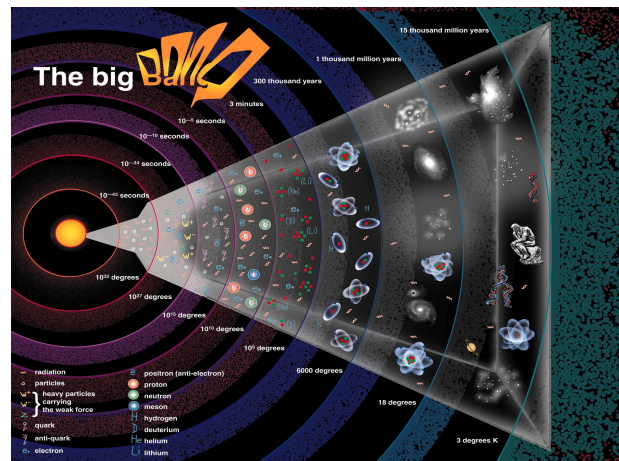


Abbildung 1.6: Das "physikalische Weltbild".

Damit liefert die Physik die Grundlagen für die übrigen Naturwissenschaften, wie z.B. Chemie und Biologie. Diese wiederum, zusammen mit der Physik, stellen die wichtigsten Werkzeuge für das Verständnis des Lebens, des menschlichen Körpers und seiner Funktionen zur Verfügung. Dies impliziert nicht, dass die Physik selber medizinische Phänomene erklären kann; dazu benötigt man zusätzliche Konzepte, welche durch die Chemie, Biologie und Medizin



Abbildung 1.5: Tätigkeiten eines Medizinphysikers.

erarbeitet werden. Diese Konzepte sollten allerdings nicht im Widerspruch zu physikalischen Erkenntnissen sein.

Auf diese Weise erhält man auf mehrere Arten ein hierarchisches Verständnis unserer Umwelt: Eine Hierarchie der Längenskalen erklärt Eigenschaften von Molekülen mit Hilfe atomarer Eigenschaften, teilt diese in Atomkerne und Elektronen auf etc. Ebenso erhält man in der Zeit eine hierarchische Entwicklung: Aus dem "big bang" entwickeln sich nach und nach komplexere Strukturen (Teilchen, Atome, Moleküle, Gaswolken, Sonnensysteme und Galaxien etc.). Nach der Bildung der Erde kann die Physik, in Kombination mit anderen Naturwissenschaften, Szenarien entwickeln, wie hier Moleküle, Zellen und höhere Organismen entstanden sind.

Auf allen oben genannten Stufen spielen physikalische Prinzipien oder Erkenntnisse eine wichtige Rolle. Ein Beispiel ist die so genannte Anomalie des Wassers: Wasser ist einer der wenigen Stoffe, bei denen der gefrorene Zustand leichter ist als der flüssige. Dies verhindert ein Durchfrieren der Meere auch bei niedrigen Temperaturen und stellt damit eine wichtige Grundlage dafür dar, dass Leben sich in den Meeren und Seen entwickeln konnte. Physikalische Prinzipien wie die Energieerhaltung oder der zweite Hauptsatz der Thermodynamik können z.B. auch erklären, auf welchen Größenskalen sich komplexe Lebewesen wie Säugetiere entwickeln und existieren können.

Es existieren eine Reihe von Skalierungsgesetzen in der Natur, welche z.B. die maximale Größe eines Lebewesens am Land bestimmen: das Gewicht wächst mit der dritten Potenz der linearen Dimension, die Muskelkraft mit dem Muskelquerschnitt und damit mit der zweiten Potenz. Die Figur stellt ein anderes Skalierungsgesetz dar, welches zeigt, dass die

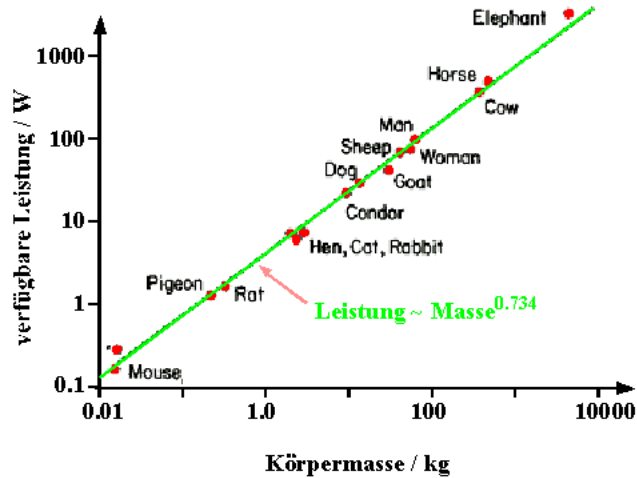


Abbildung 1.7: Skalierung der metabolischen Rate mit der Größe des Organismus

metabolische Rate mit etwa dem Gewicht hoch $3/4$ zunimmt. Dies kann man herleiten, wenn man annimmt, dass der Körper durch ein fraktales Netzwerk von Blutgefäßen versorgt wird, welche alle Zellen erreichen.

1.4.2 Organisationsstufen des Lebendigen

Auf der Erde haben sich während der vergangenen 4 Milliarden Jahre viele Millionen unterschiedliche Lebewesen entwickelt. Heute bevölkern etwa 0.5 Millionen Pflanzenarten und 1.5 Millionen Tierarten die Erde. Alle komplexen Organismen weisen eine hierarchisch geordnete Struktur auf.

Für die verschiedenen Funktionen des Organismus sind unterschiedliche Organe ausgebildet, die aus einzelnen Geweben aufgebaut sind. Die kleinste selbständige Lebenseinheit ist die Zelle, (Kapitel 1.5) in ihr laufen die Lebensvorgänge ab. Die (kern-

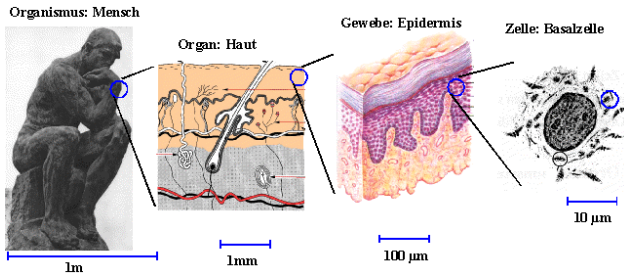


Abbildung 1.8: Hierarchie biologischer Strukturelemente am Beispiel des Organismus Mensch.

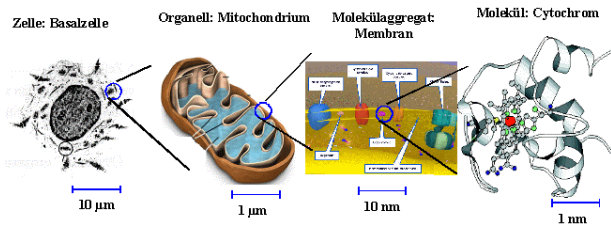


Abbildung 1.9: Fortsetzung der Hierarchie auf kleineren Skalen

haltigen) Zellen der höheren Lebewesen sind wiederum hoch strukturiert, die Strukturelemente sind die Zellorganellen. Baumaterialien dafür sind Biomembranen, Aggregate aus Lipidmolekülen, in die Proteine ein- oder angelagert sein können. Proteine werden für den Erhalt des Lebens benötigt, ebenso wie andere (Makro-) Moleküle wie Nukleinsäuren, Zucker und die schon erwähnten Lipide.

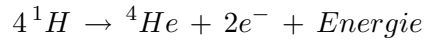
Veranschaulichung der Komplexität von Säugetierzellen: Eine Zelle enthält etwa 10^{10} Proteinmoleküle, welche zu 10000 unterschiedlichen Proteintypen gehören. Der Aufbau und die Aufgaben von Proteinen wird im Kapitel 1.6.3 ausführlicher behandelt.

1.4.3 Energiefluss in der belebten Welt

Der Energiefluss ist bei allen lebenden Systemen ein entscheidender Faktor für die Funktionsfähigkeit der Organismen. Dabei wird Energie in chemischer oder optischer Form in das System eingespeist, dort für eine Vielzahl chemischer Prozesse verwendet und in chemischer oder thermischer Form wieder

abgegeben. Aus der Sicht der Thermodynamik sind die Triebkräfte chemischer Reaktionen die Abnahme der **Freien Energie** $F(T, V)$ beziehungsweise der **Freien Enthalpie** $G(T, p)$.

Letzte Quelle der Freien Energie ist die Kernfusion in der Sonne. Der wichtigste Prozess kann dabei über die Gleichung



zusammengefasst werden. Nach mehrfacher Umwandlung der freiwerdenden Energie erreicht ein Teil davon die Erde, im Wesentlichen als sichtbares Licht. Das Licht mit Wellenlängen von $\lambda = 400\text{ nm}$ bis 750 nm dient zur Erwärmung (Entropieerzeugung), und wird bei der **Photosynthese** in den grünen Pflanzen direkt in chemische Energie umgesetzt. Ein Mol Lichtquanten transportiert dabei etwa 180 kJ Energie.

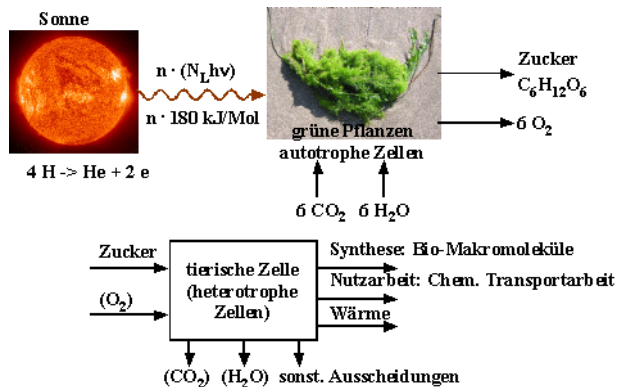


Abbildung 1.10: Umwandlung der Sonnenenergie in Zucker.

Während **autotrophe** Organismen (Pflanzen, einige Mikroorganismen) in der Lage sind, aus anorganischen Vorstufen alle von ihnen benötigten organischen Verbindungen zu synthetisieren (z.B. Kohlenhydrate), sind die **heterotrophen** Organismen wie Tiere oder der Mensch auf die Zufuhr von organischen Substanzen aus der Nahrung angewiesen. Die meisten dieser Stoffe müssen durch katabole Wege in kleinere Bruchstücke (Metabolite) zerlegt werden.

1.4.4 Energiefluss im Organismus

Der Mensch hat einen Energieumsatz von 10-20 MJ/Tag (für vorwiegend sitzende Tätigkeit / Schwerarbeiter). Diese Energie muss bereitgestellt und umgesetzt werden. Im Organismus müssen dafür Nährstoffe und Sauerstoff verteilt werden. Dazu sind eine Reihe von Prozessen notwendig, welche ineinander greifen.

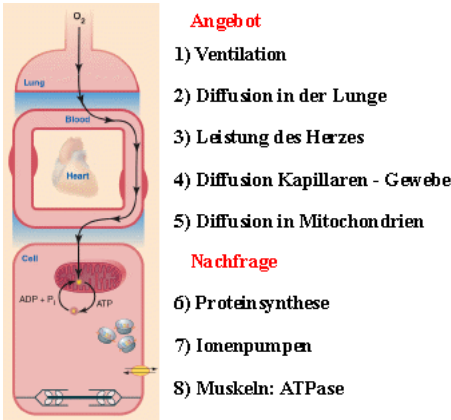


Abbildung 1.11: Energieumsatz im Organismus

In Figur 1.11 sind die wichtigsten Stufen dargestellt, in denen die Energie, respektive der für die Energieerzeugung notwendige Sauerstoff im Organismus transportiert wird. Die verschiedenen Prozesse skalieren unterschiedlich mit der Größe eines Organismus. Das gleiche gilt für die wichtigsten "Verbraucher". Damit die Lebensprozesse aufrecht erhalten werden können müssen alle diese Prozesse im Gleichgewicht sein.

In Figur 1.12 ist ein Beispiel für ein Skalierungs-gesetz dargestellt: Der Blut-Sauerstoffgehalt von Säugtieren nimmt mit der 1/12 ten Potenz der Masse der Tiere ab. Berücksichtigt man weitere Faktoren wie die Größe des Blutkreislaufs, Druck und Pulsrate, so ergibt dies eine Änderung der Transportleistung von etwa der 3/4ten Potenz.

1.4.5 Energiefluss in der Zelle

Der Energiefluss in der Zelle ist in der Abbildung 1.13 veranschaulicht.

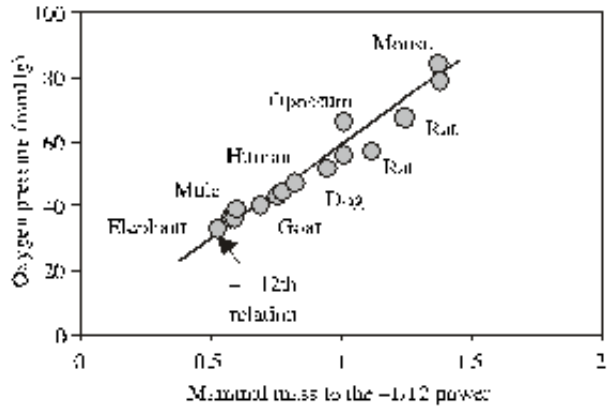


Abbildung 1.12: Sauerstoffdruck im Blut für verschiedene Organismen

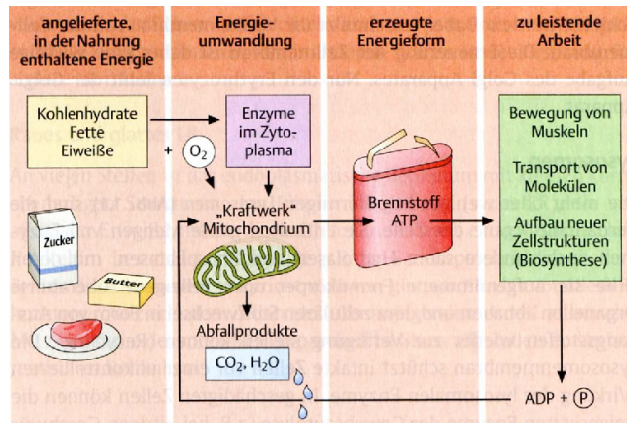


Abbildung 1.13: Energiefluss in der Zelle. [11]

Die Nahrungsbestandteile werden über den Blutkreislauf in die Zelle transportiert und dort in den Mitochondrien verwendet, um aus Adenosindiphosphat (ADP) und einer weiteren Phosphatgruppe Adenosin-Triphosphat (ATP) zu erzeugen. Bei diesem Prozess wird Sauerstoff verbraucht und Kohlendioxid und Wasser erzeugt. Der Prozess umfasst in Wirklichkeit eine Vielzahl von Schritten (wichtigste Schritte: *Glycolyse*, *Citratzyklus* und *oxidative Phosphorylierung (Atmungskette)*).

Adenosintri-phosphat ist der universelle biologische Energiespeicher. Es besteht aus der Grundeinheit Adenosin (=Adenin + Ribose) und drei Phosphatgruppen. ATP wird aus dem energieärmeren Adenosindiphosphat (ADP) gebildet.

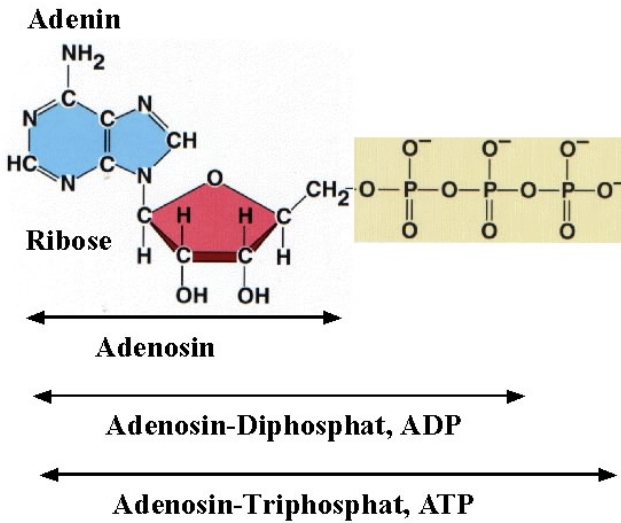
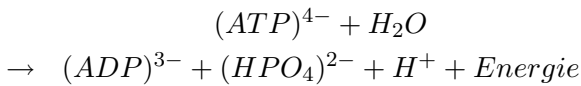


Abbildung 1.14: Adenosintriphosphat.

Dieses Molekül dient als Zwischenspeicher für die Energie. Viele Prozesse in der Zelle werden direkt durch ATP angetrieben, indem dieses Molekül von Enzymen gespalten wird:



Die dabei frei werdende Energie kann z.B. dafür eingesetzt werden um Muskeln zu bewegen, für den Transport von Molekülen oder für die Biosynthese.

Grundsätzlich kann die Glucose auch ohne Sauerstoff in ATP umgewandelt und damit als Energiequelle genutzt werden; würde der Mensch auf diesen Prozess zurückgreifen könnte er den gesamten Lungenapparat sparen. Allerdings erhält man bei der anaeroben Glycolyse aus einem Mol (*D*-)Glucose lediglich 2 Mol ATP. Mit aeroben Prozessen, also unter Einsatz von Sauerstoff, erhält der menschliche Organismus dagegen aus einem Mol (*D*-)Glucose 38 Mol ATP, davon 36 Mol aus der Atmungskette! Dies bedeutet einen erheblichen Vorteil für aerobe Organismen, die einen wesentlich größeren Energiebeitrag pro Molekül freisetzen können (11,4eV pro Molekül) als nur durch Glycolyse (0,6eV pro Molekül).

1.4.6 Atmung

Bei der Verwertung der Kohlenhydrate in den Mitochondrien wird Sauerstoff verbraucht, welcher durch die Lunge und den Blutkreislauf zur Verfügung gestellt wird. Das gleiche System entsorgt auch das Abbauprodukt CO_2 . Wir diskutieren zunächst den Aufbau der Lunge (Abbildung 1.15).

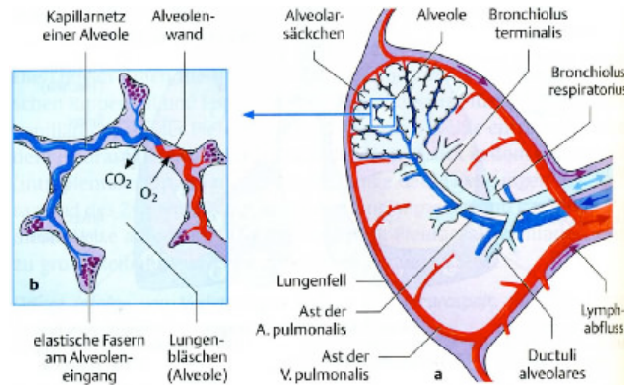


Abbildung 1.15: Aufbau der Lunge. [11]

In der Lunge verzweigen sich die Atemwege von der Luftröhre in immer feinere Strukturen, bis zu den Alveolensäcken, in denen sich mehrere Alveolen befinden.

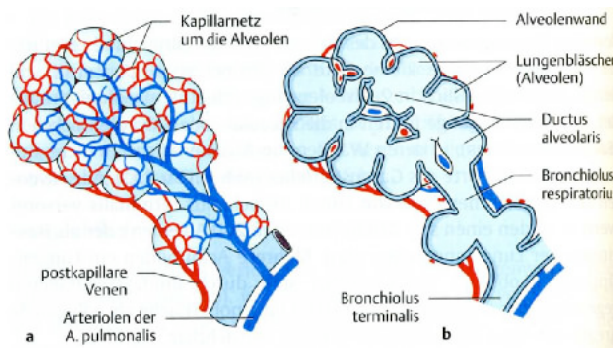


Abbildung 1.16: Alveolensäcken. [11]

Diese kleinen Strukturen ergeben insgesamt eine große Oberfläche von ca. $100m^2$. Auf dieser Oberfläche befindet sich ein Netz von Kapillaren (Abbildung 1.16).

1.4.7 Sauerstoffaufnahme

Den Sauerstoffgehalt von Luft und Gewebe quantifiziert man einheitlich über den Partialdruck, also denjenigen Sauerstoffdruck, mit dem das Gewebe (oder Blut) sich im Gleichgewicht befindet.

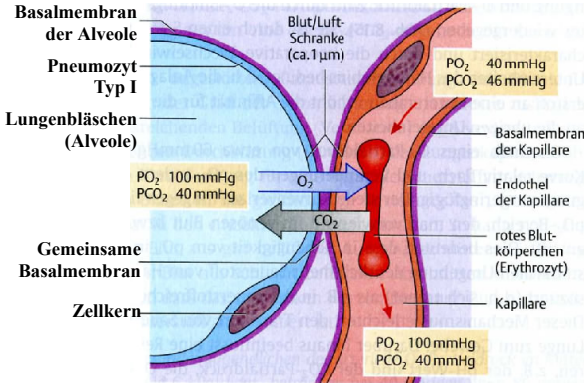


Abbildung 1.17: Diffusion der Atemgase durch die Blut/Luft-Schranke. [11]

Sauerstoff (O_2) und Kohlendioxid (CO_2) können durch die dünne Grenzschicht zwischen Alveolen und Kapillaren diffundieren. Dadurch gleichen sich die Partialdrücke zwischen den Alveolen und dem Blut an.

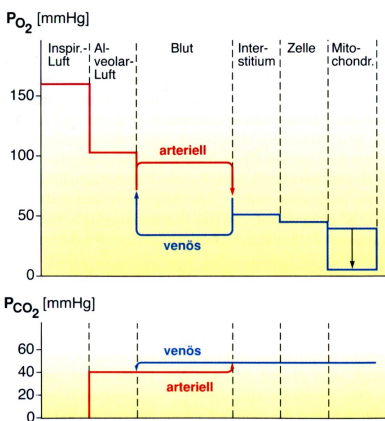


Abbildung 1.18: Sauerstoffpartialdruck entlang dem Atemweg. [9]

Der Sauerstoffpartialdruck der Luft (nach Aufwär-

men auf 37 °C und Befeuchtung) beträgt ca. 20 kPa. Entlang des Atemwegs sinkt der Partialdruck, bis auf etwa 13 kPa im arteriellen (=sauerstoffreichen) Blut, welches die Lunge verlässt. Im Gewebe liegt der Sauerstoffdruck bei etwa der Hälfte.

Die Diffusionskonstante von CO_2 durch die Membran ist rund 20 mal höher als für O_2 , so dass die entsprechenden Partialdruckunterschiede im Blut deutlich geringer sind.

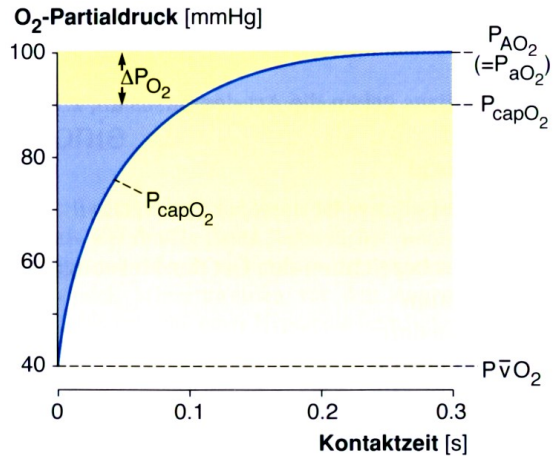


Abbildung 1.19: Zeitabhängigkeit der Sauerstoffaufnahme. [9]

Der Austausch von Sauerstoff zwischen der Atemluft und dem Blut ist diffusionskontrolliert und verläuft näherungsweise exponentiell, mit einer Zeitkonstante von etwa 0.1 s.

1.4.8 Wasser im Körper

Wasser ist der wichtigste Bestandteil aller lebenden Organismen und nimmt damit eine Sonderstellung ein. Der Wassergehalt von Neugeborenen beträgt ungefähr 75%, bei Erwachsenen ist dieser deutlich geringer: 50-65%. Der Wassergehalt in den Geweben ist sehr verschieden: während Fett- und Knochengewebe nur 10-20% Wasser enthalten, haben die meisten anderen Gewebearten einen höheren Wassergehalt von 70-80%. Der unterschiedliche Wassergehalt ist insbesondere wichtig für die bildgebenden Verfahren.

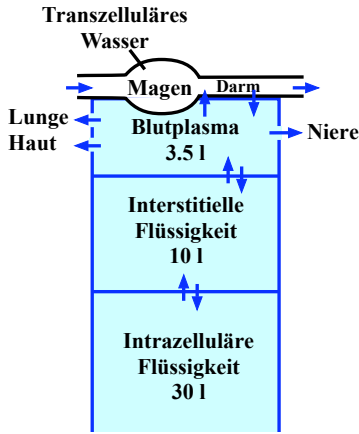


Abbildung 1.20: Verteilung von Wasser im menschlichen Körper. [24]

Die verschiedenen Kompartimente des Körpers, welche Wasser enthalten, sind durch Membranen voneinander getrennt.

Eine lebensnotwendige Voraussetzung für das Leben ist die Konstanzhaltung des so genannten *inneren Milieus* (**Homöostase**) wegen der Nahrungsaufnahme und der Stoffwechselaktivität der Zellen.

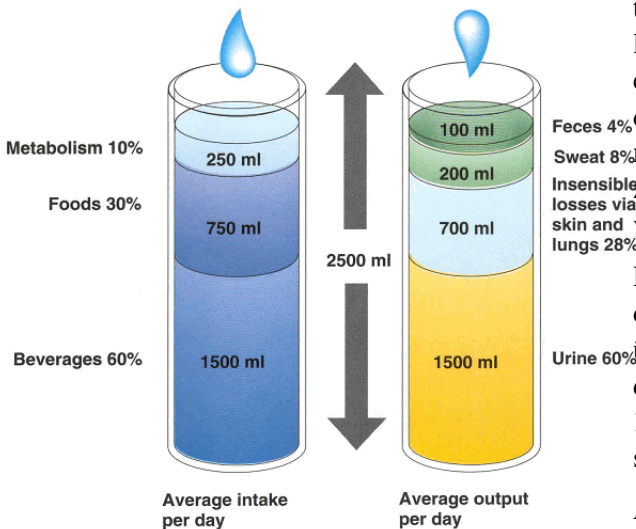


Abbildung 1.21: Wasserhaushalt des Körpers.

Pro Tag werden etwa 2.5 l Wasser aufgenommen, respektive durch Verbrennung von Nahrung erzeugt und wieder ausgeschieden. Ein Teil davon ist unvermeidbar, wie z.B. die Feuchtigkeit der Luft beim

Ausatmen. Bei körperlicher Anstrengung kann der Wasserverlust auf ein Vielfaches ansteigen. Der Körper steuert die Wasserausscheidung über die Niere so, dass ein Gleichgewicht aufrechterhalten wird.

1.5 Die Zelle als Grundbaustein

1.5.1 Zelltypen

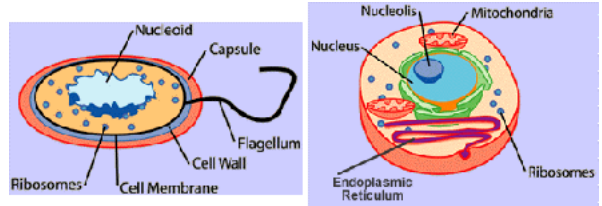


Abbildung 1.22: Grundlegende Zelltypen: Prokaryonten (links) und Eukaryonten (rechts).

Es gibt zwei verschiedene Arten von Zellen: Zellen ohne Zellkern (**prokaryotische Zellen**) und Zellen mit Zellkern (**eukaryotische Zellen**). Prokaryotische Zellen sind einzellige Lebewesen, im wesentlichen Bakterien. Alle höheren Organismen sind aus eukaryotischen Zellen aufgebaut. Bei diesen befinden sich die Träger der Erbanlagen, der **Nukleinsäuren**, im Zellkern. Außerdem sind sie im Gegensatz zu den prokaryotischen Zellen hoch strukturiert und verwenden Sauerstoff für den Stoffwechsel.

Der Mensch besteht aus etwa $7.5 \cdot 10^{13}$ Zellen, die eine Größe von $5\mu m$ bis $150\mu m$ besitzen. Der überwiegende Anteil sind die roten Blutkörperchen, die *Erythrozyten*, von denen der Körper etwa $2.5 \cdot 10^{13}$ enthält, sowie die 10^{11} Zellen des Nervensystems. Figur 1.23 stellt diese beiden Zelltypen dar.

Alle Zellen besitzen gewisse Grundeigenschaften:

- **Stoffwechsel und Energie.** Für alle Lebensprozesse (chemische Reaktionen) muss Energie bereitgestellt werden. Die meisten Pflanzen können mit Hilfe der Photosynthese energiereiche Verbindungen selbst synthetisieren, während Tiere und Menschen energiereiche Ver-

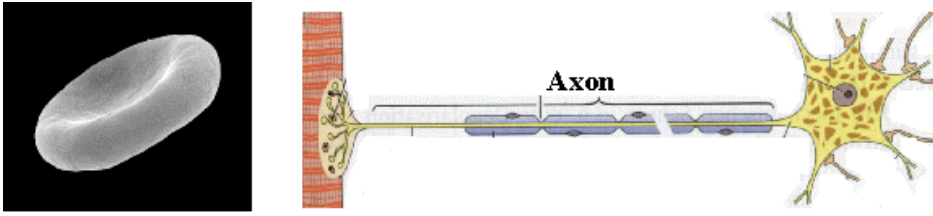


Abbildung 1.23: Erythrozyt und Nervenzelle

bindungen mit der Nahrung aufnehmen müssen. Außerdem können sie nicht alle lebensnotwendigen Verbindungen synthetisieren, wie zum Beispiel Vitamine, essentielle Aminosäuren und essentielle Fettsäuren.

- **Vermehrung und begrenzte Lebensdauer.** Sowohl für das Wachstum eines vielzelligen Organismus als auch für den Ersatz abgestorbener (oder nicht mehr richtig funktionierender) Zellen sind Zellteilungen notwendig. Eine Dünndarmzelle hat nur eine Lebensdauer von etwa 1.5 Tagen, während ein Erythrozyt ungefähr 120 Tage lebt. Deswegen müssen pro Sekunde 2.5 Millionen Erythrozyten neu gebildet werden, damit die Gesamtzahl konstant bleibt.

- **Reizaufnahme und -beantwortung.** In jeder Zelle laufen tausende von chemischen Reaktionen gleichzeitig ab, die aufeinander abgestimmt sein müssen. Jede Reaktion muss also entsprechend der Zellfunktion reguliert werden. Die Regulationsmechanismen erstrecken sich auch auf Gewebe, Organ und Organismus, damit auf Reize reagiert werden kann. Umwelteinflüsse werden über Sinnes- und Nervensysteme in Reize transformiert, die weiter verarbeitet werden können.

Zusätzlich dazu kommen die **speziellen Eigenschaften** von bestimmten spezialisierten Zellen. Beispiele: Abwehrzellen oder Drüsenzellen.

1.5.2 Aufbau einer Zelle

Bei lichtmikroskopischer Betrachtung einer Zelle sind die **Zellmembran**, das **Zytoplasma** (der flüssi-

ge Zelleib) und der **Zellkern** erkennbar. Durch elektronenmikroskopische Betrachtung konnten die einzelnen **Zellorganellen** wie zum Beispiel **Mitochondrien** identifiziert werden.

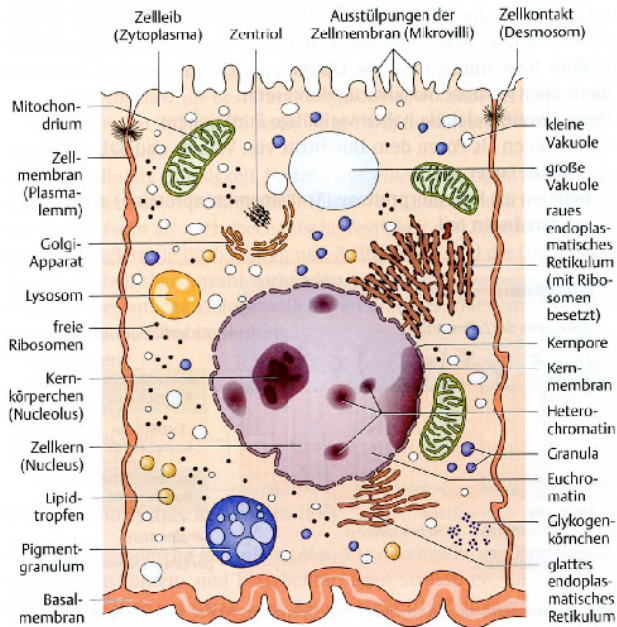


Abbildung 1.24: Aufbau einer Zelle. [11]

Die meisten menschlichen Zellen sind hochgradig strukturiert. Die in der Figur gezeigten Zellorganellen sind in den meisten Zellen vorhanden, allerdings teilweise in stark unterschiedlicher Zahl. So besitzen Erythrozyten keinen Zellkern, während Skelettmuskeln über 1000 Zellkerne aufweisen können.

1.5.3 Stoffaustausch

Jede Zelle muss für ihre Funktion durch die Zellmembran Stoffe mit der Umgebung austauschen.

Bei einem Einzeller (Abbildung 1.25 links) befindet sich außerhalb der Zelle eine "unendliche" Umgebung wie z.B. das Meer. Damit wird die Umgebung durch den Stoffaustausch dieser einzelnen Zelle nicht beeinflusst. Bei menschlichen Zellen (Abbildung 1.25 rechts) erfolgt der Stoffaustausch zwischen Zelle (Intrazellularraum) und dem Extrazellularraum, Blutgefäßen oder dem Interstitium.

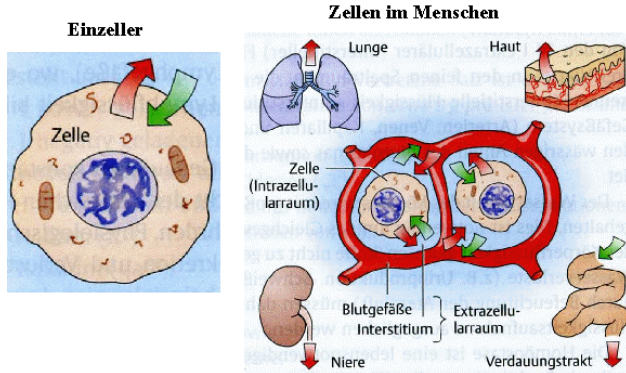


Abbildung 1.25: Stoffaustausch bei Einzeller und Mensch. [11]

Da das Interstitium ein begrenztes Volumen aufweist (im Gegensatz zum Meer bei einem Einzeller) würde sich seine Zusammensetzung durch die Abgabe von Abfallstoffen der Zelle, oder die Aufnahme von Glucose und Sauerstoff rasch ändern. Komplexe Organismen wie der Mensch benötigen deshalb einen Transportmechanismus, welcher benötigte Bestandteile zur Zelle bringt und Abfallstoffe entfernt. Dies sind die wichtigsten Funktionen des Blutkreislaufs. Weitere Organe sind ebenfalls daran beteiligt, Abfallstoffe zu entsorgen sowie Sauerstoff und Nährstoffe zur Verfügung zu stellen, insbesondere die Lunge, Haut, Niere und der Verdauungstrakt. Botenstoffe und Nerven sind dafür verantwortlich, dass alle Kreisläufe im Gleichgewicht bleiben.

1.5.4 Zellmembran

Die Zellmembran trennt das Innere der Zelle von dem Extrazellularraum außerhalb. Sie besteht aus einer **Lipiddoppelschicht**, d.h. aus zwei Lagen von Lipidmolekülen. Diese bestehen aus einem hydrophilen (=wasser liebenden, wasserlöslichen) Teil

und einem hydrophoben (=wasserabstoßenden) Teil. Sie organisieren sich deshalb so, dass sie sich bevorzugt parallel zueinander orientieren, wobei hydrophobe Komponenten nach innen gedreht sind und deshalb nur mit anderen hydrophoben Molekülteilen wechselwirken. Die hydrophilen Teile wechselwirken einerseits miteinander, andererseits mit der wässrigen Phase auf beiden Seiten der Membran.

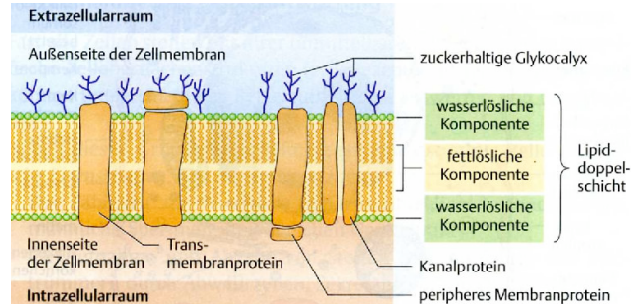


Abbildung 1.26: Aufbau der Zellmembran. [11]

In die Zellmembran eingelagert oder angelagert sind Proteine, die vielfältige Aufgaben durchführen, je nach Spezialisierung der Zelle. Sie binden Signalmoleküle, verankern Zellen untereinander oder befestigen Zellen auf ihrer Unterlage. Kanalproteine ermöglichen oder kontrollieren den Stoffaustausch durch die Zellwand.

1.5.5 Membranpotenzial

In Ruhe weist der Intrazellularraum eine negative Ladung auf, der extrazelluläre dagegen eine positive. Die Differenz wird als das **Membranpotenzial** bezeichnet.

Das Membranpotenzial wird durch aktiven und passiven (aber kontrollierten) Austausch von Ionen, v.a. Na^+ , K^+ und Cl^- kontrolliert. Es dient u.a. zur Signalübermittlung in Nervenzellen.

Der Stoff- und Flüssigkeitstransport durch die Zellmembran kann auf passive Weise stattfinden (**Diffusion, Osmose, Filtration**) oder auch aktiv durchgeführt werden. Dies geschieht durch spezielle eingelagerte Proteine. Sind die transportierten Stoffe Ionen, wie z.B. Na^+ , K^+ und Cl^- , so spricht man von **Ionenpumpen**.

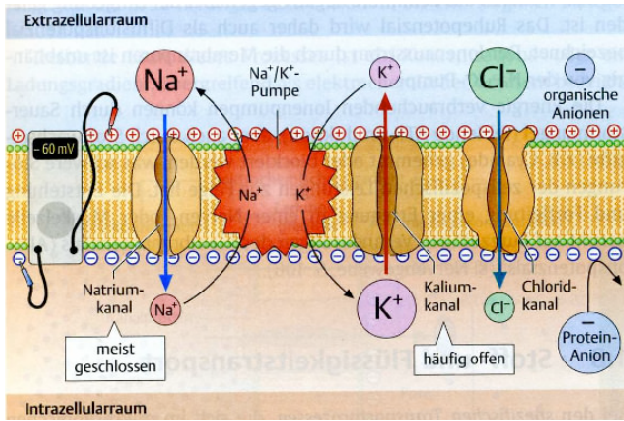


Abbildung 1.27: Membranpotenzial. [11]

1.5.6 Zellkern und Erbsubstanz

Im Zellkern befinden sich die **Chromosomen**, die die Träger der Erbanlagen (**Gene**) sind. Menschliche Zellkerne enthalten 23 Chromosomenpaare, jeweils eines aus dem mütterlichen und väterlichen Chromosomensatz. Sie werden sichtbar gemacht, indem man die Zellen in einem künstlichen Medium kultiviert und danach mit einer Colchicininlösung behandelt. Anschließend werden die Zellen fixiert, auf einem Objektträger ausgebreitet und gefärbt (*chromos* = Farbe, *soma* = Körper).

Ein Chromosom in der Metaphase besitzt 2 unterschiedlich lange **Chromosomenarme**, die jeweils aus zwei **Chromatiden** bestehen. Zwischen den Chromosomenarmen befindet sich die primäre Einschnürung, das **Zentromer** (Abbildung 1.30).

1.6 Biomoleküle

1.6.1 DNA

Die **Desoxyribonukleinsäure (DNA)** bildet mit Hilfe von Histonmolekülen eine perlenkettenartige Struktur, die stark aufgewickelt ist. Diese Komplexe heißen **Nucleosome**.

Die DNA ist als **Doppelhelix** aufgebaut. Diese Doppelhelix besteht aus den **4 Basen (Adenin, Thymin, Cytosin, Guanin)**, Zucker und einer Phosphatbrücke. Jeweils eine Base bildet mit dem Zucker

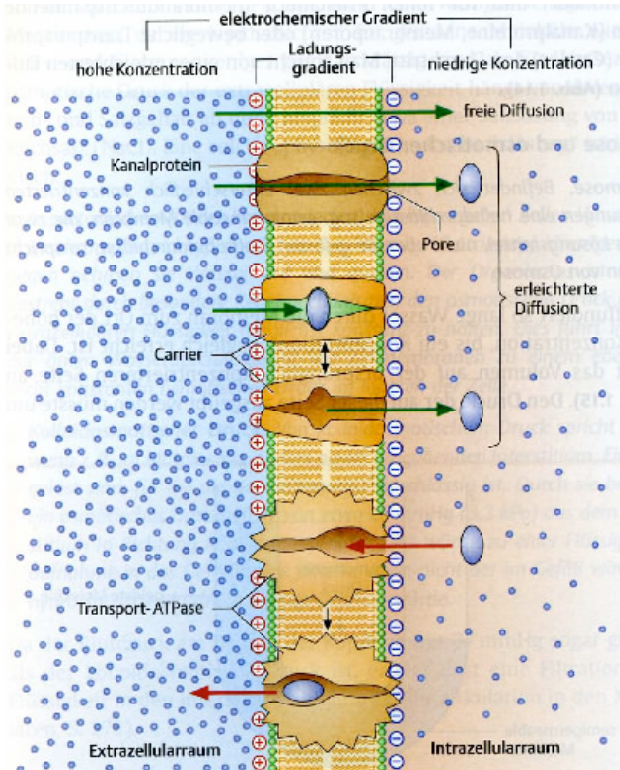


Abbildung 1.28: Stofftransport durch die Zellmembran. [11]

und dem Phosphatrest ein **Nukleotid**. Die Doppelspiralenstruktur wird durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Basen verstärkt, diese Verbindungen ähneln den Sprossen einer Leiter.

Ein Gen ist ein Abschnitt der **Desoxyribonukleinsäure (DNA)**, der die Grundinformation zur Herstellung einer **Ribonukleinsäure (RNA)** enthält. Hauptsächlich entstehen daraus Proteine, die durch ihre Funktion ein oder mehrere Merkmale prägen. Daher werden Gene auch als Erbanlagen bezeichnet.

1.6.2 Proteinsynthese

Der gentische Text aus der "Nucleinsäuresprache" (DNA) muss zunächst in die "Aminosäuresprache" übersetzt werden. Daher stammt der Begriff der **Translation** für die Proteinbiosynthese.

An der DNA findet ihre eigene Replikation und ihre Transkription in RNA statt. Die RNA ist ähnlich auf-

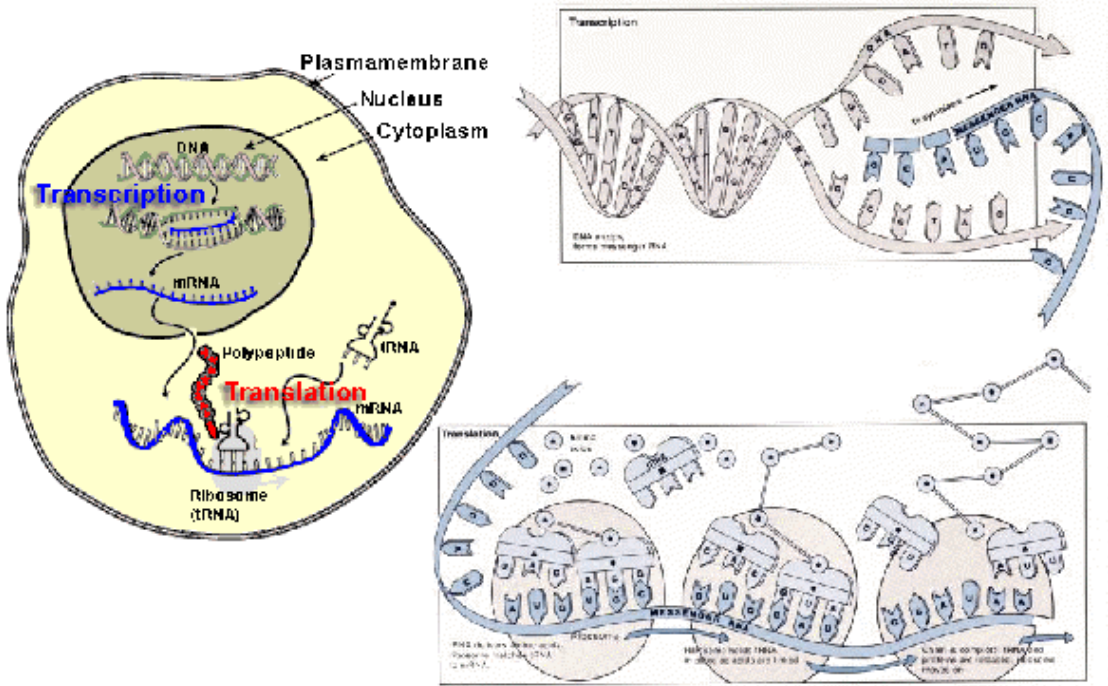


Abbildung 1.32: Transkription und Translation: DNA → RNA → Protein.

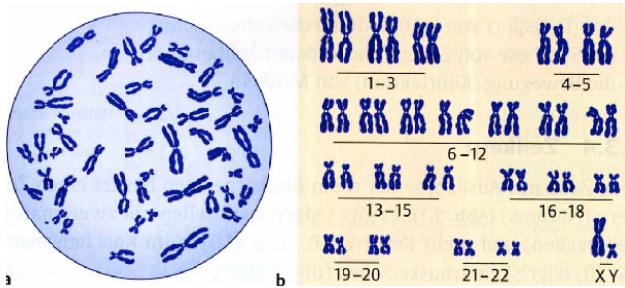


Abbildung 1.29: Chromosome des Menschen. [11]

gebaut wie die DNA. Die wesentlichen Unterschiede sind

- RNA Moleküle sind kürzer als DNA und bestehen meist nur aus einem Strang
- Der Zucker ist Ribose anstelle von Desoxyribose; RNA kann deshalb leichter hydrolysiert werden.
- Anstelle von Thymin enthält RNA Uracil

RNA wiederum steuert ihre Translation in Proteine.

Der genetische Code bestimmt, welche Sequenz von Nucleotiden in welche Aminosäure übersetzt wird. Jeweils drei Nucleotide ergeben eine Aminosäure. Da es insgesamt $4^3 = 64$ solche Sequenzen gibt, aber nur 20 Aminosäuren, codieren jeweils mehrere Triplets für eine Aminosäure. Außerdem codieren 3 Sequenzen für das Ende einer Peptidsequenz.

Die DNA ist also nur das Lager für die genetische Information, RNA fungiert als Intermediat zwischen DNA und Proteinen, die nur das Produkt von genetischen Informationen sind, nicht deren Träger. Alle Funktionen einer Zelle werden über die DNA gesteuert, indem definierte Abschnitte der DNA aktiviert werden. Gemäß einem Dogma der Biologie fließt die Information somit immer von der DNA über die RNA zu den Proteinen. Dieses Dogma ist allerdings nicht mehr in dieser absoluten Form haltbar. So wird es von Retroviren durchbrochen, welche ihre eigene RNA mit Hilfe des Enzyms reverse transcriptase in DNA umsetzen. Diese kann dann in das Erbgut des Wirts eingebaut werden, so dass dieser den Virus herstellt.

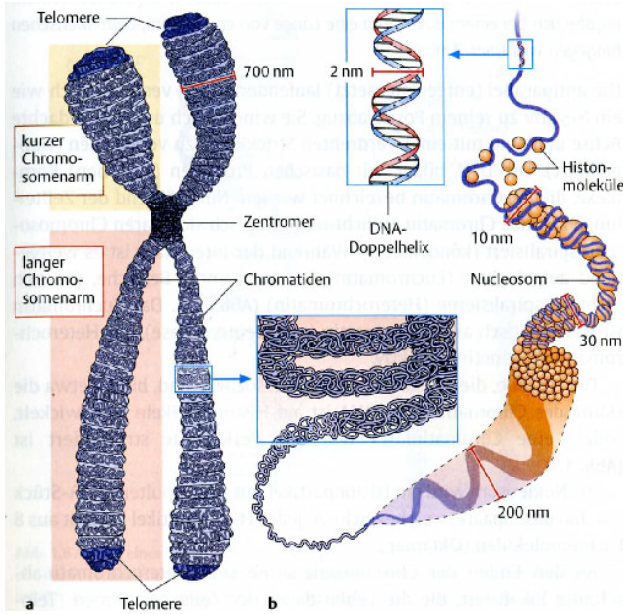


Abbildung 1.30: Aufbau eines Chromosoms. [11]

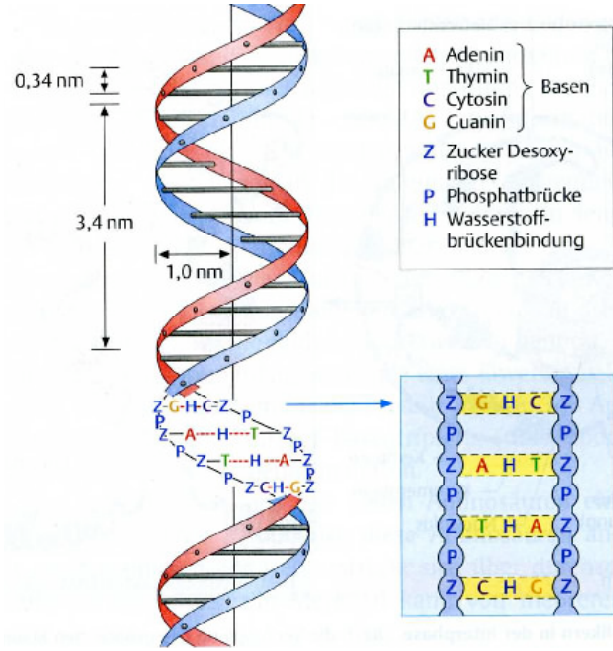


Abbildung 1.31: Aufbau der DNA. [11]

1.6.3 Proteine: Struktur

Proteine sind natürliche Polymere, also Makromoleküle, die aus einer Sequenz von kleineren Molekülen, den Monomeren, zusammengesetzt sind. Die Grundbestandteile der Proteine sind die **Aminosäuren**. Alle Aminosäuren, außer der einfachsten, dem Glycin, sind **chiral** und daher optisch aktiv. Aminosäuren werden über **Peptidbindungen** miteinander verknüpft. Von allen in der Natur vorkommenden Aminosäuren werden nur 20 ribosomal in Proteine eingebaut.

Die Funktion der Proteine ist stark mit ihrer räumlichen Struktur verknüpft. Man unterscheidet unterschiedliche Arten von Strukturen:

Die **Primärstruktur** besteht aus der Aneinanderreihung von Aminosäuren, der Aminosäuresequenz. Die **Sekundärstruktur** entsteht durch die räumliche Wechselwirkung und wird meist durch Wasserstoffbrücken stabilisiert. Es entstehen Helizes, Faltblättern, Schleifen und anderen Strukturen.

Die **Tertiärstruktur** ist die dreidimensionale Anordnung der Sekundärstrukturen und ist häufig die biologisch aktive Struktur des Proteins. Die Funktion eines Proteins läuft häufig über Änderungen die-

ser Konformation. Die Aneinanderreihung von Proteinmolekülen in Oligomere wird als **Quartärstruktur** bezeichnet.

1.6.4 Proteine: Funktion

Die Aufgaben der Proteine sind vielfältig:

- **Strukturbildung und -erhaltung.** Die mechanische Stabilität von Zellen ist dafür ein Beispiel (Collagen).
- **Bewegung.** Die Muskelbewegung entsteht durch ein Zusammenspiel von Actin und Myosin (später mehr dazu).
- **Transport.** Durch Proteine werden Stoffe durch die Blutbahn transportiert. Hämoglobin transportiert Sauerstoff und Kohlendioxid zwischen Lunge und Gewebe. Ein weiteres Beispiel sind die schon erwähnten Ionenkanäle in Zellmembranen.
- **Schutz und Abwehr.** Im Immunsystem gibt es Immunglobuline und Antikörper für die Immunabwehr.

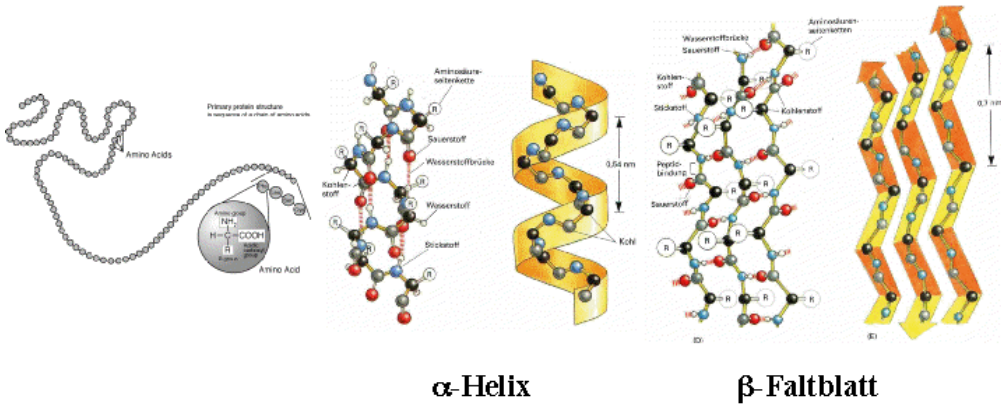


Abbildung 1.35: Primär- und Sekundärstruktur von Proteinen.

The Genetic Code

	U	C	A	G	
U	UUU Phenylalanine UUC alanine	UCU Serine UCC Serine UCA Serine UCG Serine	UAU Tyrosine UAC Tyrosine UAA Stop UAG Stop	UGU Cysteine UGC Cysteine UGA Stop UGG Tryptophan	U C A G
C	CUU Leucine CUC Leucine CUA Leucine CUG Leucine	CCU Proline CCC Proline CCA Proline CCG Proline	CAU Histidine CAC Histidine CAA Glutamine CAG Glutamine	CGU Arginine CGC Arginine CGA Arginine CGG Arginine	U C A G
A	AUU Isoleucine AUC Isoleucine AUA Isoleucine AUG Methionine	ACU Threonine ACC Threonine ACA Threonine ACG Threonine	AAU Asparagine AAC Asparagine AAA Lysine AAG Lysine	AGU Serine AGC Serine AGA Arginine AAG Arginine	U C A G
G	GUU Valine GUC Valine GUA Valine GUG Valine	GCU Alanine GCC Alanine GCA Alanine GCG Alanine	GAU Aspartic acid GAC Aspartic acid GAA Glutamic acid GAG Glutamic acid	GGU Glycine GGC Glycine GGA Glycine GGG Glycine	U C A G

Abbildung 1.33: Der genetische Code.

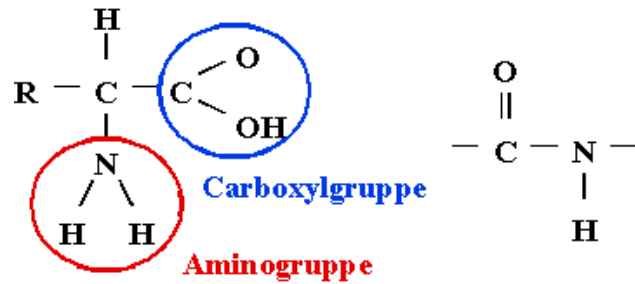


Abbildung 1.34: Aminosäuren (links) und die sie verbindenden Peptidbindungen (rechts).

- **Regulation und Steuerung von Zellvorgängen.** Jeder hormonale Prozeß verläuft zum Beispiel über Proteine als **Rezeptoren**, sie dienen auch häufig der Informationsweiterleitung.
- **Katalyse.** Alle im Organismus ablaufende chemischen Prozesse werden durch Enzyme katalysiert

1.6.5 Lipide

Lipide bilden eine Klasse von Molekülen, die im Wesentlichen aus langen Kohlenwasserstoffen bestehen. Im Falle von Fettsäuren befindet sich an einem

Ende eine Carboxylgruppe. Fette bestehen im Wesentlichen aus einem Glycerinmolekül, an das drei unterschiedliche Fettsäuren gebunden sind.

Lipide bilden den Hauptbestandteil von Membranen (z.B. Zellwänden). Darüber hinaus spielen sie wichtige Rollen als Energiespeicher und als Bestandteil von Lipoproteinen.

1.6.6 Kohlenhydrate

Kohlenhydrate sind Verbindungen mit der allgemeinen Summenformel $(CH_2O)_n$.

Diese Molekülklasse tritt auf als sogenannte Monosaccharide, bei denen $n = (3, 4, 5, 6, 7, 8; \text{meist } 5 \text{ oder } 6)$ ist, oder sie sind aus solchen Monomeren zusammengesetzt.

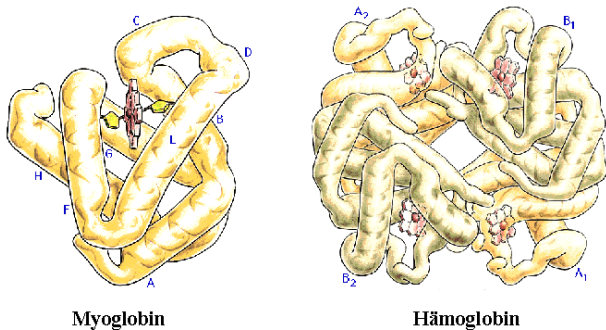


Abbildung 1.36: Tertiär- und Quartärstruktur von Proteinen.

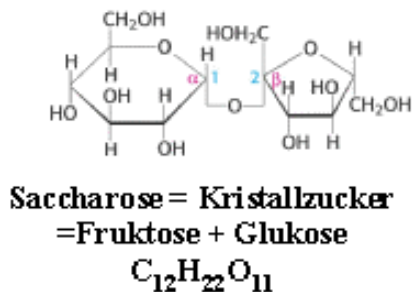


Abbildung 1.38: Saccharose.

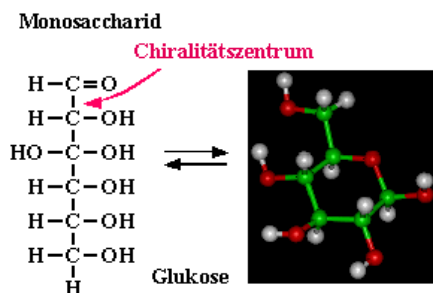


Abbildung 1.37: Glukose.

Man unterscheidet wiederum zwischen Oligosacchariden (wenige Monomere) und Polysaccharide (mindestens 8 Monomere). Ein wichtiges Beispiel ist der Kristallzucker, der aus zwei Monosacchariden besteht.

Die meisten Kohlenstoffatome besitzen jeweils vier unterschiedliche Liganden. Sie können deshalb unterschiedliche Stereoisomeren bilden. Oligosaccharide sind Bestandteile von Glycoproteinen und spielen eine wichtige Rolle im Immunsystem.

Polysaccharide bestehen aus vielen Monomeren und haben teilweise auch strukturelle Funktionen.

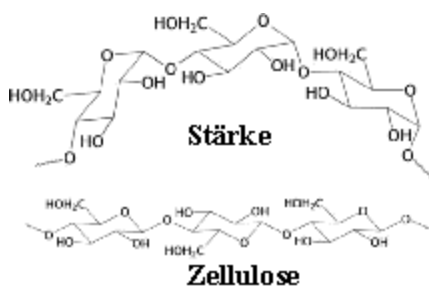


Abbildung 1.39: 2 Beispiele von Polysacchariden.