

Bachelorstudium Biomedizin und Biotechnologie

Aufnahmeverfahren 2026/27

26.02.2026

Inhalt

Biologie.....ab Seite 3

Chemie..... ab Seite 94

Physik.....ab Seite 180

Bitte beachten Sie:

Zum besseren Verständnis und um dem Niveau des Schulstoffs ab der 9. Schulstufe zu entsprechen, wurde für die Beschreibungen und Darstellungen in diesem Skript einer starken Vereinfachung gegenüber der Detailgenauigkeit der Vorzug gegeben.

Biologie

Aufnahmeverfahren 2026/27

26.02.2026

Impressum

Titel: Biologie - Aufnahmeverfahren 2026/2027

Urheber:

Titel: Grundlagen der Biologie - Vorbereitungsliteratur für das Aufnahmeverfahren **Autor:innen:** Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Helmut Spreitzer, Ass.-Prof. Dr. Barbara Hamilton, Univ.- Prof. Mag. Mag. Dr. Sylvia Kirchengast, Sarah Kainz, BSc

Titel: Chemische, biochemische und physiologische Grundlagen der Pharmazie und Ernährungswissenschaften - Vorbereitungsliteratur für das Aufnahmeverfahren

Autor:innen: Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Helmut Spreitzer, Ass.-Prof. Dr. Petra Rust, Martin W. Reichel, Bakk.rer.nat. MA, Dipl. oec. troph. Dr. Georg Hoffmann, Privatdoz

Erstellt im Zuge des Open Education Austria Projekts.

Mit der freundlichen Unterstützung des Center for Teaching and Learning der Universität Wien.

Herausgeberin:

Universität Wien
Universitätsring 1
1010 Wien

Lizenziert unter der CC BY-NC-SA 3.0 AT Lizenz

Bearbeitung und Ergänzung durch:

Vizerektorat für Lehre und klinische Veterinärmedizin mit dem Zentrum für Biologische Wissenschaften, dem Zentrum für Pathobiologie sowie dem Zentrum für Lebensmittelwissenschaften und öffentliches Veterinärwesen

Veterinärmedizinische Universität Wien
Veterinärplatz 1
1210 Wien

Herausgeberin:

Veterinärmedizinische Universität Wien
Veterinärplatz 1
1210 Wien



Lizenziert unter der CC BY-NC-SA 3.0 AT Lizenz

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Österreich zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/at/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Inhalt

1 Cytologie	8
1.1 EINLEITUNG	8
1.2 PROKARYOTISCHE UND EUKARYOTISCHE ZELLEN	9
1.2.1 Die drei Hauptreiche (Domänen) der Lebewesen.....	9
1.2.2 Prokaryotische Zellen.....	10
1.2.3 Eukaryotische Zellen.....	11
1.3 KOMPARTIMENTE EUKARYOTISCHER ZELLEN	13
1.3.1 Der Zellkern	13
1.3.2 Das Endomembransystem	13
1.3.3 Ribosomen	16
1.3.4 Mitochondrien und Chloroplasten	16
1.3.5 Peroxisomen.....	18
1.3.6 Das Cytoskelett.....	19
1.4 ZELL-ZELL-KOMMUNIKATION.....	21
2 Genetik.....	24
2.1 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN	24
2.2 DER ZELLZYKLUS.....	24
2.2.1 Die wichtigsten Vorgänge des Zellzyklus	25
2.2.2 Die Mitose.....	26
2.2.3 Die Kontrolle des Zellzyklus	27
2.3 CHROMOSOMENSÄTZE, MEIOSE UND VERERBUNGSLEHRE.....	30
2.3.1 Chromosomensätze	31
2.3.2 Die Meiose.....	31
2.3.3 Mendelsche Genetik und Rekombination.....	34
3 Stoffwechsel	40
3.1 KOHLENHYDRATE.....	40
3.1.1 Bildung von Kohlenhydraten.....	40
3.1.2 Einteilung der Kohlenhydrate.....	40
3.2 FETTE	41
3.3 EIWEIßSTOFFE (PROTEINE)	42
3.3.1 Struktur von Proteinen.....	42

3.3.1 Einteilung der Proteine	43
3.4 DIE ERNÄHRUNG DER TIERE	43
3.4.1 Versorgung mit Nährstoffen	43
3.4.2 Hauptstadien der Nährstoffverarbeitungen.....	44
3.5 VERDAUUNG UND ABSORPTION.....	44
3.5.1 Intra- und extrazelluläre Verdauung	44
3.5.2 Aufbau des Verdauungstraktes von höheren Tieren	45
3.5.3 Evolutionäre Anpassungen an Ernährungsformen.....	48
3.5.4 Energiehaushalt.....	49
3.5.5 Mikrobiota und Hormone	51
3.6 ENZYMATISCHE VERDAUUNG VON MAKRONÄHRSTOFFEN.....	51
3.6.1 Kohlenhydratverdauung	52
3.6.2 Fettverdauung und -stoffwechsel.....	53
3.6.3 Eiweißverdauung	53
3.6.4 Absorption von Nährstoffen	53
3.6.5 Ernährungsabhängige Krankheiten	54
3.7 WICHTIGE STOFFWECHSELWEGE ZUR ENERGIEGEWINNUNG AUS NAHRUNG	56
3.7.1 Glykolyse.....	56
3.7.2 β -Oxidation	56
3.7.3 Citratzyklus.....	56
4 Herzkreislauf	57
4.1 AUFBAU DER GEFÄßE	57
4.2 HERZ UND BLUTGEFÄßSYSTEM	57
4.3 ERREGUNGSBILDUNG UND ERREGUNGSLEITUNG IM HERZEN	58
4.4 PHYSIOLOGIE DES PERIPHEREN KREISLAUFSYSTEMS.....	60
5 Immunbiologie	63
5.1 BARRIEREN	63
5.2 BLUT	63
5.2.1 Zusammensetzung des Blutes	63
5.3 LYMPHATISCHES SYSTEM.....	65
5.4 ABWEHR VON KRANKHEITSERREGERN	66
5.4.1 Angeborene Abwehr	66

5.4.2	Adaptive Abwehr	67
5.4.3	Immunisierung bzw. Impfung (Schutz des Körpers vor Krankheitserregern)	67
5.5	BLUTGRUPPEN	68
6	Neurobiologie	70
6.1	NERVENZELLEN (NEURONE)	70
6.2	ARBEITSWEISE	70
6.2.1	Erregungsleitung	70
6.2.3	Generatorpotential	72
6.2.4	Hemmungsmechanismen im Nervensystem	72
6.2.5	Reflexe	72
6.3	ANATOMIE DES ZENTRALNERVENSYSTEMS (BESTEHEND AUS GEHIRN UND RÜCKENMARK)	72
6.3.1	Gehirn	72
6.3.2	Funktionen des Gehirns	73
6.3.3	Rückenmark	73
6.3.4	Funktionen des Rückenmarks	74
6.4	SINNESPHYSIOLOGIE	74
6.4.1	Gesichtssinn	74
6.4.2	Gehörsinn	76
6.4.3	Geruchssinn	76
6.4.4	Geschmackssinn	76
6.4.5	Tastsinn	76
6.4.6	Schmerzsinn	76
6.4.7	Temperatursinn	77
6.4.8	Gleichgewichtssinn	77
7	Ethik	78
8	One Health – Ein ganzheitlicher Ansatz für Gesundheit	80
9	Mikroorganismen - Grundlagen	82
9.1	ARCHÄEN	82
9.2	BAKTERIEN	82
9.3	PILZE	85
9.4	PROTOZOEN	88
9.5	VIREN	88
9.6	PRIONEN	89

10 Abbildungsverzeichnis	91
11 Tabellenverzeichnis.....	92

1 Cytologie

1.1 EINLEITUNG

Die grundlegenden strukturellen und funktionellen Einheiten jedes Lebewesens sind Zellen.

Die meisten Zellen sind zwischen 1 und 100 μm groß und daher nur unter dem Mikroskop erkennbar.

1 Mikrometer (μm) = 10^{-3} mm = 10^{-6} m.

Ein Lichtmikroskop kann das Untersuchungsmaterial bis zu ca. 1.000-mal vergrößern.

Neuere technische Verfahren erlauben es, den Kontrast zu verbessern und Zellkomponenten zu färben und zu bezeichnen. Die meisten subzellulären Strukturen einschließlich der von Membranen umgebenen Organellen sind zu klein, um über Lichtmikroskope sichtbar gemacht werden zu können. Vom Elektronenmikroskop (EM), das man für die Untersuchung subzellulärer Strukturen einsetzt, gibt es zwei Typen:

- Das Rasterelektronenmikroskop (REM) ist besonders geeignet für die detaillierte Betrachtung und Untersuchung von Oberflächen; seine Bilder haben räumlichen Charakter.
- Das Transmissionselektronenmikroskop (TEM oder auch Durchstrahlungselektronen-mikroskop) wird eingesetzt, um mithilfe eines Elektronenstrahls die innere Struktur des Materials zu erforschen.

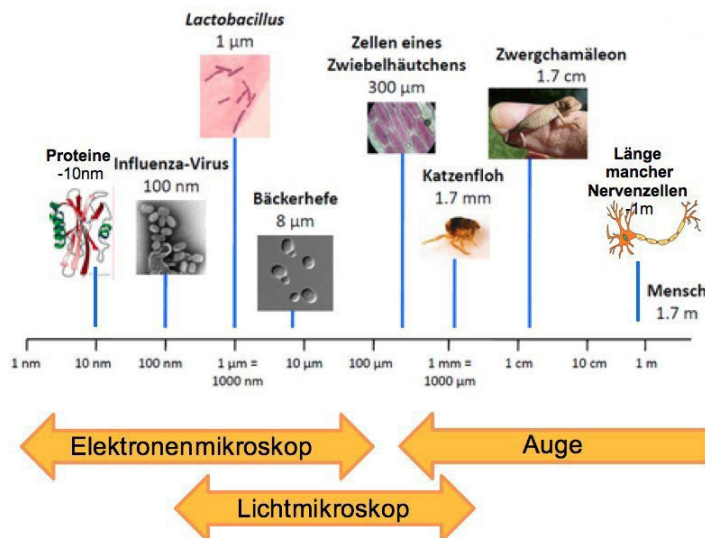


Abb. 1.1: Größenvergleiche

1 Zentimeter (cm) = 10^{-2} Meter (m)

1 Millimeter (mm) = 10^{-3} Meter

1 Mikrometer (μm) = 10^{-3} Millimeter = 10^{-6} Meter

1 Nanometer (nm) = 10^{-3} Mikrometer = 10^{-9} Meter

Größenangaben einiger Zellen:

- die meisten eukaryotischen Zellen (pflanzliche und tierische Zellen): 10 – 100 μm
Extreme: Menscheizelle 0,1 mm; Froscheizelle 1 mm; Afrikanische Straußeneizelle 15 cm; menschliche Nervenzellen können über einen Meter lang werden
- die meisten prokaryotischen Zellen (Bakterien): 1 – 5 μm
Extreme: Thiomargarita namibiensis ist ein Schwefelbakterium mit einem Durchmesser von bis zu 0,75 mm, sie kommen ausschließlich an der Küste Namibias vor;
Mycoplasmen 0,1 – 1,0 μm

Alle Zellen besitzen:

- Zell- od. Plasmamembran: Diese trennt eine Zelle von der Außenseite. Zellmembranen fungieren als selektive Barriere, die den hinreichenden Durchtritt von Sauerstoff, Nährstoffen und Abfallprodukten gewährleisten und dadurch auch das

Zellvolumen gleichbleibend halten. In jedem Fall verhindern sie aber, dass sich Moleküle von der einen Seite mit denen der anderen Seite vermischen.

- Cytoplasma: Inhalt der Zelle innerhalb der Plasmamembran inklusive Organellen (außerhalb des Zellkerns).
- Cytosol: Dies ist eine von der Zellmembran eingehüllte, gelartige Flüssigkeit, in der viele biochemische Prozesse ablaufen; Teil des Cytoplasmas außerhalb der Organellen.
- Chromosomen: Diese sind die Träger der Erbinformation in Form von DNA (in selten Fällen besitzen spezialisierte Zellen keine DNA z. B. rote Blutzellen).
- Ribosomen: Diese sind große, im Elektronenmikroskop sichtbare Protein/RNA-Komplexe, an denen die Synthese der Proteine stattfindet.

1.2 PROKARYOTISCHE UND EUKARYOTISCHE ZELLEN

Durch mikroskopische Beobachtungen war seit langem klar, dass Lebewesen aufgrund ihrer Zellstruktur in zwei Gruppen eingeteilt werden können: in Eukaryoten und Prokaryoten (auch Eukaryonten und Prokaryonten bezeichnet; gr. karyon = Kern).

Eukaryotische Zellen (gr. eu = richtig) sind kompartimentiert. Der Großteil des genetischen Materials (DNA) befindet sich in einem Zellkern, der von zwei Membranen (jede bestehend aus einer Lipiddoppelschicht) umgeben ist.

Prokaryoten haben dagegen kein ausgesprochenes Kernkompartiment. Die DNA ist in einem Zellbereich im Inneren der Zelle konzentriert, aber nicht von einer Membran umgeben.

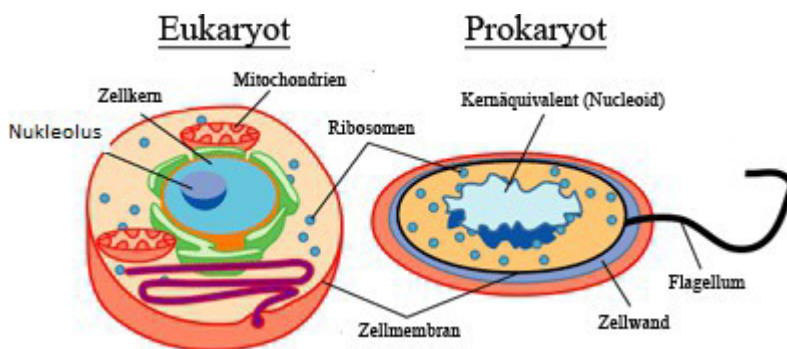


Abb. 1.2: Vergleich Eukaryont-Prokaryont

1.2.1 Die drei Hauptreiche (Domänen) der Lebewesen

Es gibt eine allgemeine Übereinkunft über die frühe Aufspaltung der drei grundlegenden Domänen in der Stammesgeschichte – Bakterien, Archaeen und Eukaryoten.

- Die beiden Organismendomänen Archaea und Bacteria sind Prokaryoten.
- Zur dritten Domäne der Eukaryoten zählen Protisten (eine sehr heterogene ein- bis wenig-zellige Organismengruppe), und die großen Gruppen der Pilze, Pflanzen und Tiere. In eukaryotischen Zellen umschließen zusätzliche Membranen einzelne Organellen (= subzelluläre Strukturen, die bestimmte Funktionen in der Zelle durchführen).

1.2.2 Prokaryotische Zellen

Prokaryotische Zellen, auch als Procyten bezeichnet, verfügen, wie schon erwähnt, über keinen Zellkern. Der Bereich, an der sich die DNA bei Prokaryoten befindet, wird auch als Nukleoid oder Kernäquivalent bezeichnet. Das Genom der meisten Prokaryoten besteht aus einem ringförmig angeordneten, doppelsträngigen Stück DNA. Man spricht auch vom sogenannten Bakterienchromosom.

Manche Prokaryoten verfügen darüber hinaus über weitere DNA-Moleküle in Form von Plasmiden. Das sind ringförmige DNA-Moleküle mit meist nicht unbedeutenden genetischen Informationen wie Antibiotika- oder Giftresistenzen. Plasmide können von Bakterium zu Bakterium transferiert und damit verbreitet werden, dieser Vorgang wird als Konjugation bezeichnet. Daraus erklärt sich die schnelle Verbreitung von Antibiotikaresistenzen in sogenannten Spitalskeimen.

Die Cytoplasmamembran (Zell- od. Plasmamembran) ist eine dünne, leicht bewegliche Barriere, die die Zelle umgibt und das Cytoplasma von der Umgebung der Zelle trennt. Eine Zellmembran besteht aus einer Lipiddoppelschicht mit eingebetteten Proteinen. Diese schützt durch ihre Selektivität des Stofftransportes die Zelle vor einem Konzentrationsausgleich mit der Umgebung.

Außerhalb der Plasmamembran befindet sich eine starre Zellwand, die die Zellmembran umgibt und der Zelle die Form und eine gewisse Festigkeit gibt. Diese starre Schicht, die sogenannte Peptidoglykanschicht, besteht aus Polysaccharidketten, gebildet aus Zuckerderivaten, die durch Vernetzung mit wenigen verschiedenen Aminosäuren eine feste Struktur bilden.

Funktionell schützt die Zellwand die Zelle vor dem Eindringen von z. B. Viren (Bakteriophagen) und verhindert ein Platzen der Zelle, bedingt durch den erhöhten osmotischen Druck. Im Außenmilieu der Zelle liegt eine viel geringere Stoffkonzentration an gelösten Teilchen vor als im Inneren der Zelle. Damit würde Wasser aus der Umgebung in die Zelle eindringen und eine Zelle ohne starre Zellwand zum Platzen bringen.

Umhüllt wird die gesamte Zelle zusätzlich von einer Schleimschicht aus Polysacchariden zum Schutz vor Austrocknung (Kapsel). Der grundlegende chemische Aufbau und die Struktur des genetischen Materials sind also in Prokaryoten und Eukaryoten gleich.

Fimbrien und Pili (Singular: Pilus) sind filamentöse Strukturen, die aus Proteinen bestehen, die aus der Zelloberfläche herausragen und ganz unterschiedliche Funktionen innehaben können. Je nach Typus können sich Pili an andere Feststoffe (um an einem günstigen Ort zu verweilen), Nährstoffe (um Nahrung aus der Umgebung aufzunehmen) oder auch andere Bakterien (um Gentransfer durchzuführen) anheften. Nicht zu verwechseln mit den Pili ist indes das deutlich größere, auch aus Proteinen bestehende Flagellum, welches nur der Fortbewegung dient.

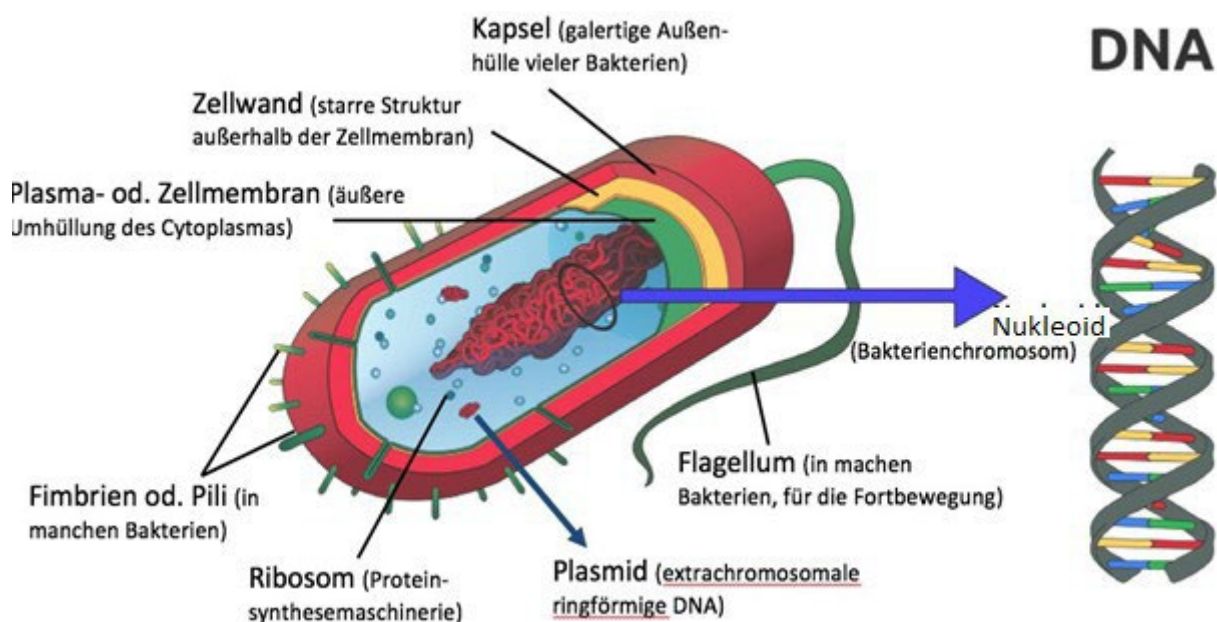


Abb. 1.3: Schematische Darstellung einer Bakterienzelle

1.2.3 Eukaryotische Zellen

Zusätzlich zu der die Zelle umhüllenden Plasmamembran besitzen Eukaryoten ein komplexes System an inneren Membranen, die die Zelle in Kompartimente (die bereits erwähnten Organellen) unterteilt. Diese innere Organisation schafft neue abgegrenzte Räume, in denen unterschiedliche Stoffwechselvorgänge ablaufen und die damit spezielle Aufgaben übernehmen.

Auch hier gilt das allgemeine Prinzip der Beziehung zwischen Struktur und Funktion.

So sind in allen eukaryotischen Zellen, mit Ausnahme von hoch differenzierten und spezialisierten Zellen, folgende membranumschlossene Organellen zu finden:

- der Zellkern
- das Endomembransystem (Äußere Kernmembran, Endoplasmatisches Reticulum, Golgi-Apparat, Lysosomen, Transportvesikel, Vakuole)
- Mitochondrien
- Chloroplasten (in Pflanzen und Grünalgen)
- Peroxisomen

Zusätzlich sind in eukaryotischen Zellen noch folgende nicht-membranumschlossene Komponenten zu finden, deren Auftreten vom Spezialisierungsgrad der Zelle abhängig ist:

- die Ribosomen (die auch in Prokaryoten in etwas unterschiedlicher Form vorkommen)
- verschiedene Cytoskelett-Komponenten

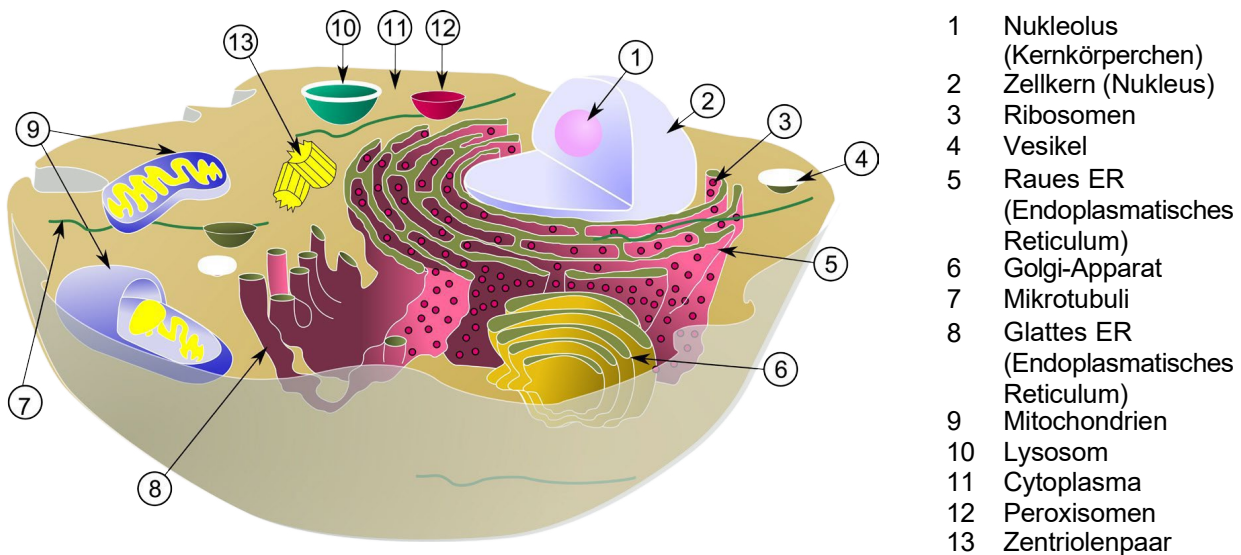


Abb. 1.4: Schematische Darstellung einer eukaryotischen tierischen Zelle

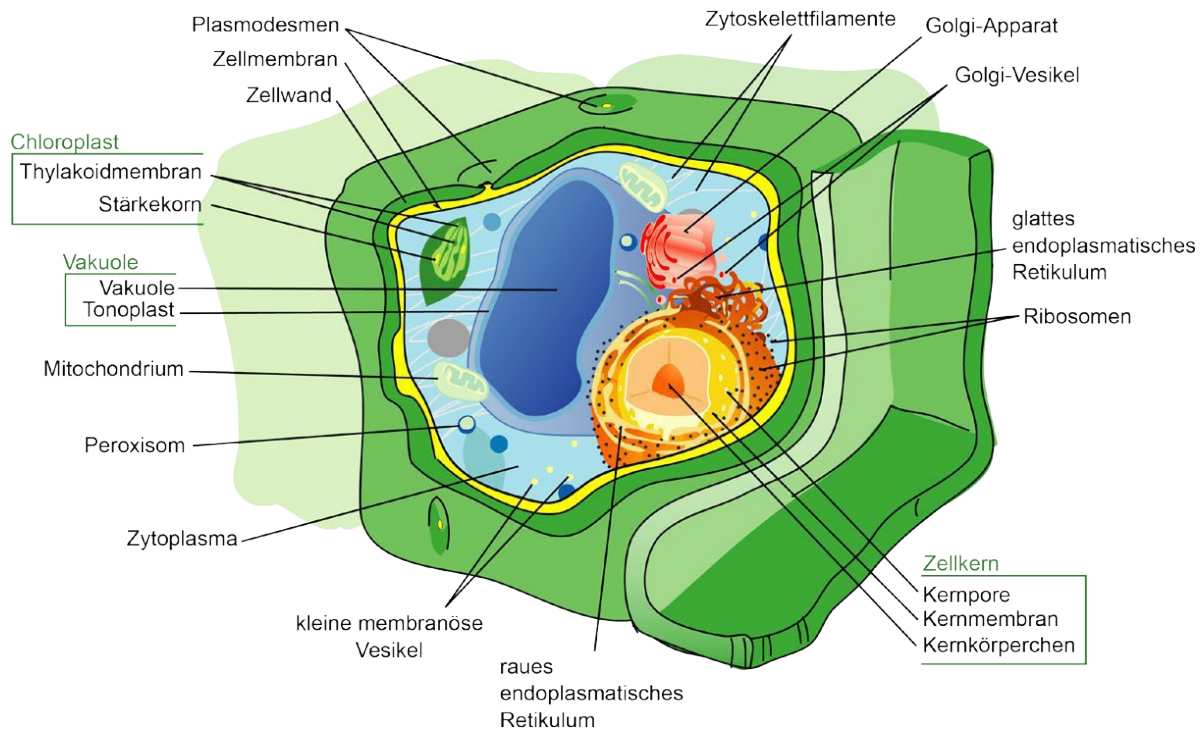


Abb. 1.5: Schematische Darstellung einer eukaryotischen pflanzlichen Zelle

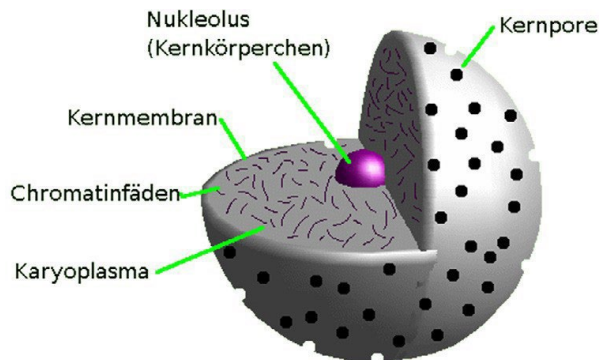


Abb. 1.6: Schematische Darstellung eines Zellkerns

1.3 KOMPARTIMENTE EUKARYOTISCHER ZELLEN

1.3.1 Der Zellkern

Der Zellkern ist von zwei eng aneinander liegenden Membranschichten umgeben, die durch eine Vielzahl von Kernporen durchzogen werden, die eine Kommunikation zwischen Kerninnerem und Cytosol erlauben. Der Zellkern ist also ein intrazelluläres Kompartiment in Eukaryotischen Zellen, der den Großteil des genetischen Materials beherbergt. Die Kernporen bestehen aus einer radiär-symmetrisch angeordneten Struktur aus Proteinen, die Moleküle bis zu einer bestimmten Größe ungehindert passieren lassen. Der Kernporenkomplex spielt eine wichtige Rolle in der selektiven Auswahl von größeren Molekülen und reguliert damit den Transport von RNA- und Proteinmolekülen vom Kerninneren ins Cytoplasma und umgekehrt. Die innere Kernmembran ist mit einem netzartigen Geflecht aus Proteinfilamenten (Kernlamina, einem zu den Intermediärfilamenten zählenden Filamenttyp des Cytoskeletts) überzogen, die dem Kern Form und Festigkeit verleihen.

Im Kerninneren ist der Großteil des genetischen Materials der Zelle in Chromosomen organisiert. Chromosomen bestehen aus einem Komplex von DNA (die Gene bzw. genetische Information tragende Komponente) und Proteinen (DNA und Proteine bilden Chromatinfäden). Dieser Komplex wird als Chromatin bezeichnet, da er sich leicht mit speziellen (basischen) Farbstoffen anfärben lässt (gr. chroma = Farbe). Im Lichtmikroskop werden Chromosomen als unterscheidbare Strukturen nur sichtbar, wenn sie sich in Vorbereitung der Zellteilung verdichten.

Das Genom (gesamte genetische Material einer Zelle) ist nicht nur auf den Zellkern beschränkt. Ein geringer Teil der Gene befindet sich auf eigenen ringförmig angeordneten DNA-Strängen in den Mitochondrien sowie gegebenenfalls bei Pflanzen und Grünalgen auch in den Chloroplasten.

Im Kerninneren befindet sich ein deutlich abgegrenztes Gebilde, der Nucleolus, der die Gene für die Bildung eines speziellen Typs an RNA konzentriert. Dort werden die RNA-Komponenten der Ribosomen (rRNA) erzeugt, die dann mit den in den Kern transportierten ribosomalen Proteinen im Nucleolus zu den ribosomalen Untereinheiten zusammengebaut werden. Die assemblierten rRNA/Protein-Komplexe (die großen und die kleinen ribosomalen Untereinheiten) werden danach über die Kernporen ins Cytoplasma transportiert, wo sie im Zuge der Proteinsynthese zu kompletten Ribosomen vereint werden.

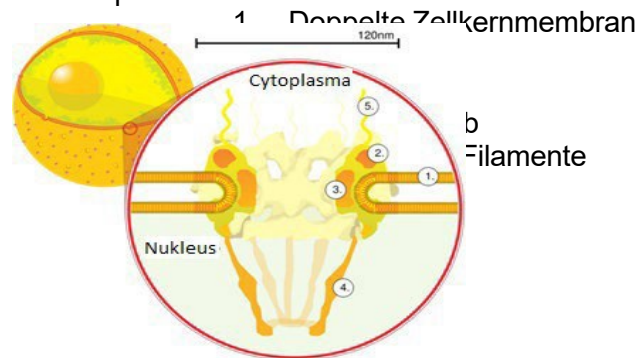


Abb. 1.7: Schematische Darstellung von Zellkernporen

1.3.2 Das Endomembransystem

Viele der membranumschlossenen Organellen sind entweder über direkte Membrankontakte miteinander verbunden (Kern und Endoplasmatisches Reticulum) oder können durch sogenannte Transportvesikel, das sind kleine membranumschlossene Organellen, in Kommunikation treten.

Zum Endomembransystem gehören die äußere Kernmembran, das Endoplasmatische Reticulum, der Golgi-Apparat, Lysosomen, Vakuolen (besonders bei Pflanzen) und die bereits erwähnten Transportvesikel.

Funktionell ist das Endomembransystem der Ort der Synthese von Proteinen (zum Teil) und Membranbestandteilen. Obwohl die Membranen des Endomembransystems miteinander in Verbindung stehen, ist sowohl Zusammensetzung als auch Funktion der einzelnen Membranen spezifisch für die unterschiedlichen Organellen. Allerdings können sich Zusammensetzung und Funktion im Zuge der Kommunikation auch wieder ändern.

Weder die Plasmamembran noch die Membransysteme der Mitochondrien und Chloroplasten werden zum Endomembransystem gezählt. Fraglich ist weiterhin, ob Peroxisomen zum Endomembransystem gerechnet werden können.

Das Endoplasmatische Reticulum (abgekürzt ER)

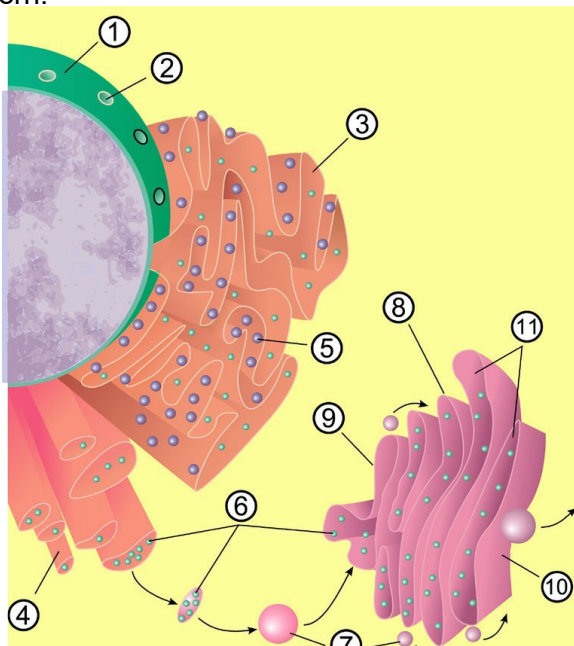
Der Ausdruck wird abgeleitet vom Griechischen endo = innen bzw. Reticulum = Netz, Netzwerk. Das ER ist ein stark verzweigtes Membrannetzwerk aus Röhren (Tubuli), Bläschen und abgeplatteten sackähnlichen Strukturen (Zisternen), die von der ER-Membran umgeben werden. Sie sind direkt in Verbindung mit der äußeren Kernmembran. Das ER kommt in zwei verschiedenen ineinander übergehenden Formen vor: Durch das verschiedene Aussehen in elektronenmikroskopischen Aufnahmen unterscheidet man das glatte Endoplasmatische Reticulum (glatte ER) und das raue Endoplasmatische Reticulum (raues ER). An der cytoplasmatischen Seite der Membran trägt das raue ER (wie auch die mit dem ER in Verbindung stehende Kernmembran) eine Vielzahl an Ribosomen, was namensgebend für das „raue“ ER war, da die Membran im elektronenmikroskopischen Bild körnig und rau erscheint.

Die Hauptfunktion des glatten ER ist die Synthese von Lipiden und Steroidhormonen sowie die Entgiftung (Detoxifizierung von Medikamenten und Giftstoffen). In Muskelzellen speichert das glatte ER besonders Ca^{2+} -Ionen, die bei einem Muskelreiz schlagartig in das Cytosol ausgeschüttet werden und die Muskelkontraktion auslösen. An den Ribosomen des rauen ER werden eine Vielzahl an Proteinen synthetisiert, die mit einem speziellen Mechanismus direkt durch die Membran hindurch transportiert werden. Für diesen Durchtritt sind spezielle Membranproteine verantwortlich, die helfen, das entstehende Polypeptid durch die Membran zu schleusen. Entweder verbleiben die Proteine direkt in der Membran oder sie gelangen ins Lumen des ERs. Dort können sie dann in Transportvesikel verpackt und zu anderen Organellen transportiert werden oder an die Zellmembran gelangen, dort mit der Zellmembran verschmelzen (Sekretorische Vesikel) und ihren Inhalt aus der Zelle sezernieren.

Das Endoplasmatische Reticulum ist also ein Membrannetzwerk und stellt die Synthesefabrik in einer Zelle für Proteine und Lipide dar.

Der Golgi-Apparat

Transportvesikel, die vom ER abgeschnürt werden, können direkt mit dem Golgi-Apparat verschmelzen (nach dem Entdecker Camillo Golgi = spricht [golʒi:] Goldschi). Der Golgi-Apparat kann vergleichsweise als Fabrik für Produktveränderung mit nachgeschalteter Sortieranlage und Frachtzentrum dargestellt werden. Der Golgi-Apparat besteht aus abgeflachten Zisternen, die nicht wie das ER über Membranbrücken verbunden sind. Die einzelnen abgeplatteten Stapel unterscheiden sich in ihrer Dicke sowie Zusammensetzung und weisen daher eine Polarität auf. An der cis-Seite („Empfängerseite“) werden vor allem Transportvesikel aus dem ER empfangen, wogegen an der trans-Seite Vesikel abgeschnürt werden („Senderseite“), die ihren Inhalt an andere Orte der Zelle oder an die Plasmamembran (Sekretion) befördern.



- 1 Kernmembran
- 2 Kernpore
- 3 Raues ER
- 4 Glatte ER
- 5 Ribosom auf dem rauen ER
- 6 Transportvesikel mit Proteinen
- 7 Transport-Vesikel
- 8 Golgi-Apparat
- 9 cis-Golgi-Netzwerk
- 10 trans-Golgi-Netzwerk
- 11 Zisternen des Golgi-Apparates

Abb. 1.8: Schematische Darstellung der Verbindungen von Zellkern, ER und Golgi-Apparat.

Im Zuge des „Durchwanderns“ des Golgi-Apparats werden Proteine, die im ER gebildet wurden, modifiziert, wobei die verschiedenen Zisternen unterschiedliche Reaktionen durchführen. Nach erfolgter Modifikation in einer Zisterne müssen die Proteine durch Vesikel-Abknospung zur nächsten Zisterne transportiert werden für den nächsten Modifikationsschritt. Der Transport erfolgt zwar größtenteils von der cis- zur trans-Seite, es gibt aber auch einen Rücktransport von Vesikeln über die verschiedenen Zisternen zum ER als Bestimmungsort. Durch enzymatische Reaktionen in den Zisternen werden die unterschiedlichen Proteine modifiziert und im Zuge dessen auch sortiert. Beim Verlassen der Vesikel vom trans-Golgi tragen unterschiedliche Transportvesikel auf der Oberfläche spezifische Markierungen, die sie an den entsprechenden Bestimmungsort bringen.

Lysosomen

Lysosomen sind kleine membranumschlossene Organellen, die in der Zelle die intrazelluläre Verdauung von Makromolekülen durchführen. Im Inneren der Lysosomen herrscht ein saurer pH-Wert, verglichen mit dem neutralen pH-Wert des Cytosol. Die für die Zerlegung der Nahrungsbestandteile wichtigen hydrolytischen Enzyme (Hydrolasen) haben einen optimalen Arbeitsbereich im sauren Milieu. Falls ein Lysosom platzt oder löchrig wird, können die in das Cytosol austretenden Enzyme in dem neutralen pH-Bereich nicht mehr arbeiten und der Zelle keinen Schaden durch Selbstverdauung zuführen.

In Lysosomen werden unbrauchbare Moleküle und Nahrungsbestandteile in ihre kleinsten Einheiten zerlegt. Hier erfolgt die Müllbeseitigung innerhalb der Zelle.

Die Lysosomen werden von der trans-Seite des Golgis als Vesikel abgeschnürt und verschmelzen mit sogenannten Endosomen. Das Verschmelzungsprodukt reift dann zum eigentlichen Lysosom, indem die inaktiven Vorstufen der Verdauungsenzyme durch den niedrigen pH-Wert aktiviert werden. Amöben und Protisten ernähren sich indem sie sich kleinere Organismen und Nahrungsteile einverleiben. Durch Einstülpen der Zellmembran und Abschnüren bildet sich eine Nahrungsvakuole, die dann mit einem Lysosom verschmilzt und die aufgenommenen Bestandteile verdaut. Dieser Vorgang wird als Phagozytose bezeichnet.

Die Verdauungsprodukte, die Einzelbestandteile von Makromolekülen, werden anschließend ins Cytosol transportiert und können dann wiederverwertet werden. Spezielle menschliche Blutzellen (Makrophagen) können die Phagozytose auch nutzen, um sich vor in den Körper gelangten Eindringlingen zu schützen.

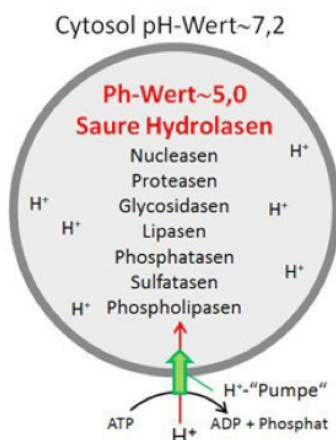


Abb. 1.9: Lysosomen

Vakuolen

Die Funktionen von Vakuolen sind vielfältig und abhängig vom Zelltyp. Im Süßwasser lebende Protisten besitzen eine kontraktile Vakuole, die aufgenommenes überschüssiges Wasser aufnimmt und es wieder aus der Zelle hinausbefördert. Damit verhindern sie das Platzen der Zelle, da sie dem durch die hohe Elektrolytkonzentration innerhalb der Zelle ausgelösten ständigen Einstrom von Wasser entgegenwirken und das Wasser wieder aus der Zelle pumpen.

Pflanzenzellen besitzen einen anderen Typ von Vakuolen (Zellsaftvakuolen) mit einer Vielzahl von Funktionen. Sie können als Speichervakuole dienen und einen Vorrat von Proteinen in Samen anlegen (Beispiel: Erbsen und Bohnen). Auch Ionen (K^+ , Cl^-), Abfallprodukte, Gift-, Duft- und Farbstoffe können in Vakuolen gespeichert werden. Beim Größenwachstum einer Pflanzenzelle bietet die Vakuole einen einfachen Mechanismus durch Wasseraufnahme ihr Volumen beträchtlich zu vergrößern, wobei das Cytosol an die Zellmembran verdrängt wird und kaum an Volumen zunehmen muss. Pflanzenzellen sind von Zellwänden umgeben, sie helfen das Wassergleichgewicht zu erhalten. Sie sind turgeszent (prall gefüllt) und im Allgemeinen in einer hypotonen Umgebung. Die Wasserkonzentration ist in der Umgebung höher als in der Zelle, damit besteht die Tendenz, Wasser aus der Umgebung aufzunehmen. Der Wassereinstrom ist begrenzt durch den „Gegendruck“ der starren Zellwand, die ein übermäßiges Anschwellen der Zelle verhindert. Sind Pflanzenzellen isoton (gleiche Konzentration) bezüglich des umgebenden Mediums, fließt kein Wasser ein, der Turgor (Innen-druck) sinkt und die Zellen erschlaffen (erstes Symptom des Welkens). Wenn das umgebende Medium hypertonisch ist (die Wasserkonzentration außen niedriger ist als in der Zelle), strömt Wasser aus der Zelle aus. Das kann dazu führen, dass sich das Cytoplasma von der Zellwand ablöst (Plasmolyse) und die Zelle abstirbt.

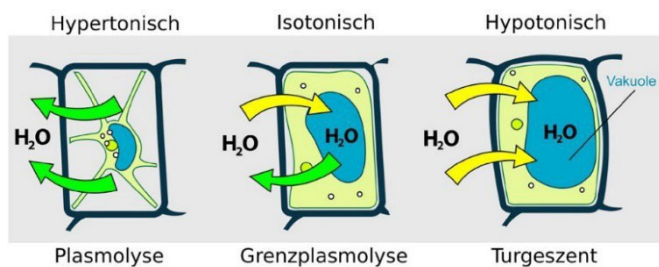


Abb. 1.10: Verhalten der Pflanzen-Vakuole bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen

1.3.3 Ribosomen

Ribosomen sind komplexe Gebilde aus RNA (ribosomale RNA = rRNA) und ribosomalen Proteinen, die die Informationen für den Bau und die Struktur der Proteine, die auf der DNA gespeichert sind, in fertige Proteine umsetzen. Sie sind die Proteinsynthesemaschinerie der Zelle. Sie bestehen aus zwei Untereinheiten (die kleine und die große ribosomale Untereinheit), wobei sich in Prokaryoten und Eukaryoten die Anzahl der rRNA und Proteinmoleküle, aus denen die Untereinheiten gebildet werden, unterscheidet.

Ribosomen kommen in der Zelle in freier Form im Cytosol und in gebundener Form am Endoplasmatischen Reticulum vor. Die auf den Genen der DNA gespeicherte genetische Information für die Proteine wird primär in RNA (mRNA= Messenger RNA) umgeschrieben (transkribiert = lat. transcribere = überschrieben). Diese bindet an die Ribosomen. Erst durch die mRNA entscheidet sich, ob ein Ribosom gebunden am ER vorliegt oder frei im Cytosol verbleibt.

Proteine, die am ER gebundenen Ribosomen synthetisiert werden, gelangen direkt in das Lumen des ERs. An freien Ribosomen werden überwiegend Proteine synthetisiert, die im Cytosol verbleiben und dort ihre Funktionen ausüben.

1.3.4 Mitochondrien und Chloroplasten

Energiegewinnung

Lebewesen beziehen ihre notwendige Energie aus ihrer Umwelt auf unterschiedlichem Weg. Manche, wie etwa Tiere, Pilze oder auch die Bakterien, die im Verdauungstrakt der Tiere leben, erhalten sie, indem sie sich von anderen Lebewesen oder von den von ihnen gebildeten organischen Substanzen ernähren. Solche

Organismen werden organotroph genannt (gr. troph = Nahrung). Andere gewinnen ihre Energie unmittelbar aus der anorganischen Welt. Sie bilden zwei Gruppen: Die eine nutzt die Energie des Sonnenlichts (phototroph = vom Licht lebend) und die andere Energie aus energiereichen Systemen der mineralischen Umgebung, also aus anorganischen Stoffen (gr. lithotroph = vom Gestein lebend).

Organotrophe Organismen (auch wir Menschen gehören zu dieser Gruppe könnten nicht existieren, wenn es nicht diese primären Energieumwandler gäbe. Zu den phototrophen Organismen gehören manche Bakterien, Algen und höhere Pflanzen. Die phototrophen Organismen haben die gesamte Chemie unserer Umwelt verändert. Beispielsweise ist der Sauerstoff in der Erdatmosphäre ein Abfallprodukt ihrer biosynthetischen Tätigkeit.

Lithotrophe Organismen sind keine so auffallenden Erscheinungen in unserer Welt, denn sie sind mikroskopisch klein und leben meist in Umgebungen, die Menschen nicht oft aufsuchen: tief im Ozean, verborgen unter der Erde oder in verschiedenen anderen unwirtlichen Milieus. In eukaryotischen Zellen sind Mitochondrien und Chloroplasten dafür verantwortlich, dass Energie in einer für die Zelle verwertbaren Form bereitgestellt wird.

Mitochondrien und Chloroplasten

- gehören nicht zum Endomembransystem.
- besitzen zwei (Mitochondrien) bzw. drei (Chloroplasten) unterschiedliche Membrantypen
- haben Proteine, die von freien Ribosomen des Cytosols hergestellt werden und in das Innere der Organellen transportiert werden müssen.
- enthalten jeweils eine kleine Menge eigenes genetisches Material in Form einer ringförmigen DNA und eine eigene Proteinsynthese an prokaryotenartigen Ribosomen.

Mitochondrien sind die Organellen des Zellstoffwechsels, die den größten Anteil an ATP (Adenosin-triphosphat, ein Molekül, das in allen Zellen das „Zahlungsmittel“ für Energie benötigende chemische Reaktionen ist) aus dem oxidativen Abbau von Kohlenhydraten, Fetten und Proteinen liefern.

In den Chloroplasten, die nur in Pflanzen und Algen vorkommen, findet die Photosynthese, die Umwandlung von Lichtenergie in chemische Energie, statt. Beide Energiegewinnungsprozesse sind strukturell an Membranen gekoppelt. Zur Vergrößerung ihrer Oberfläche ist die Mitochondrien-Innenmembran in Cristae gefaltet, die Chloroplasten besitzen zusätzlich zu einer Außen- und Innen-membran eine Thylakoidmembran, die einen Thylakoidraum umschließt. Mitochondrien sind in fast allen eukaryotischen Zellen vorhanden, wobei sie sowohl in Gestalt wie auch in ihrer Zahl sehr variabel sind und sich, abhängig vom Energieaufwand der Zelle, in der Gesamtmenge mitochondrialen Raums bezogen auf das Zellvolumen, unterscheiden.

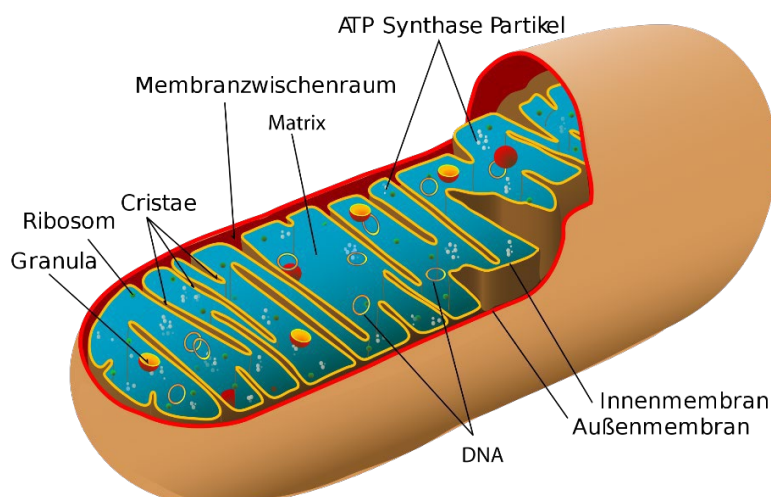


Abb. 1.11: Mitochondrium

Manche spezialisierten Zellen besitzen ein einziges, in einer komplexen Form aufgebautes Mitochondrium, meist sind es aber hunderte kleine kugelige bis zylinderförmige Gebilde mit einer glatten Oberfläche

(Außenmembran). In Mitochondrien ist die innere Membran durch Ausstülpungen vergrößert und bildet damit genügend Platz für membranabhängige biologische Reaktionen, die für die Energiebereitstellung in der Zelle notwendig sind. Die innere Membran ist in zahlreiche sogenannte Cristae gefaltet und bildet damit eine große Oberfläche und einen zusätzlichen Raum, den Membranzwischenraum (Intermembranraum). Der von der Innenmembran umschlossene Innenraum der Organelle wird als Matrixraum bezeichnet und beherbergt Enzyme für spezifische oxidative Stoffwechselwege, die DNA der Mitochondrien und die für die Synthese von einigen organellenspezifischen Proteinen notwendigen Ribosomen. Die Mitochondrien-Innenmembran hat eine spezifische Ausstattung von membrangebundenen Enzymen und Enzymkomplexen zur Zellatmung und ATP-Synthese.

Chloroplasten sind ein spezieller Typ der zu der Gruppe der Plastiden gehörenden Organellen. Farblose Stärke speichernde Plastiden (Amyloplasten) findet man besonders in unterirdischen Speicherorganen der Pflanzen. Plastiden mit einer speziellen Pigmentausrüstung im Unterschied zum Hauptpigment der Chloroplasten, die besonders für die Blütenfarbe verantwortlich sind, bezeichnet man als Chromoplasten. Der charakteristische Farbstoff der Chloroplasten ist das Chlorophyll, das gemeinsam mit anderen Pigmenten (akzessorische Pigmente wie Karotinoide und Xanthophylle) für die Absorption der Lichtquanten des Sonnenlichtes verantwortlich ist. Chloroplasten sind mit zwei Membranen umgeben, wobei die Innenmembran nicht wie bei Mitochondrien durch Einstülpung aufgefaltet und vergrößert ist. Im Inneren der Chloroplasten befindet sich eine zusätzliche Membrankomponente (Thylakoide), die den Thylakoidinnenraum umschließt und sackartig abgeflacht und in miteinander verbundenen Membranstapeln (Granastapel) angeordnet ist. Der Raum zwischen Innenmembran und Thylakoidmembran wird als Stroma bezeichnet und beherbergt ähnlich der Matrix der Mitochondrien Enzyme spezifischer Stoffwechselvorgänge, chloroplastenspezifische DNA und Ribosomen zur Synthese einiger chloroplastenspezifischer Proteine.

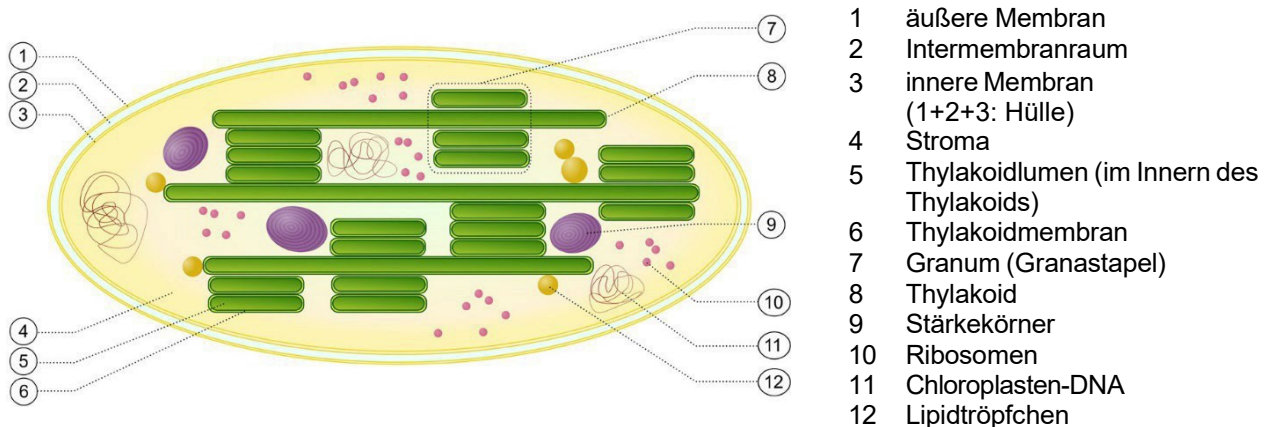


Abb. 1.12: Chloroplast

1.3.5 Peroxisomen

Peroxisomen sind kleine mit einer einzelnen Membran umhüllte Vesikel ohne eigene DNA, in deren Inneren ein ideales Milieu für chemische Reaktionen herrscht, bei denen Wasserstoffperoxid (H_2O_2 , ein starkes Oxidationsmittel und Zellgift) erzeugt und abgebaut wird. Wasserstoffperoxid-erzeugende Reaktionen (bzw. die Enzyme, die Reaktionen katalysieren, bei denen H_2O_2 entsteht) sind somit durch die Kompartimentierung vom Rest der Zelle abgegrenzt. Des Weiteren wird überschüssiges H_2O_2 sofort von einem peroxisomalen Enzym (Katalase) abgebaut. Damit wird gewährleistet, dass die Zelle nicht der schädlichen Wirkung von Peroxiden ausgesetzt wird. Peroxisomen spielen eine Rolle beim Abbau der langkettigen Fettsäuren. Eine spezielle Form von Peroxisomen in fettspeichernden Pflanzensamen (Glyoxisomen) ermöglicht es der Pflanze bei der Keimung, Fette in Kohlehydrate umzubauen. Dieser Prozess versorgt den Keimling so lange mit Energie, bis die Pflanze durch Photosynthese direkt Kohlenhydrate erzeugen kann.

Die „Verwandtschaftsbeziehung“ von Peroxisomen zu anderen Organellen ist nicht geklärt. Lipide für den

Bau der Peroxisomenmembran kommen vom ER, Proteine werden sowohl aus dem Cytosol als auch vom ER beigesteuert und in die Organelle importiert.

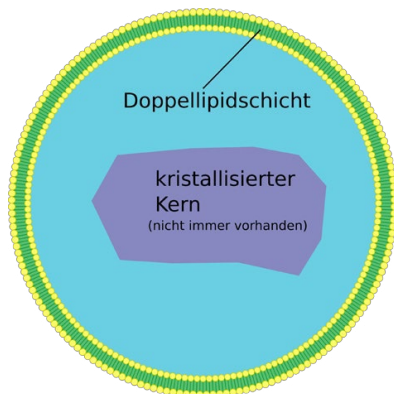


Abb. 1.13: Peroxisom

1.3.6 Das Cytoskelett

Die Fähigkeiten eukaryotischer Zellen, eine Vielzahl von Formen anzunehmen, die vielen Komponenten in ihrem Inneren zu organisieren, mit der Umgebung mechanisch in Wechselwirkung zu treten und koordinierte Bewegungen auszuführen, beruhen auf dem Cytoskelett, einem komplexen Netzwerk aus Proteinfilamenten, das sich durch das gesamte Cytoplasma erstreckt. Diese filamentöse Architektur hilft, die mechanische Stabilität der vergleichsweise großen eukaryotischen Zelle abzusichern. Für tierische Zellen, die keine Zellwände besitzen, ist diese Funktion besonders wichtig. Obwohl manche Komponenten des Cytoskeletts auch in Bakterien vorkommen, ist es in den großen und strukturell komplex aufgebauten eukaryotischen Zellen besonders bedeutend.

Die Funktionen des Cytoskeletts sind: mechanische Stabilität der Zelle, Bewegung der Zelle, Bewegung innerhalb der Zelle. Im Gegensatz zu unserem knöchernen Skelett ist das Cytoskelett eine äußerst dynamische Struktur, die fortwährend neu organisiert wird, sobald die Zelle ihre Gestalt wechselt, sich teilt und/oder auf ihre Umgebung reagiert. Das Cytoskelett repräsentiert nicht nur die „Knochen“ einer Zelle, sondern auch ihre „Muskeln“. Es ist direkt verantwortlich für ausgedehnte Bewegungen, wie das Kriechen von Zellen auf einer Oberfläche, die Kontraktion von Muskelzellen und die Formveränderung von Zellen in der Embryonalentwicklung. Ohne Cytoskelett würden Wunden niemals heilen, Muskeln wären unbrauchbar und Spermien würden nie die Eizelle erreichen. Die Bewegung von Zellen basiert sowohl auf einem gerichteten Auf- und Abbau der Filamente als auch auf der Wirkung von sogenannten Motorproteinen, die unter anderem parallelliegende Filamentstränge aneinander vorbeibewegen können. Auf solch einem Mechanismus beruht z. B. die peitschenartige Bewegung des Flagellums von Spermien. Abgesehen von der Muskelkontraktion und der Bewegung von Zellen durch den extrazellulären Raum haben Motorproteine im Zusammenspiel mit dem Cytoskelett weitere wichtige Funktionen in eukaryotischen Zellen. Sie dienen dem intrazellulären Transport von Organellen, Vesikeln und anderen Lasten entlang von „Cytoskelett-Straßen“ und ermöglichen damit der Zelle, das Cytoplasma zu organisieren. Motorproteine haben auch essenzielle Aufgaben bei der Aufteilung der Chromosomen auf die Tochterzellen und bei deren Abschnüren voneinander bei der Zellteilung.

Das Cytoskelett baut sich aus drei Haupt-Fasertypen auf:

- Mikrotubuli, röhrenartige Fasern ($dd = 25 \text{ nm}$); ①
- Mikrofilamente, auch Aktinfilamente genannt ($dd = 5 - 9 \text{ nm}$); ②
- Intermediärfilamente, die in der Stärke dazwischen angesiedelt sind ($dd = 10 \text{ nm}$)

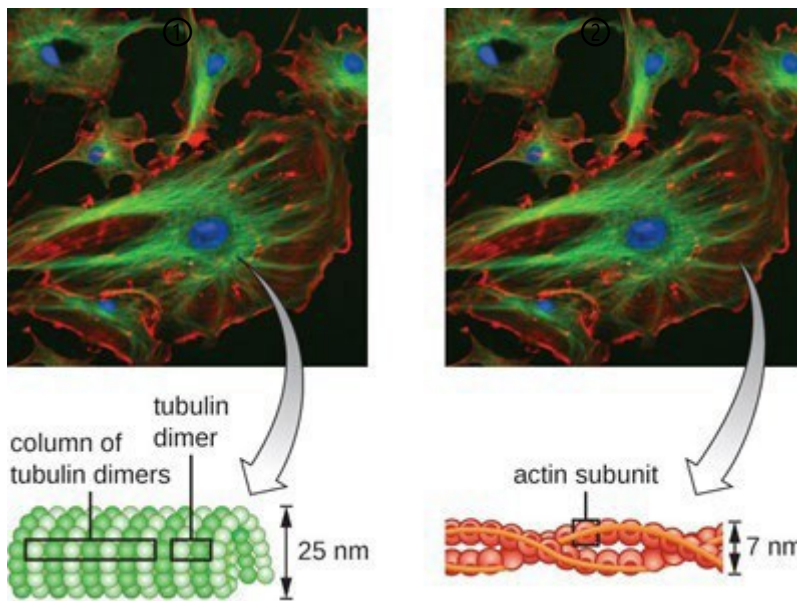


Abb. 1.14: Endothelzellen unter dem Mikroskop (flache Zellen, die Blutgefäße innen auskleiden). Die Zellkerne sind blau gefärbt. Die Mikrotubuli wurden über einen Antikörper grün markiert. Die Aktinfilamente wurden mit rot fluoreszierendem Farbstoff markiert.

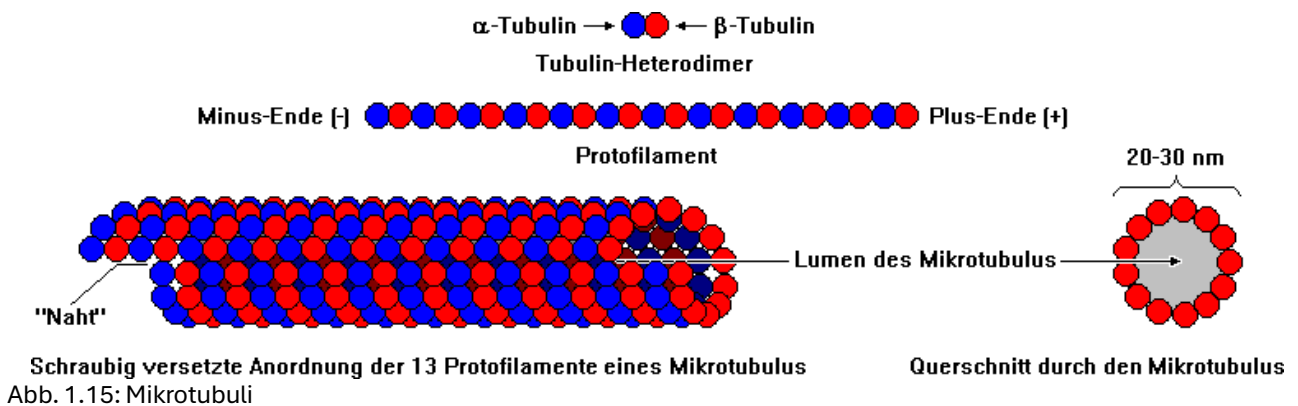


Abb. 1.15: Mikrotubuli

Mikrotubuli

Das sind lange Hohlzylinder (Röhren), gebildet aus den Proteinen α - und β -Tubulin. Diese beiden Untereinheiten (α - und β -Tubulin) bilden ein Heterodimer. Mikrotubuli werden durch Polymerisation der Heterodimere gebildet. Je nach ihrer Aufgabe in der Zelle werden Mikrotubuli nach ihrer Bildung stabilisiert (nach erfolgter Bildung keine Längenänderungen mehr, weder weitere Polymerisation noch Abbau) oder verbleiben in einem dynamischen Zustand, wobei sie schnellen Längenänderungen unterworfen sind, die durch abwechselnde Anlagerung und Abdissoziation von Heterodimeren zustande kommen. Mit ihrer Röhrenstruktur und einem äußeren Durchmesser von 25nm sind Mikrotubuli wesentlich starrer als Aktinfilamente.

Mikrotubuli sind mit einem Ende meist an einem einzigen mikrotubuliorganisierenden Zentrum (MTOC), dem Basalkörper (an der Basis von Flagellen und Geißeln) oder dem sogenannten Zentrosom befestigt. Im Verlauf der Zellteilung wird ein zweites Zentrosom gebildet, mit dessen Hilfe ein symmetrischer, bipolarer Spindelapparat aufgebaut werden kann, der der symmetrischen Aufteilung der Chromosomen in die beiden Tochterzellen dient.

Durch die unterschiedliche Struktur der α - und β -Tubuline sind die Enden des Hohlzylinders nicht ident. Es gibt ein sogenanntes Plus- und Minus-Ende jedes Hohlzylinders, an denen die Anlagerung und Depolymerisierung der Tubulindimere verschieden schnell ablaufen. Die Verankerung an das Zentrosom

oder den Basalkörper erfolgt in allen Fällen über das Minus-Ende.

Hauptfunktionen: Aufrechterhaltung der Zellgestalt (Stützbalken), Zellbewegung (Schwimmen mittels Cilien und Flagellen), Chromosomenaufteilung bei der Zellteilung, intrazellulärer Transport von Organellen, Vesikeln und anderen Lasten (Mikrotubuli als Straßen für Motorproteine).

Aktinfilamente

Aktinfilamente (auch als Mikrofilamente bezeichnet) sind zweisträngige, helikale Polymere aus dem Protein Aktin. Sie sind flexible Stränge mit "5 – 9 nm" Durchmesser, die zu vielfältigen linearen Bündeln, flächigen Netzwerken und räumlichen Gelen organisiert sein können. Aktinfilamente sind zwar überall in der Zelle verteilt, ihre größte Dichte erreichen sie jedoch in der Zellrinde (Cortex) unmittelbar unterhalb der Plasmamembran. Ähnlich wie Mikrotubuli darf man sich Aktinfilamente nicht als fixe seilartige Strukturen vorstellen. Die Enden der Filamente werden laufend abgebaut oder verlängert, wobei auch bei den Aktinfilamenten die Polarität des Stranges eine unterschiedliche Anlagerungs- und Abbaugeschwindigkeit bedingt. Diese Filamenttypen können an einer Stelle in der Zelle rasch abgebaut werden und an einer anderen Stelle wieder polymerisiert werden. Damit kann sich sowohl die Gestalt und Form als auch die Lage der Zelle verändern.

Hauptfunktionen: Aufrechterhaltung der Zellgestalt (Zugspannung) und Veränderung der Zellgestalt, Zellbewegung (Ausbildung von Pseudopodien), Muskelkontraktion, Cytoplasmaströmung, Zellteilung (Ausbildung der Teilungsfurche).

Intermediärfilamente

Diese sind seilähnliche Fasern mit einem Durchmesser von etwa 10nm. In ihrer Struktur sind sie viel stabiler als die anderen beiden Filamenttypen. Sie bestehen aus den Intermediärfilamentproteinen, die eine große, einheitliche Familie bilden. Eine Art der Intermediärfilamente bildet die Kernlamina, ein Geflecht das unmittelbar unterhalb der Kernmembran liegt; andere Arten erstrecken sich durch das Cytoplasma und verleihen der Zelle mechanische Festigkeit. Keratin ist ein Sammelbegriff für verschiedene wasserunlösliche und extrem langlebige Faserproteine, die von menschlichen oder tierischen Organismen gebildet werden und die Hornsubstanz charakterisieren. Sie sind der Hauptbestandteil von Säugetierhaaren, Finger- und Zehennägeln, Krallen, Klauen, Hufen, Hörnern, Nasenhörnern der Nashörner, Stacheln der Igel, Barten der Wale, Schnäbeln und Federn der Vögel, Hornschuppen und äußere Panzerbedeckung der Reptilien. Intermediärfilamente sind extrem haltbare und langlebige Strukturen, die der Zelle mechanische Festigkeit verleihen.

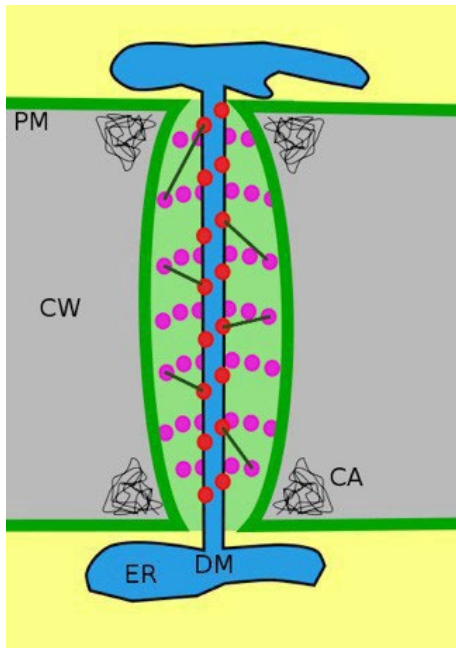
In Epithelien (Zellschichten, die innere oder äußere Oberflächen des Organismus bekleiden, z. B. Darm oder Haut) gewährleisten Intermediärfilamente nicht nur die mechanische Stabilität einzelner Epithelzellen, sondern die Stabilität der ganzen Zellschicht, da die Intermediärfilamente jeder Zelle über Zell-Zell-Verbindungen mechanisch an jene der Nachbarzelle gekoppelt sind.

Hauptfunktionen: Aufrechterhaltung der Zellgestalt (Zugspannung), Verankerung des Zellkerns und anderer Organellen, Bildung der Zellkernlamina.

1.4 ZELL-ZELL-KOMMUNIKATION

Tiere und Pflanzen sind vielzellige Lebewesen. Sowohl Pflanzen als auch tierische Organismen bilden unterschiedliche Gewebe und Organe aus, die aus Verbänden einzelner Zellen bestehen. Die Zellen eines Zellverbandes stehen in Kontakt und kommunizieren miteinander. Die Vielzelligkeit der Lebewesen bedingt, dass Zellen miteinander verbunden und kommunizieren müssen. Für verschiedene Organismen sind dafür unterschiedliche Strukturen ausgebildet. Die beiden großen Organismenreiche, Pflanzen und Tiere, haben unterschiedliche Überlebensstrategien in der Evolution ausgebildet. Da für den Nahrungserwerb bei Pflanzen keine Notwendigkeit besteht, mobil zu sein, können sie sich in der Regel nicht aktiv bewegen. Sie müssen sich vor Fressfeinden schützen, eine feste Struktur ausbilden, sich gegen Austrocknung schützen und andererseits ein Platzen der Zellmembran beim Einstrom von Wasser verhindern. Eine starre extrazelluläre Zellwand bietet für diese Bedingungen einen guten Schutz. Zell-Zell-Verbindungen in pflanzlichen Zellen ermöglichen einen Austausch von Wasser und gelösten niedermolekularen Stoffen. Dazu dienen zahlreiche mit der Plasmamembran ausgekleidete Kanäle, genannt Plasmodesmen (oder auch Plasmodesmata). Über diese Kanäle ist das Cytoplasma jeder Zelle im Zellverband mit dem Cytoplasma ihrer Nachbarzellen verbunden. Damit haben die Zellen

eines Zellverbandes ein gemeinsames Cytoplasma, zumindest was Wasser und niedermolekulare Stoffe betrifft.



CW ... Zellwand
 CA ... Callose (Zellwandbestandteil)
 PM ... Plasmamembran
 ER - Endoplasmatisches Reticulum
 DM... Desmotubulus

rote Kügelchen ... Aktin
 violette Kügelchen ... Andere Proteine und Spikes

Vielzellige Tiere hingegen sind mobil, haben dafür ein Skelett als Stütze und Muskulatur, um sich zu bewegen. Im Unterschied zu Pflanzenzellen bilden sie keine steifen extrazellulären Zellwände aus, sondern verfügen über eine extrazelluläre Matrix, in der die Zellen eingebettet sind. Tierische Zellen sezernieren Glykoproteine (Proteine mit kovalent gebundenem Zuckeranteil) und Proteoglykane. Bei Proteoglykanen ist der Zuckeranteil deutlich höher als der relativ minimalistische Proteinkern. Eines der häufigsten tierischen Matrix-Glykoproteine ist das Kollagen, das außerhalb der Zelle ein festes Fasernetzwerk ausbildet. Kollagen verbindet sich mit einem weiteren Glykoprotein, dem Fibronectin, das seinerseits mit Membranproteinen (Integrine) der Zellen interagiert. Integrine sind auf der cytoplasmatischen Seite der Zelle mit dem Cytoskelett in Verbindung.

Im Gewebeverband sind die Zellen von der extrazellulären Matrix umgeben, ganze Organe müssen aber nach außen hin einen begrenzenden Abschluss (Epithel) besitzen. Als Epithelien werden generell ein- oder mehrzellige Zellschichten bezeichnet, die die inneren und äußeren Oberflächen bedecken. Ein bezeichnendes Beispiel dafür ist die innere Oberfläche des Darms. Hier müssen Nahrungsmittelmoleküle selektiv vom Darminhalt in den Organismus aufgenommen werden. Zellen der Darmepithelien sind mit einem Ring spezieller, haftender Proteine umgeben (sog. Tight junctions), die ein unkontrolliertes Eindringen des Darminhalts in das Gewebe verhindern. Unterhalb des dichten Rings der Tight junctions befinden sich sogenannte Desmosomen, die mit dem Cytoskelett (Intermediärfilamenten) in Verbindung treten und die Zellen untereinander wie mit Nieten fest verbinden. Zum gegenseitigen Austausch kleiner Moleküle durchziehen Gap junctions, vergleichbar mit den Plasmodesmata der Pflanze, die Zellmembran. Sie bestehen aus besonderen Kanalproteinen, die in den Zellmembranen benachbarter Zellen aneinander gegenüberliegenden Stellen Poren und somit Verbindungskanäle bilden. Im Unterschied zu den Plasmodesmen werden sie nicht von einem Cytoplasmastrang durchzogen.

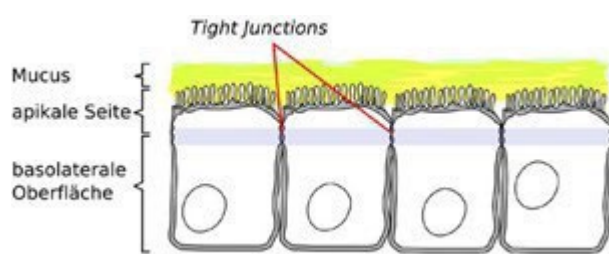


Abb. 1.17: Tight junctions

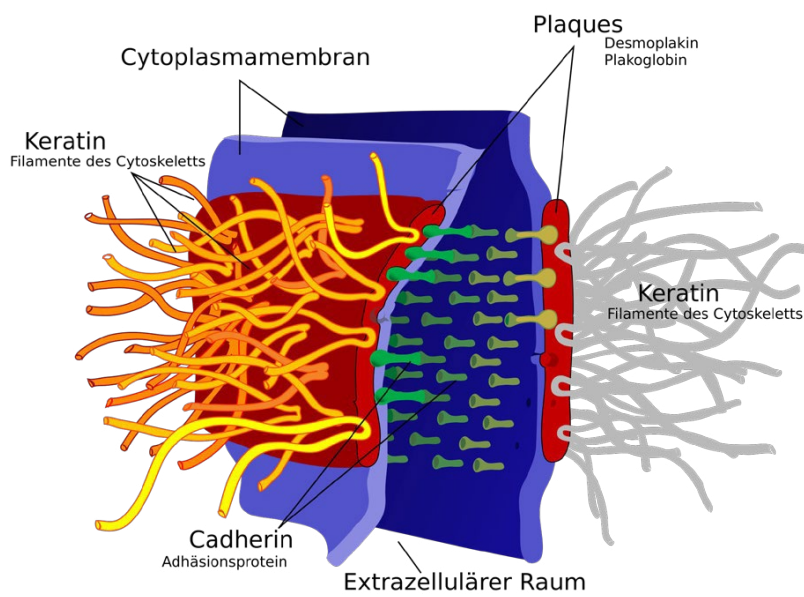
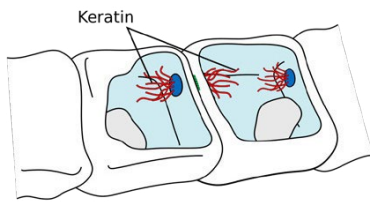


Abb. 1.18: Desmosomen

2 Genetik

2.1 BEGRIFFSBESTIMMUNGEN

Die Gesamtheit der Erbanlagen eines Organismus wird als Genom bezeichnet. Die wesentlichen Informationsträger der Erbanlagen sind die Chromosomen. Diese befinden sich im Zellkern, der in den meisten Körperzellen vorhanden ist. Bei höheren Organismen sind die Chromosomen im Zellkern paarweise vorhanden. So haben Rinder 60 Chromosomen (30 Paare), Pferde 64 (32 Paare) und Hühner 78 (39 Paare). Aufgrund der paarigen Chromosomensätze spricht man von diploiden Organismen. Eine besondere Stellung nehmen die Geschlechtschromosomen ein, da sie in einem der Geschlechter kein homologes Paar bilden (zum Beispiel XY bei männlichen vs. XX bei weiblichen Säugetieren; ZW bei weiblichen vs. ZZ bei männlichen Vögeln). Die Chromosomen des Kerngenoms, die nicht Geschlechtschromosomen sind, fasst man unter dem Begriff Autosomen zusammen. Zusätzlich zum Kern befindet sich auch in den Mitochondrien ein ringförmiges Chromosom, das ebenfalls Erbinformation enthält.

Chromosomen bestehen aus langen Molekülen der Desoxyribonucleinsäure (DNA), die von Proteinen (Histonen) verpackt werden. Die DNA ist ein Kettenmolekül, das aus den Bausteinen Zucker, Phosphatbrücken und den organischen Basen (Adenin, Thymin, Cytosin und Guanin) besteht. Die Basenabfolge kann als Bauplan für die Proteinbildung in den Zellen betrachtet werden und ist zudem Informationsträger für Steuerungsfunktionen im Erbgut.

Die Abschnitte auf den Chromosomen, die für Merkmalausbildungen verantwortlich sind, werden als Gene bezeichnet. Gene liegen an bestimmten Orten im Genom (Genort = Locus); die Lage der Gene auf den Chromosomen wird in sogenannten Genkarten ausgewiesen. Da der Begriff "Gen" mehrere Bedeutungen haben kann, werden oft präzisere Begriffe wie "Locus" (genau bestimmte Region im Genom) und "Allel" (Variante an einem Locus) verwendet. Gene können sich zwischen den Individuen einer Population aufgrund unterschiedlicher Basenabfolge der DNA unterscheiden, auch die verschiedenen (Gen-)Varianten bezeichnet man als Allele eines Gens. Unterschiedliche Allele können zu unterschiedlichen Merkmalsausprägungen (Phänotypen) in den Individuen einer Population führen. Die Zusammensetzung der Allele in einem Individuum wird als Genotyp bezeichnet. Trägt ein Individuum an einem Locus zwei idente Allele wird dieser Genotyp als homozygot (reinerbig) bezeichnet, trägt es zwei unterschiedliche Allele wird dieser Genotyp als heterozygot (mischerbig) bezeichnet.

Mutationen sind plötzliche Veränderungen des Erbguts. Mutationen passieren zufällig und führen zu neuer genetischer Variation (also zu neuen Allelen). Äußere Einflüsse (wie zum Beispiel Strahlung und Gifte) können die Häufigkeit, mit der Mutationen auftreten, erhöhen. Passieren Mutationen in der Keimbahn können sie in die nächste Generation weitervererbt werden.

2.2 DER ZELLZYKLUS

Um zwei genetisch idente Tochterzellen zu bilden, muss unter anderem das Erbgut verdoppelt werden, sodass zwei komplette Kopien entstehen. Das verdoppelte genetische Material muss dann genau zwischen den beiden Tochterzellen aufgeteilt werden, sodass in jeder Tochterzelle eine vollständige Kopie des Genoms vorhanden ist.

Zusätzlich zur Verdopplung ihrer Genome vermehren die meisten Zellen auch ihren übrigen Inhalt, z. B. Organellen und Makromoleküle. Täten sie das nicht, würden sie mit jeder Teilung kleiner. Um ihre Größe konstant zu halten, müssen Zellen Wachstum (d.h. die Zunahme ihrer Masse) und Teilung aufeinander abstimmen. Das genetische Material (auch Erbgut oder Genom genannt) in Eukaryoten ist in Chromosomen organisiert.

Bakterien besitzen meist nur ein ringförmig geschlossenes DNA-Molekül, Eukaryoten besitzen mehrere lineare doppelsträngige DNA-Stränge, genannt Chromosomen. Das menschliche Genom ist, wenn es in gestreckter Form vorliegen würde, ca. 2 m lang, dennoch beträgt der Durchmesser des Zellkerns nur 5 bis 8 µm. All dieses genetische Material in einem so kleinen Raum zu verstauen, ist mit der Aufgabe vergleichbar, 20 km extrem feinen Drahtes ordentlich in einen Tennisball zu verpacken.

In eukaryotischen Zellen sind die enorm langen doppelsträngigen linearen DNA-Moleküle in einzelne Chromosomen verpackt, die nicht nur in einen Zellkern passen, sondern bei jeder Zellteilung, nach der

Verdopplung, auch noch auf Tochterzellen verteilt werden müssen. Die komplexe DNA-Verpackung wird durch spezielle Proteine ausgeführt, die an die DNA binden und in eine Folge von Windungen und Schleifen falten, die stufenweise eine immer höhere Organisation ergeben. Der Komplex aus DNA und Proteinen wird als Chromatin bezeichnet. Der Kondensierungsgrad im Chromatin ist dynamisch. Trotz der Kondensierung bleibt die DNA zugänglich für viele Enzyme, die für ihre Replikation (Verdopplung), Reparatur bzw. für die Regulation der Genexpression zuständig sind.

Alle Arten eukaryotischer Zellen haben eine bestimmte Anzahl von Chromosomen. Beim Menschen sind somatische Zellen diploid ($2n$) und Fortpflanzungszellen haploid (n). Die diploiden somatischen Zellen (das sind alle Zellen des Organismus mit Ausnahme der Fortpflanzungszellen) des Menschen besitzen 46 Chromosomen (22 Autosomenpaare und 2 Gonosomen/Geschlechtschromosomen). Je 23 davon stammen von einem der beiden Elternteile. Die Fortpflanzungszellen (auch genannt Gameten), zu denen die Eizellen und die Spermien gehören, besitzen einen haploiden Chromosomensatz (n); in Menschen sind das 23 Chromosomen – 22 Autosomen und 1 Geschlechtschromosom (X oder Y).

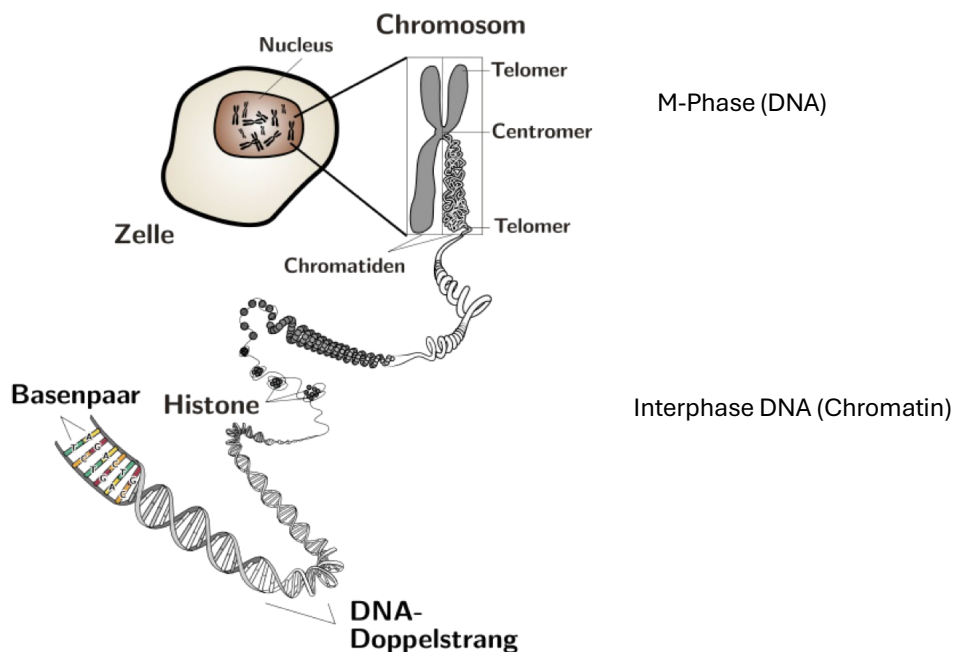


Abb. 2.1: Chromosom

2.2.1 Die wichtigsten Vorgänge des Zellzyklus

Der Zellzyklus wird in vier verschiedene Phasen aufgeteilt, wobei nur in der Teilungsphase der Chromosomen (Mitose, M-Phase) diese sichtbar sind (Abb.2.1). In der Synthesephase (S-Phase) wird die DNA verdoppelt, dieser Vorgang wird als DNA-Replikation bezeichnet. Die Chromosomen bestehen nach der Verdopplung aus zwei eng beieinanderliegenden Schwesterchromatiden aus identischer DNA. Die beiden Schwesterchromatiden werden durch spezielle Proteinkomplexe, den Kohäsion-Proteinen, über ihre ganze Länge zusammengehalten, wobei die engste Verbindung im Bereich der Centromere vorliegt. Jedes Chromosom besitzt ein Centromer, welches durch spezifische DNA-Sequenzen definiert ist, und an welchem in der Mitose ein Protein-Komplex ausgebildet wird, an den Mikrotubuli binden können. Bei der Trennung der Schwesterchromatiden bleibt der Zusammenhalt der beiden DNA-Doppelstränge im Centromer-Bereich am längsten erhalten.

Die Schwesterchromatiden werden in der M-Phase auf die Tochterzellkerne verteilt; erst danach teilt sich die Zelle selbst in einem weiteren Vorgang (Zytokinese/Cytokinese) in zwei unabhängige Zellen. Zwischen der M-Phase und der folgenden S-Phase erstreckt sich eine Zwischenphase, die G_1 -Phase (G aus dem engl. Gap/ Lücke). Eine zweite Zwischenphase zwischen S-Phase und M-Phase wird als G_2 -Phase bezeichnet. G_1 -, S- und G_2 -Phase werden zusammen als Interphase bezeichnet, die auch in schnell teilenden Zellen oft mehr als 90% der Zeit des Zellzyklus einnimmt. Im Mikroskop betrachtet, ist die

Interphase eine scheinbare Ruhephase der Zelle; tatsächlich ist es aber die Phase des Zellzyklus, in welchem die Zelle ihre für den Gesamtorganismus lebenswichtigen Funktionen ausführt und zusätzlich sowohl ihre Masse als auch ihr Erbgut verdoppelt.

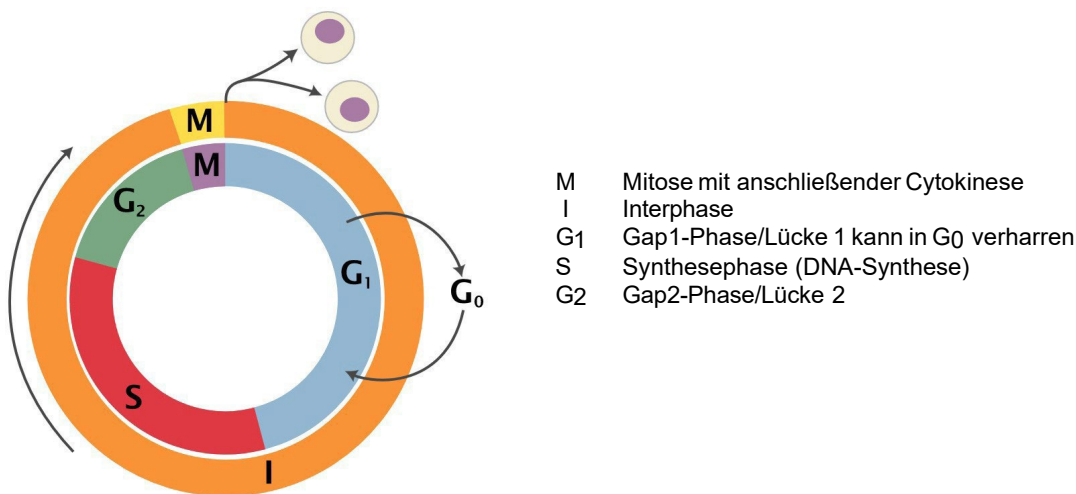


Abb. 2.2: Der Zellzyklus

2.2.2 Die Mitose

Der Spindelapparat

Ein für die Trennung der Schwesterchromatiden in der Mitose notwendiger „Spindelapparat“ wird aufgebaut. Er besteht aus Mikrotubulifasern und assoziierten Proteinen und wird aus vorhandenen Tubulindimeren durch Polymerisation aufgebaut. Dabei werden in der Zelle vorhandene Mikrotubuli-stränge in die einzelnen Bestandteile zerlegt (depolymerisiert) und die freiwerdenden α - und β -Tubulindimere als Baumaterial verwendet. Im Laufe der Mitose erreichen die Mikrotubuli eine komplexe Struktur an den Chromosomen, den Kinetochor, der an den Centromeren der Chromosomen lokalisiert ist, und binden dort.

Die Phasen der Mitose

Die Mitose wird in fünf mikroskopisch gut sichtbare Teilbereiche unterschieden (Pro-, Prometa-, Meta-, Telo- und Anaphase). Die einzelnen Stadien unterscheiden sich charakteristisch im Aussehen des Spindelapparates, in der Lage und der Verdichtung der Chromosomen und in der Ausbildung der Kernhülle.

- **Prophase**

Die Chromatinfasern kondensieren (verkürzen sich) zu deutlich sichtbaren Chromosomen mit Schwesterchromatiden, die an den Centromeren ganz eng beieinanderliegen. Außerhalb des Kerns gelegen, bewegen sich die in der Interphase verdoppelten Centrosomen (mit je einem Centriolenpaar) auseinander. Die Centrosomen wirken als mikrotubuliorganisierende Zentren (englisch microtubule organising center, MTOC) und sind Ausgangspunkte für die Ausbildung des mitotischen Spindelapparats (Mitosespindel). Die Mikrotubuli wachsen ausgehend von den beiden Centrosomen und drängen die beiden Centrosomen auseinander. Die Kernhülle fragmentiert.

- **Prometaphase**

Die Kernhülle löst sich ganz auf (zerfällt) und die Chromosomen sind maximal verkürzt. Die Centrosomen sind an den gegenüberliegenden Polen der Zelle angekommen, wobei die davon ausgehenden Mikrotubuli in die ehemalige Kernregion einwandern und an die Kinetochorstrukturen der Centromere binden (Kinetochor-Mikrotubuli). Andere Mikrotubulifasern (polare Mikrotubuli) sind nicht mit den Kinetochoren verbunden, interagieren aber mit den Mikrotubuli des gegenüberliegenden Pols. Ausgehend von den Centrosomen interagiert ein wieder anderer Typ der Mikrotubuli (Astral-Mikrotubuli) mit dem Zellcortex. Die Chromosomen können nun mittels der anhaftenden Mikrotubuli bewegt, ausgerichtet und angeordnet werden.

- **Metaphase**

Die Chromosomen bilden eine sogenannte „Metaphaseplatte“, indem sie sich alle in einer Ebene genau in der Mitte zwischen den beiden Centrosomen anordnen. Alle Kinetochore der Schwesterchromatiden sind über Kinetochormikrotubuli mit den gegenüberliegenden Spindelpolen verbunden.

- **Anaphase**

Die Schwesterchromatiden werden durch die Auflösung der verbindenden Kohäsinkomplexe getrennt. Durch das Verkürzen der Kinetochor-Mikrotubuli, die an den Kinetochoren gebunden sind, wird jedes Chromatidenpaar in zwei eigenständige Chromosomen getrennt und an entgegengesetzte Pole der Zelle gezogen. Die polaren Mikrotubuli verlängern sich, drängen die Pole weiter auseinander und strecken gleichzeitig die Zelle. Am Ende der Anaphase sind die Chromosomen an den Polen angekommen, wobei beide Pole jetzt einen vollständigen Chromosomensatz besitzen.

- **Telophase**

Die Mikrotubuli depolymerisieren und zerfallen. Die Chromosomen werden von einer neuen Kernhülle umgeben und die Chromosomen dekondensieren wieder. Nach Abschluss der Dekondensation hat der Kern wieder die Arbeitsform. Es sind somit zwei Tochterkerne mit einem vollständigen Chromosomensatz entstanden.

Auf die Telophase folgt in den meisten Fällen die Zytokinese/Cytokinese, mit der die Tochterkerne dann zwei eigenständige Tochterzellen bilden.

Diese eigentliche Zellteilung ist jedoch nicht Bestandteil der Mitose. Es werden in tierischen Zellen durch Einschnürung unter Bildung einer Teilungsfurche die beiden Zellen getrennt. Die Furchung erfolgt immer senkrecht zur Längsachse der Mitosespindel. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Teilungsfurche zwischen den beiden getrennten Tochterchromosomensätzen verläuft und jede Tochterzelle einen identischen und vollständigen Chromosomensatz erhält.

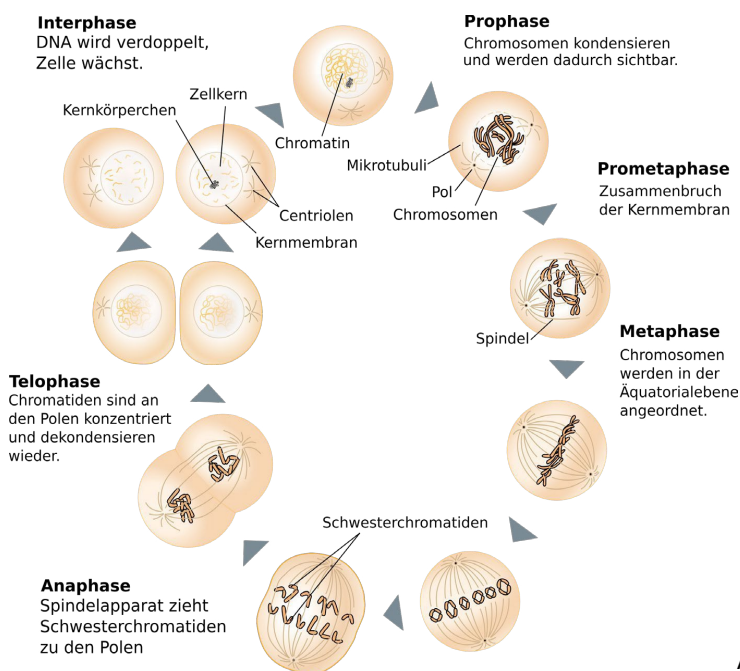


Abb. 2.3: Die Phasen der Mitose

2.2.3 Die Kontrolle des Zellzyklus

Der Zellzyklus muss in einem komplexen Organismus streng kontrolliert werden. Die Teilungsraten unterscheiden sich drastisch zwischen verschiedenen Zelltypen. Zum Beispiel teilen sich Hautzellen regelmäßig über die gesamte Lebensspanne eines Organismus, wohingegen manche Muskelzellen oder auch Nervenzellen die Teilung komplett eingestellt haben. Zu den Faktoren, die den Zellzyklus regulieren,

gehören äußere Faktoren wie Zellgröße und das Nährstoffangebot. Auch die An- oder Abwesenheit von Nachbarzellen spielt eine Rolle. Tierische Zellen, die dicht gewachsen sind, teilen sich nicht mehr weiter, sie gehen in das G₀-Stadium über. Weiterhin steuern in Geweben, die für sie bestimmten, Wachstumsfaktoren den Verlauf des Zyklus.

Es gibt drei verschiedene Regulationsübergänge oder Kontrollpunkte („check points“), an denen der Zellzyklus überwacht und gegebenenfalls angehalten werden kann. Das Kontrollsystem blockiert den Fortgang durch jeden dieser Kontrollpunkte, falls es Probleme innerhalb oder außerhalb der Zelle „bemerkt“.

Krebszellen unterlaufen diese Kontrollpunkte und entgehen damit dieser Kontrolle. Sie teilen sich ungeordnet, rasch und lebenslang.

Der **erste Kontrollpunkt** ist der Start (G₁-Kontrollpunkt oder der Restriktionspunkt) in der späten G₁-Phase, wo sich die Zelle festlegt, in den Zellzyklus einzutreten und die Chromosomen zu verdoppeln. Falls z. B. die extrazellulären „Umweltbedingungen“ für die Zelle ungünstig sind, bleibt der Zellzyklus hier stehen und die Zelle begibt sich in die sogenannte G₀-Phase, was zu einem Stopp in der Zellteilung führen kann (wie oben bei den Nervenzellen erwähnt). Sobald die Zelle den G₁-Kontrollpunkt hinter sich hat, durchschreitet sie normalerweise rasch den gesamten restlichen Weg des Zellzyklus – bei Säugetieren typischerweise innerhalb von 12 bis 24 Stunden. Deshalb heißt der G₁-Kontrollpunkt manchmal auch Start, weil sich die Zelle beim Durchschreiten dieses Punktes darauf festlegt, den gesamten Teilungszyklus abzuschließen.

Der **zweite Kontrollpunkt** ist der G₂/M-Kontrollpunkt, an dem das Kontrollsystem die frühen mitotischen Ereignisse auslöst, die zur Ausrichtung der Chromosomen an der Spindel in der Metaphase führt. Das Kontrollsystem kontrolliert in diesem Punkt, ob die gesamte DNA vollständig repliziert ist oder sich noch Schäden in der DNA befinden, die nicht repariert worden sind. Wenn dies der Fall ist, darf die Zelle nicht in die Mitose eintreten, denn die Tochterzellen hätten dann keine intakten Kopien des Genoms.

Der **dritte Kontrollpunkt** ist der Metaphase-zu-Anaphase-Übergang (Metaphase/Anaphase-Kontrollpunkt), an dem das Kontrollsystem die ordnungsgemäße Trennung der Schwesterchromatiden gewährleistet; dies führt zum Abschluss der Mitose und zur Cytokinese. Ein Halt in diesem Kontrollpunkt erfolgt, wenn nicht alle Chromosomen korrekt an die Mitosespindel (Kinetochor-Mikrotubuli) angeheftet sind. Dies würde zu einer Ungleichverteilung der Chromosomen in den beiden Tochterzellkernen führen, da zum Beispiel beide Schwesterchromatiden an einen Pol gezogen werden würden und die andere Zelle dieses Chromosom dann überhaupt nicht aufweist. Darüber hinaus werden viele Vorgänge in der Zelle im Laufe des Zellzyklus kontrolliert, z. B. der Energiestatus, die Zahl der Organellen, etc.. Störungen führen dann ebenfalls zu einem Anhalten des Zellzyklus an einem der Kontrollpunkte.

Start Kontrollpunkt

Check: Sind die Umweltbedingungen günstig?

JA → Beenden der G₁-Phase, Eintritt in den Zellzyklus und die S-Phase (DNA - Synthese)

G₂/M Kontrollpunkt

Check: Wurde die gesamte DNA verdoppelt?
Sind die Umweltbedingungen günstig?

JA → Eintritt in die Mitose

Metaphase/Anaphase Kontrollpunkt

Check: Sind alle Chromosomen an den Spindelapparat angeheftet?

JA → Beendung der Mitose und weiter zur Zellteilung (Cytokinese)

Tabelle 2.1: Kontrollpunkte des Zellzyklus

Wesentliche Regulatoren und Steuerungssysteme des Zellzyklus sind Cycline und cyclinabhängige Kinasen (CDKs, Cycline Dependent Kinases).

Das sind spezielle Zellzyklusproteine, die zu bestimmten Zeitpunkten im Zyklus verstärkt exprimiert werden, bis ihre Konzentration ein Maximum erreicht. Danach werden die Cycline schnell abgebaut. CDKs und die zugehörigen Cycline bilden Komplexe. Die CDKs aktivieren spezifisch eine Reihe anderer Proteine und steuern so den Zellzyklus.

Kinasen sind Enzyme, die andere Proteine phosphorylieren können. Ihre Aktivität besteht in der Erkennung von bestimmten Proteinen anhand ihrer Struktur und Aminosäuresequenz und darin, Phosphorylgruppen an definierten Positionen der erkannten Proteine anzuhängen. Diese Modifikation führt zu einer Aktivierung oder Hemmung der Aktivität des phosphorylierten Proteins.

Wie der Name schon hinweist, werden die cyclinabhängigen Kinasen (CDK = ‚cyclin-dependent kinases‘) selbst erst durch die Bildung eines Komplexes mit der zweiten Gruppe der Proteine, den Cyclinen, aktiviert. Der Name „Cycline“ leitet sich vom cyclischen Verlauf der Konzentration dieser Proteine während des Zellzyklus ab. Die Aktivität der CDKs steigt und fällt in Abhängigkeit von der Konzentration der jeweiligen Cyclin-Partner.

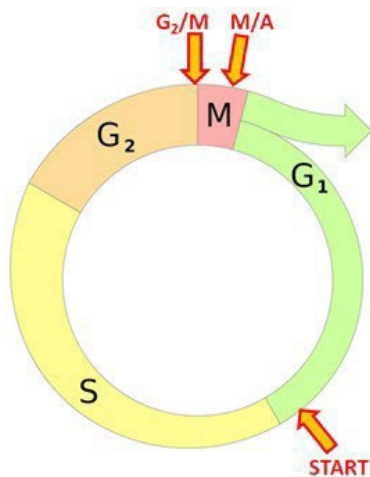


Abb. 2.4: Die Kontrollpunkte im Zellzyklus

Glossar:

Centromer: Bereich eines Chromosoms, welcher durch spezifische DNA-Sequenzen definiert ist. In der Mitose wird hier ein Proteinkomplex (Kinetochor) ausgebildet, an den Mikrotubuli binden können. Die Schwesterchromatiden werden am Centromer am längsten zusammengehalten.

Centrosom: Elektronendichter Bereich im Cytoplasma, mikrotubuliorganisierendes Zentrum mit je einem Centriolenpaar.

Schwesterchromatide: Sequenzidentische DNA-Doppelstränge nach der Neusynthese von DNA mit den zugehörigen Chromatidproteinen.

Kinetochor: Proteinkomplex, der an den Centromeren der Chromosomen lokalisiert ist. An diesen binden die Mikrotubuli, die in der Anaphase-Telophase die Schwesterchromatiden auseinanderziehen.

Zellcortex: Bereich des Cytoplasmas unmittelbar an der Zellmembran, reich an Cytoskelettelementen.

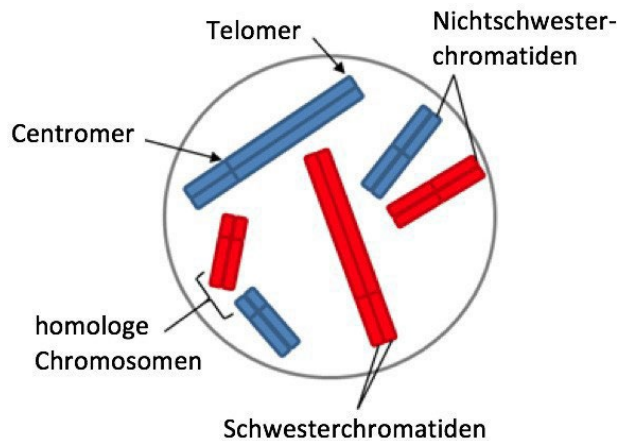


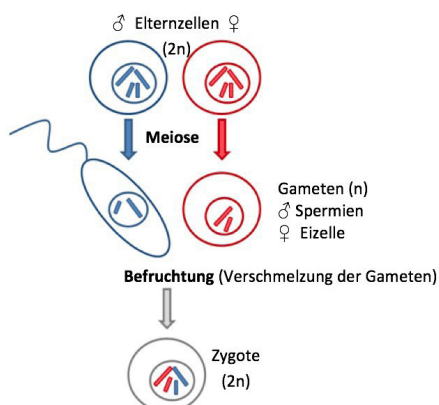
Abb. 2.5: Metaphase-Chromosomen einer diploiden Zelle
($2n = 6$)

2.3 CHROMOSOMENSÄTZE, MEIOSE UND VERERBUNGSLEHRE

Bei einem Großteil der höheren Eukaryoten hat sich das Prinzip der Vermischung des halben genetischen Materials zweier Individuen in der Evolution konsequent durchgesetzt. Ein daraus abgeleiteter Organismus besitzt je eine Kopie der Chromosomenpaare beider Elternteile (diploider Chromosomensatz; $2n$). Damit sich der Chromosomensatz in jeder aufeinanderfolgenden Generation nicht verdoppelt, bedingt dieser Typ von Fortpflanzung, dass in den für die Fortpflanzung verwendeten Fortpflanzungszellen (Gameten) die Chromosomenzahl auf die Hälfte reduziert wird (haploider Chromosomensatz; n). Dieser Prozess, die sog. Reduktionsteilung, wird als Meiose bezeichnet. Spezielle Abläufe in der Meiose gewährleisten, dass in den resultierenden Gameten von jedem Chromosom nur eine Kopie vorhanden ist. Bei getrennt geschlechtlichen Tierarten entstehen die weiblich bzw. männlich differenzierten Gameten (Eizellen und Spermienzellen) in verschiedenen Individuen.

Schema der sexuellen Fortpflanzung: Die sexuelle Fortpflanzung ist von den Einzellern bis zu den höchst entwickelten Lebewesen durch zwei Schritte gekennzeichnet:

- durch die Meiose – diese erfolgt jeweils in einer bestimmten Phase der Entwicklung eines Lebewesens und führt zur Bildung von Gameten.
- durch die Befruchtung, wobei zwei Gameten verschmelzen und sich ihre Kerne vereinigen (Karyogamie).



2.3.1 Chromosomensätze

Wenn man eine menschliche somatische Zelle (alle Zellen außer den Fortpflanzungszellen) im Mikroskop betrachtet, kann man durch Zuhilfenahme spezieller Färbungsmethoden jedes der 46 Chromosomen nach Größe, Bandenmuster, Lage des Centromers und Länge der Chromosomenarme zuordnen. Das menschliche Karyogramm weist jeweils zwei Exemplare von Chromosom 1-22 (44 Autosomen) und zusätzlich zwei Geschlechtschromosomen (2 Gonosomen) auf, nämlich zwei X-Chromosomen im weiblichen bzw. ein X- und ein Y-Chromosom im männlichen Organismus. In einer diploiden somatischen Zelle gibt es beim Menschen also 22 Paare homologer Chromosomen, wobei immer ein Chromosom jedes Paares vom mütterlichen und eines vom väterlichen Elternteil beigesteuert wird. Das ebenfalls vorhandene Gonosomenpaar ist entweder homolog ($X + X$) oder nicht ($X + Y$).

Die Bezeichnung n gibt die Anzahl der Chromosomenpaare ($n=23$ beim Menschen) bzw. die Anzahl der Chromosomen in einer haploiden Zelle wieder, wogegen $2n=46$ die Anzahl der Chromosomen in einer diploiden Zelle bezeichnet. Menschliche Zellen besitzen also 46 Chromosomen; ausschließlich Ei- und Samenzellen besitzen 23 Chromosomen.

- Weibliche humane Fortpflanzungszellen (Eizellen = Oozyten) haben 22 Autosomen und ein X-Chromosom.
- Männliche humane Gameten (Samenzellen = Spermien) hingegen haben 22 Autosomen und zusätzlich zu 50% ein X- oder zu 50% ein Y-Chromosom.

Da sich bei der Befruchtung eine Oozyte (tragen immer ein X-Chromosom) und ein Spermium (50% der Spermien tragen ein X-, 50% ein Y-Chromosom) vereinigen, wird eine Geschlechterverteilung in den Nachkommen von ca. 50% männlichen und 50% weiblichen Nachkommen gewährleistet.

Der Lebenszyklus des durch sexuelle Fortpflanzung entstandenen Individuums beginnt mit der Verschmelzung von haploiden Gameten (Oozyten und Spermien) unter Bildung einer diploiden Zygote (befruchtete Eizelle). Die Reduktionsteilung läuft in weiblichen und männlichen Organismen in speziellen Organen und zu unterschiedlichen Zeiten der Entwicklung ab. Im Laufe der Embryonalentwicklung wandern Zellen in die sogenannte Genitalleiste ein und durchlaufen als Oogonien und Spermatogonien die Meiose. In den Eierstöcken (Ovarien) reifen die Eizellen (Oozyten), wobei die Meiose in der Entwicklung des weiblichen Organismus schon in der Embryonalphase vor der Geburt beginnt, aber erst nach der Pubertät jeweils einmal im Monat für meist nur eine reife Oozyte abgeschlossen wird. Die Meiose im männlichen Organismus erfolgt in den Hoden, beginnt aber erst mit der Geschlechtsreife. Im Hoden treten ab der Pubertät kontinuierlich immer wieder neue Zellen in die Meiose ein. Durch die Befruchtung reifer Eizellen mit Samenzellen wird der Kreislauf des Lebenszyklus geschlossen.

2.3.2 Die Meiose

Wie bei der Mitose wird vor der Meiose das genetische Material in der S-Phase durch DNA-Replikation verdoppelt. Die Zelle hat danach einen diploiden Chromosomensatz ($2n$) und jedes Chromosom besitzt Schwesterchromatiden. Um haploide Gameten (n) für die Fortpflanzung zu erhalten reicht also eine einzige Reduktionsteilung nicht aus. Die Zellen müssen zwei Teilungen vollziehen, sie werden als Meiose I und Meiose II bzw. erste und zweite meiotische Teilung bezeichnet. Beide meiotischen Teilungsschritte werden in Prophase, Metaphase, Anaphase und Telophase/Cytokinese unterschieden, wobei zwischen Meiose I und Meiose II keine zwischengeschaltete DNA-Synthese stattfindet.

Nach Paarung der homologen Chromosomen werden in der Anaphase I der Meiose I die Schwesterchromatiden *nicht* getrennt, sondern bleiben über ihr Centromer aneinandergebunden. Es werden hier die homologen (mütterlichen und väterlichen) Chromosomen aufgeteilt. In der Anaphase der Meiose II werden dann (analog der Mitose) die Schwesterchromatiden voneinander getrennt. Von einer diploiden Zelle (mit verdoppelter DNA) ergeben sich dann vier haploide Gametenzellen. Die Meiose garantiert so, dass nach der Befruchtung wieder ein Organismus mit diploidem Chromosomensatz ($2n$) entsteht und noch dazu ein Austausch des genetischen Materials erfolgt (s.u.).

Die Meiose I

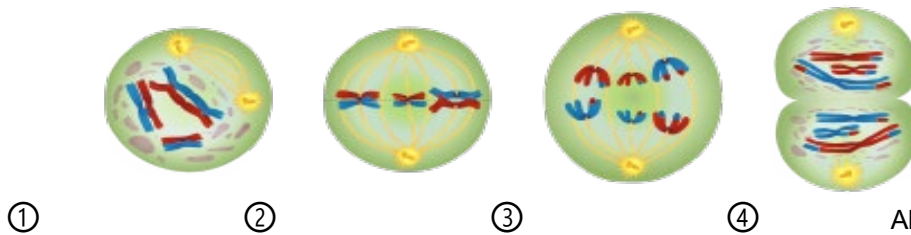


Abb. 2.7a: Die Meiose I

①	Prophase I	(Noch mit Fragmenten der Zellkernhülle); die replizierten homologen Chromosomen (blau vom Vater, rot von der Mutter) paaren sich und tauschen homologe Segmente aus.
②	Metaphase I	Die homologen Paare ordnen sich in der Metaphaseplatte.
③	Anaphase I	Die homologen Chromosomenpaare trennen sich.
④	Telophase I	der ersten meiotischen Teilung folgt: Es entstehen zwei haploide Zellen, jedes Chromosom besitzt zwei Schwesterchromatiden.

Nach Auflösen der Kernhülle und Verdichtung der Chromosomen kommt es in der **Prophase I** zu einer Paarung der homologen Chromosomen. Die replizierten Chromosomen (mit zwei Schwesterchromatiden) beider Elternteile lagern sich zuerst locker aneinander (Synapsis), wobei die homologen Chromosomenabschnitte direkt aneinanderliegen. Danach bilden die Homologen (auch Bivalente genannt) mit speziellen Proteinen einen engen sogenannten synaptonemalen Komplex, der sich über die Gesamtlänge der Chromosomen erstreckt und sie fest zusammenhält. In diesem Stadium kommt es zum gegenseitigen Austausch von Teilabschnitten des genetischen Materials zwischen den mütterlichen und väterlichen Chromosomen durch Einwandern des reziproken DNA-Stranges. Dieses sogenannte Crossing-over ermöglicht eine Vermischung des DNA-Materials beider Eltern. Auf diese Weise erfolgt eine Neuzusammensetzung (Rekombination) des mütterlichen und väterlichen Anteils des Genoms. Das ist neben der Reduktion zu haploiden Zellen die zweite wesentliche Funktion der Meiose. Sie führt dazu, dass Nachkommen mit einer eigenen Kombination von Eigenschaften entstehen können. Das Crossing-over gewährleistet auch, dass die homologen Chromosomen bis zur Anaphase I verbunden bleiben. Durch den Zerfall des synaptonemalen Komplexes treten die Chromosomen wieder auseinander, bleiben aber durch Chiasmata, mikroskopisch sichtbare Bereiche, in denen Crossing-over stattgefunden hat, miteinander verbunden. Wie in der Mitose wird der Spindelapparat ausgebildet und die Centrosomen wandern polwärts. In der **Metaphase I** ordnen sich die Bivalente in der Metaphaseplatte an, die Kinetochor-Mikrotubuli verbinden sich mit den Kinetochoren der Centromere der homologen Chromosomen. Jeweils eines der beiden Homologen ist mit den gegenüberliegenden Spindelpolen verankert. In der **Anaphase I** verkürzen sich wie in der Mitose die Kinetochormikrotubuli und ziehen die homologen Chromosomen auseinander; die Schwesterchromatiden bleiben über die Centromere weiterhin miteinander verbunden.

Telophase I und Cytokinese: Es bilden sich zwei Tochterzellen mit einem haploiden Chromosomensatz, aber mit jeweils zwei Schwesterchromatiden pro Chromosom. Artenspezifisch bildet sich eine Kernhülle und die DNA kann dekontensieren.

Die Meiose II

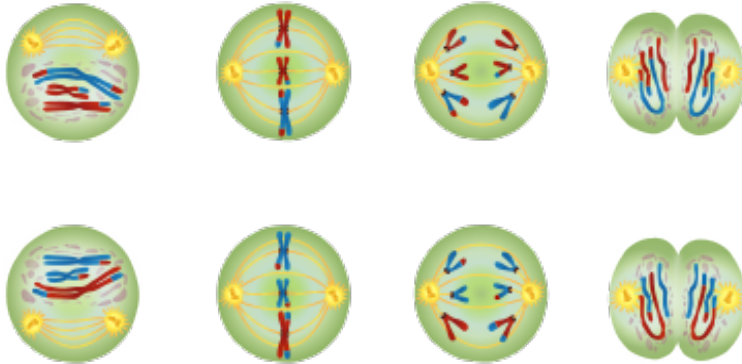


Abb. 2.7b: Die Meiose II

⑤ Prophase II ⑥ Metaphase II ⑦ Anaphase II ⑧ Telophase II & Cytokinese

Zwischen der Meiose I und der Meiose II erfolgt keine Verdoppelung der DNA. Die Abläufe in der Meiose II sind identisch mit denen der Mitose, mit dem Unterschied, dass das Ausgangsmaterial haploide Zellen mit verdoppelter DNA ist und das Produkt somit haploide Zellen mit nur einem Chromatid. Es entstehen beim Betrachten des gesamten Ablaufs in der Meiose I + II vier Tochterzellen, wobei im weiblichen Säugetierorganismus (wie der Mensch einer ist) sich nur eine der vier Zellen zu einer reifen Eizelle entwickelt, die anderen drei Meioseprodukte jedoch degenerieren.

Zwei Ebenen der Neuordnung erzeugen somit während der Meiose neue Chromosomenkombinationen und beeinflussen die genetische Ausstattung der Nachkommen.

- Unabhängige Segregation der mütterlichen und väterlichen homologen Chromosomen: Jedes einzelne Chromosom kann in der Anaphase I zu einer 50-prozentigen Wahrscheinlichkeit an eines der beiden Pole der teilenden Zelle gezogen werden. Durch diese unabhängige Verteilung von mütterlichen und väterlichen homologen Chromosomen können somit bei einem Organismus mit n Chromosomen $2n$ verschiedene haploide Keimzellen entstehen. Wenn z. B. $nnnn = 3$ ist, sind $8 (= 2^3)$ unterschiedliche Keimzellen möglich. Beim Menschen ($nnnn = 23$) sind es somit ungefähr 8,4 Millionen ($= 2^{23}$) Varianten!
- In der Prophase I lagern sich die homologen Chromosomen eng aneinander und es kommt zur Ausbildung eines Crossing-overs. Mithilfe einer Proteinmaschinerie (Rekombinationskomplex) werden Segmente homologer Nicht-Schwesterchromatiden ausgetauscht und dabei die Genvarianten auf den Chromosomen neu kombiniert (rekombinante Chromosomen).

Die Neuverteilung der Chromosomen in der Meiose liefert zusammen mit der Rekombination, die durch das Crossing-over entsteht, eine nahezu unbegrenzte Möglichkeit der genetischen Variation in den Keimzellen eines einzelnen Individuums.

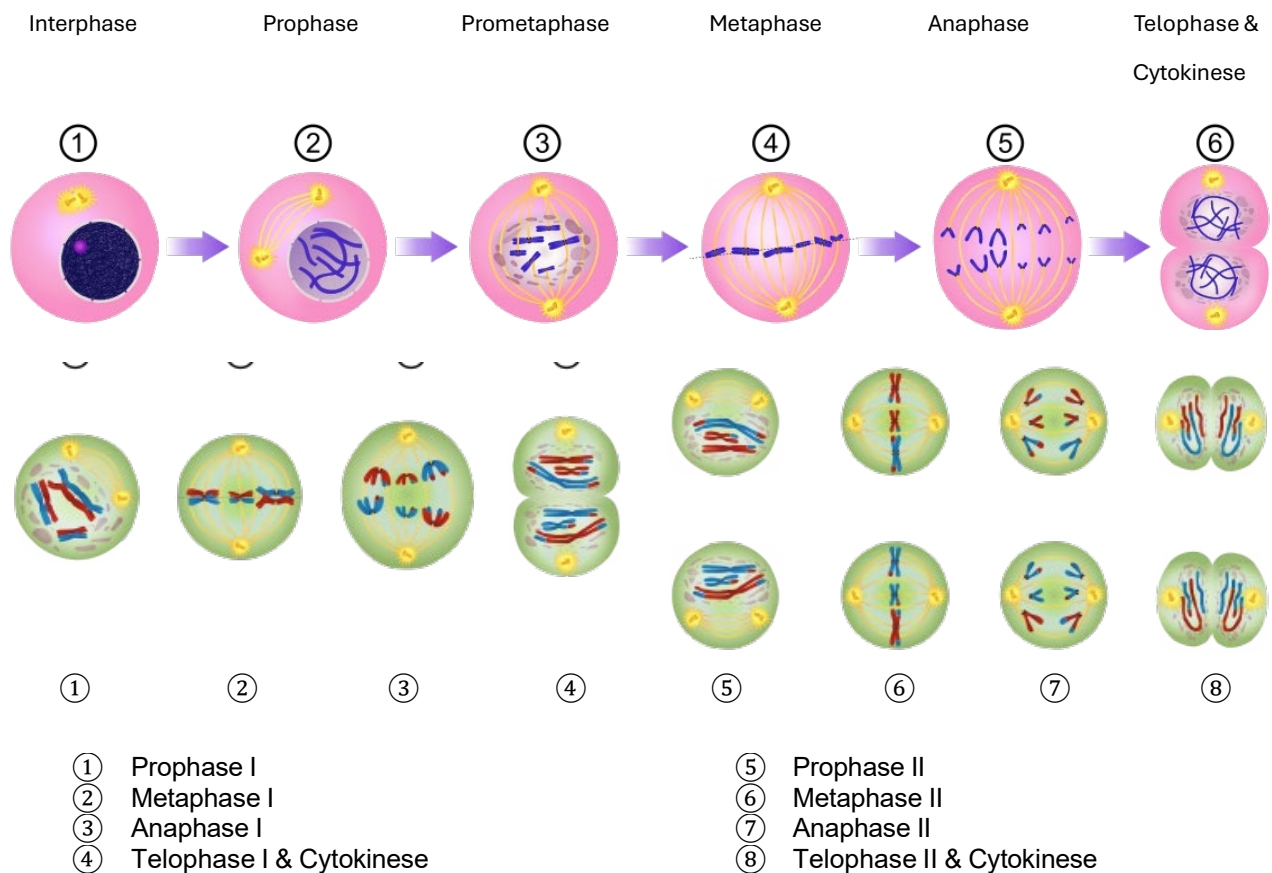


Abb. 2.8 und Tab. 2.2: Mitose und Meiose im Vergleich; bei beiden Vorgängen erfolgt zuerst eine Replikation der DNA.

Phase	Mitose	Meiose
Metaphase	jedes individuelle Chromosom ordnet sich in die Metaphaseplatte	Meiose I: die Bivalente ordnen sich in der Metaphaseplatte
Anaphase	Trennung der Schwesterchromatiden	Meiose I: Trennung der homologen Chromosomen
Tochterzellen	zwei ($2n = \text{diploid}$)	vier ($n = \text{haploid}$)
Funktion	Bildung eines vielzelligen Organismus aus einer diploiden Zygote	Bildung von Gameten

2.3.3 Mendelsche Genetik und Rekombination

Gregor Mendel (1822-1884) begründete die moderne Vererbungslehre. Er machte viele seiner berühmten Experimente mit Erbsen. Wie Menschen und die meisten Tiere sind Erbsen diploid; jedes Individuum hat also jeweils einen Chromosomensatz vom einen und einen vom anderen Elternteil vererbt bekommen. Erbsen können aber, wie viele Blütenpflanzen, selbstbefruchten (auch als Selbst bezeichnet). Das bedeutet, dass die beiden Elternteile, also auf der Pollenseite und der Eizellseite, dasselbe Individuum sind. Nach einigen Generationen Selbst geht fast die gesamte intraindividuelle allelische Variabilität verloren, sodass beinahe alle Loci im Genom homozygot, also genetisch einheitlich, sind. Um Erbsen gezielt zu kreuzen, werden die Blüten vor der Selbstbefruchtung geöffnet und Pollen übertragen. Genau das haben Gregor Mendel und seine Techniker getan. Es werden nun unterschiedliche Kreuzungsschemata beleuchtet.

Betrachtung eines Genorts (Locus)

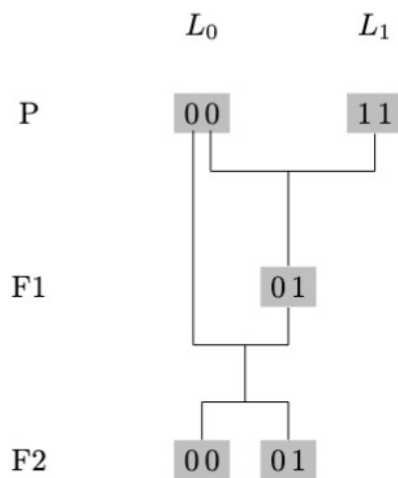


Abb. 2.9: Rückkreuzung (Copyright © 2023 Claus Vogl)

Die Abbildung 2.9 zeigt zwei homozygote Linien für einen Locus, die Nulllinie (L_0 mit ausschließlich Allelen des Typs Null) und die Einslinie (L_1 mit ausschließlich Allelen des Typs Eins). Es ist hierbei egal, welches Allel mit null und welches mit eins bezeichnet wird. In der Abbildung Rückkreuzung bilden diese beiden Linien den Ausgangspunkt in der Parentalgeneration (erste Zeile, mit „P“ bezeichnet). In der nächsten Zeile ist die erste Nachkommengeneration, die Filialgeneration (F1), dargestellt. Die Gameten innerhalb der homozygoten Ausgangslinien sind ident, sodass von der P-Generation immer entweder ein Nulltyp-Allel (von der Nulllinie) oder ein Einstyp-Allel (von der Eins-Linie) vererbt wird. Die F1 ist folglich genetisch einheitlich heterozygot. [Diese Tatsache entspricht der 1. Mendelschen Regel, die auch Uniformitätsregel genannt wird.] Der Phänotyp (also das Aussehen) der heterozygoten F1 kann dem der Nulllinie oder dem der Eins-Linie entsprechen. In diesem Fall sprechen wir davon, dass sich das Nullallel oder respektive das Einsallel dominant, das alternative Allel rezessiv ausprägt. Wenn die Kreuzungsprodukte anders als die beiden Elternteile ausschauen, zum Beispiel wie eine Mischung der beiden Eltern, wird die Allelausprägung als kodominant bezeichnet. Wird die F1-Generation wieder mit einer der beiden Elternlinien rückgekreuzt (im Fall der Abbildung Rückkreuzung mit der Nulllinie) erhält man eine F2-Generation. Von der Elternlinie wird immer das ihr eigene homozygote Allel vererbt (in unserem Fall das Nullallel der Nulllinie), von der F1-Generation wird in der Hälfte der Fälle (Mendelsche Vererbung ist fair) das Nullallel vererbt, in der anderen Hälfte der Fälle das Eins-Allel. [Praktisch gesehen ist ein Rückkreuzungsexperiment bei Erbsen aufwändiger als das anschließend vorgestellte "Intercross"- Experiment, weil die manuelle Übertragung von Pollen von der F1 zur Parentallinie oder umgekehrt notwendig ist. Nur die einfacheren "Intercross"- Experimente wurden wirklich von Mendel beschrieben.]

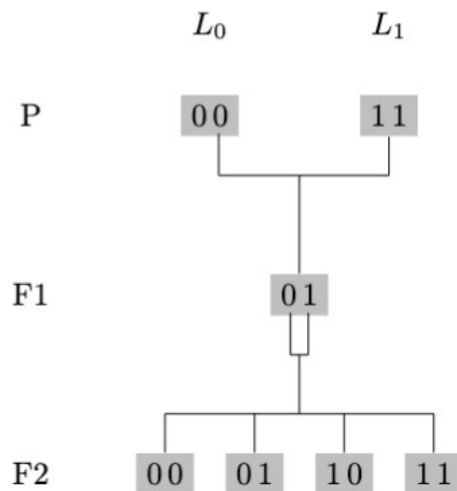


Abb. 2.10: Intercross (Copyright © 2023 Claus Vogl)

Anstatt die heterozygote F1-Generation zu einer Ausgangslinie rückzukreuzen, kann man auch Nachkommen der F1 untereinander kreuzen (siehe Abbildung 2.10 Intercross). Bei Erbsen braucht man dazu keine künstlichen Manipulationen durchführen, weil sie selbstens. Es kommt sowohl auf der Pollenseite als auch auf der Eizellseite zu Meiosen mit Segregation der Allele. Die beiden Meiosen produzieren, unabhängig voneinander, Gameten mit Null- und Einsallelen mit einer Wahrscheinlichkeit von jeweils $1/2$. Unabhängige Wahrscheinlichkeiten können durch Multiplizieren kombiniert werden, sodass insgesamt vier Möglichkeiten (geordnete Genotypen) entstehen können. Die Wahrscheinlichkeit für jeden Genotyp ist somit $1/2 \cdot 1/2 = 1/4$. Die beiden heterozygoten Genotypen (01) und (10) sind nicht unterscheidbar, sodass die Gesamtaufspaltung in der F2-Intercross 1:2:1 ist. Dies entspricht $1/4$ zu $1/2$ zu $1/4$, was Genotypen mit homozygoten Nullallelen (00), heterozygoten Allelen (01 oder 10) und homozygoten Eins-Allelen (11) entspricht (siehe auch Abb. 2.10). Die Phänotypen in der F2 entsprechen denen der Nulllinie, der F1-Generation beziehungsweise der Eins-Linie. Es ist also möglich die Verteilung der Phänotypen in der F2-Generation aus jenen der Ausgangslinien und der F1 vorherzusagen. In Mendel's Experimenten trat eine Aufspaltung in 1:3 (oder 3:1) auf, weil bei den von ihm untersuchten Merkmalen immer Dominanz auftrat. [Diese Aufspaltung entspricht der 2. Mendelschen Regel oder Aufspaltungsregel.]

	0	1	Proportion
0	$1/4$	$1/4$	$1/2$
1	$1/4$	$1/4$	$1/2$
Proportion	$1/2$	$1/2$	1

Tabelle 2.3: Vierfeldertafel F2

Man kann die Verhältnisse bei einem F2-Intercross (also der Kreuzung innerhalb der F1-Generation) auch durch eine Vierfeldertafel (Tabelle 2.3) darstellen. Die Zeilen differenzieren die Allele des ersten Elternteils, die Spalten jene des zweiten Elternteils. Es ist gleich, ob der Pollen-Elternteil oder der Eizell-Elternteil in den Zeilen oder Spalten angeordnet wird. Die letzte Spalte gibt die Wahrscheinlichkeiten der Allelproportionen des ersten Elternteils wieder ($1/2$ und $1/2$), die letzte Zeile jene des zweiten. Aufgrund ihrer Position am Rand der Tabelle werden diese **Randwahrscheinlichkeiten** oder **marginalen Wahrscheinlichkeiten** genannt. Da sich unabhängige Wahrscheinlichkeiten multiplizieren, können die vier gemeinsamen Wahrscheinlichkeiten durch Multiplikation der Randwahrscheinlichkeiten errechnet werden. Die Einträge auf der Nebendiagonale sind die beiden unterschiedlichen Möglichkeiten, einen heterozygoten Genotyp zu produzieren. Fasst man die heterozygoten Genotypen zusammen, resultiert eine Aufspaltung von 1:2:1. Auch phänotypisch sind die beiden heterozygoten Genotypen normalerweise nicht unterscheidbar, sodass bei kodominanter Allelwirkung eine Phänotypenverteilung von 1:2:1

resultiert, bei dominant rezessiver Allelwirkung eine Phänotypenverteilung von 3:1 beobachtet wird. Zahlreiche Merkmale bei Tieren folgen einem monogenen Erbgang und die von Gregor Mendel aufgestellten Schemata finden auch in der heutigen Tierzucht ihre Anwendung. Es handelt sich meist um dominant/rezessive Merkmalsausprägungen. Beispiele hierfür sind die Hornlosigkeit beim Rind (Allel ‚Hornlos‘ dominant gegenüber Allel ‚Behornt‘), die Tobianoscheckung beim Pferd (Allel ‚Gescheckt‘ ist dominant gegenüber Allel ‚Nicht gescheckt‘), die Haarlänge bei Katzen (Allel ‚Kurzhaar‘ dominant gegenüber das Allel ‚Langhaar‘). Weiters prägen sich für die meisten monogenen Erbkrankheiten die krankmachenden Allele rezessiv aus (Allel ‚Krank‘ ist rezessiv gegenüber dem Allel ‚Gesund‘).

Betrachtung zweier Loci auf unterschiedlichen Chromosomen (unabhängige, nicht gekoppelte Vererbung)

Betrachtet man zwei Loci und liegen diese auf unterschiedlichen Chromosomen, so werden ihre Allele unabhängig voneinander vererbt (siehe Abbildung 2.11.). [Dies entspricht der 3. Mendelschen Regel oder Unabhängigkeitsregel.]

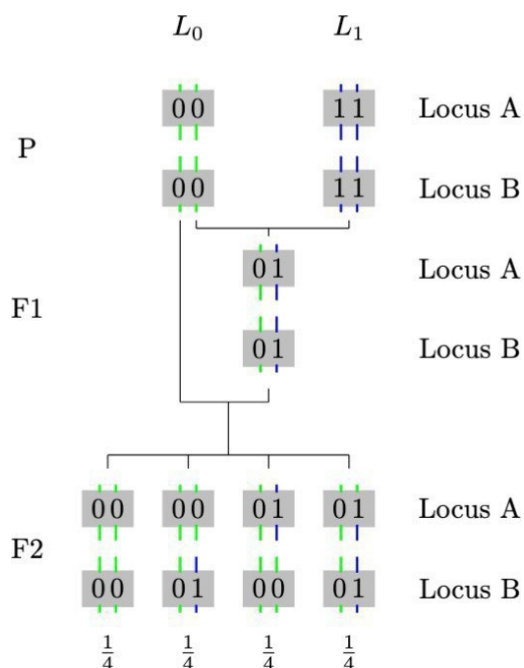


Abbildung 2.11: Unabhängige Vererbung (Copyright © 2023 Claus Vogl)

Es werden wieder die Null- und die Eins-Ausgangslinien unterschieden und es werden zwei Loci an unterschiedlichen Chromosomen betrachtet. In Abb. 2.11 stellen die vertikalen blauen Linien unterschiedliche Chromosomen dar, auf denen die zwei Loci A und B liegen. Die Nulllinie hat nur Nulltyp-Allele, die Einslinie entsprechende Einstyp-Allele. Die F1-Generation ist wieder genetisch uniform und heterozygot an allen Loci, deren Allele sich bei den Ausgangslinien unterscheiden. Die Vererbung der Allele der beiden Loci ist unabhängig, sodass sich die Wahrscheinlichkeiten in der F2 durch Multiplikation der Wahrscheinlichkeiten der Genotypen der Loci A und B ergeben. Es ist zu beachten, dass in diesem Beispiel von der Nullelternlinie an beiden Loci Nullallele vererbt werden. Eine Aufspaltung unterschiedlicher Allele gibt es nur bei den von der F1 produzierten Gameten.

Gekoppelte Vererbung und Rekombination

Liegen zwei Loci auf unterschiedlichen Chromosomen, so werden ihre Allele, wie oben beschrieben, unabhängig

voneinander vererbt. Liegen die zwei Loci jedoch auf demselben Chromosom, ist die Vererbungswahrscheinlichkeit der beiden Loci assoziiert (was bedeutet, dass die Allelvarianten, die am selben Chromosom liegen, gekoppelt vererbt werden). Eine weitere Größe, nämlich die Rekombinationswahrscheinlichkeit r , ist nötig, um die Vererbungswahrscheinlichkeiten der beiden Loci adäquat zu beschreiben.

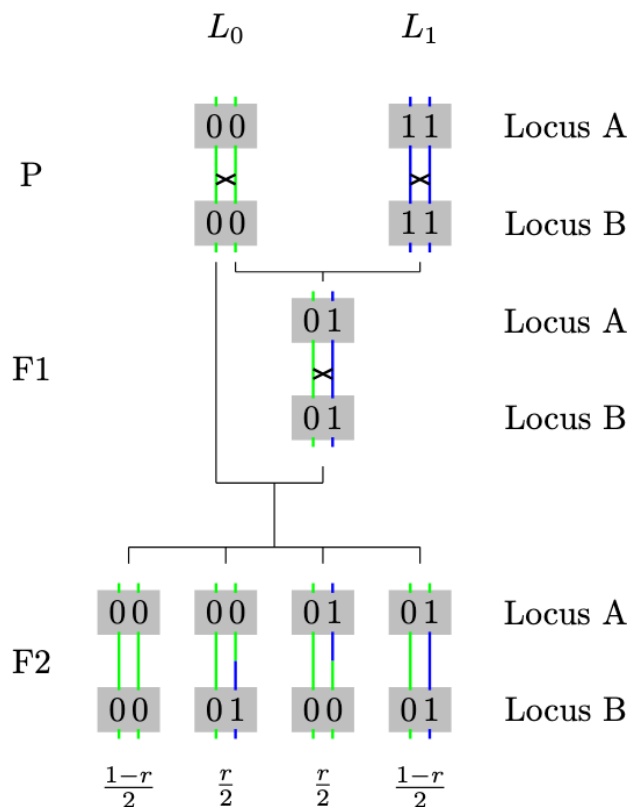


Abb. 2.12: Gekoppelte Vererbung und Rekombination (Copyright © 2023 Claus Vogl)

Es werden wieder die Null- und die Eins-Ausgangslinien unterschieden und es werden zwei Loci am selben Chromosom betrachtet. In Abb. 2.12 stellen die vertikalen blauen Linien die Chromosomen dar, auf denen die zwei Loci A und B liegen. Da die Loci am selben Chromosom liegen, spricht man von einer Allelkombination auf einem Chromosom (genannt **Haplotyp**). Die Nulllinie hat nur Haplotypen mit Nulltyp-Allelen, die Eins-Linie entsprechende mit Einstyp-Allelen. Die F1-Generation ist wieder genetisch uniform und heterozygot an allen Loci, deren Allele sich bei den Ausgangslinien unterscheiden. Jedoch kommt es während der Meiose bei der Bildung der Gameten zu Überkreuzungen zwischen den Chromosomenarmen (Crossing-over). Dies ist symbolisiert durch die Kreuze in Abb. 2.12. Dieser Übergang entsteht molekular durch einen Doppelstrangbruch der DNA und anschließendes Ligieren (siehe auch Kapitel Meiose). Die Rekombination hat in der Meiose der Parentalgeneration keine Auswirkungen auf die Haplotypen des Chromosoms, da beide Loci für dieselben Allele homozygot sind. In der Meiose der F1 kann aber durch Rekombination ein Chromosom produziert werden, das an einem Locus der eine elterliche Typ ist, am anderen jedoch der andere elterliche Typ weitergeführt wird.

In Fall der Rückkreuzung zu einer Elternlinie (hier wieder die Nulllinie) erhalten die Nachkommen immer die gleichen Allele der Elternlinie (im Beispiel Abb. 2.12 also die Nullallele der Loci A und B). In der F2 können aufgrund der Rekombination in der F1 vier Haplotypen entstehen: die Ausgangshaplotypen (wo es zu keiner oder einer geraden Anzahl an Überkreuzungen kommt, also 0, 2, 4, etc.) und zwei weitere, die durch Rekombination entstanden sind (wo es zu einer ungeraden Anzahl an Überkreuzungen kommt, also 1, 3, 5, etc.). In diesem Fall sind die entstandenen Genotypen der beiden Loci in der F2 nicht unabhängig, sondern assoziiert mit der Rekombinationsrate r , die der Proportion einer ungeraden Zahl von Überkreuzungen in diesem Intervall entspricht. Die Rekombinationsrate während der Meiose ist bei Menschen und Tieren sehr niedrig: Im Durchschnitt findet in etwa eine einzige Überkreuzung pro

Chromosom pro Meiose statt. Liegen zwei Loci nahe benachbart auf einem Chromosom, treten neu rekombinierte Haplotypen mit geringerer Frequenz auf (r ist niedriger), als wenn die Loci weit entfernt voneinander am Chromosom liegen.

Hilfreich für das Verständnis sind die Wikipedia Seiten:

https://de.wikipedia.org/wiki/Mendelsche_Regeln

<https://de.wikipedia.org/wiki/Meiose> <https://de.wikipedia.org/wiki/Genkopplung>

3 Stoffwechsel

3.1 KOHLENHYDRATE

Kohlenhydrate (Saccharide) sind energiereiche, organische Polyhydroxycarbonylverbindungen, die aus den chemischen Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) aufgebaut sind. Dazu zählen unter anderem die Verbindungen Traubenzucker und Rohrzucker, aber auch Cellulose und Stärke. Sie unterscheiden sich in ihren Molekülgrößen und daraus resultierenden Eigenschaften.

3.1.1 Bildung von Kohlenhydraten

Beim Vorgang der Photosynthese produziert die Pflanze aus energiearmen anorganischen Verbindungen mithilfe des Sonnenlichtes Kohlenhydrate für die Energiegewinnung. Die hergestellten Einfachzucker (Monosaccharide) dienen als Bausteine für alle weiteren Kohlenhydrate.

Photosynthese

Bei der Aufnahme von Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft und Wasser (H_2O) aus der Erde kann die Pflanze in ihren Blattgrünkörperchen (Chloroplasten) mithilfe von Chlorophyll und Sonnenlicht Glukose (Traubenzucker) bilden. Dieser Vorgang geschieht unter Abgabe von Sauerstoff (O_2), welcher vom Menschen ebenfalls zum Überleben benötigt wird. Nimmt der Mensch Kohlenhydrate auf, werden diese unter Sauerstoffaufnahme wieder zu Kohlenstoffdioxid und Wasser gespalten. Man nennt diesen Vorgang Atmung, es wird dabei Energie frei.

3.1.2 Einteilung der Kohlenhydrate

Je nach Anzahl der Zuckerbausteine und der damit steigenden Molekülgröße unterteilt man die Kohlenhydrate in vier Gruppen: Mono-, Di-, Oligo- und Polysaccharide. Die meisten Zuckerbausteine sind aus sechs Kohlenstoffatomen aufgebaut und werden deshalb als Hexosen bezeichnet. Davon abweichend sind Arabinose, Xylose oder Ribose, die nur ein C5-Skelett (5 Kohlenstoffatome) besitzen. Man bezeichnet diese Zucker daher als Pentosen.

Monosaccharide

Monosaccharide, auch Einfachzucker genannt, bestehen aus nur einem einzigen Zuckerbaustein. Die allgemeine Summenformel lautet: $\text{C}_n(\text{H}_2\text{O})_n$. Man bezeichnet sie mit einem Trivialnamen und der Endung „-ose“.

Glukose (Traubenzucker) ist ein süßer, gut wasserlöslicher Einfachzucker und bildet den Grundbaustein für viele Oligo- (z. B. Saccharose) und Polysaccharide (z. B. Cellulose). Man findet ihn vor allem in Obst, Gemüse, Honig und Süßigkeiten. Für den Menschen ist Glukose sowohl für die Energieversorgung als auch als Baustein von Glykogen besonders wichtig. So wird bei einem Überangebot von Glukose diese in Form des Polysaccharids Glykogen in Leber- und Muskelzellen gespeichert und bei Bedarf wieder daraus freigesetzt.

Fruktose, auch Fruchtzucker genannt, ist ebenfalls ein natürlich vorkommender, sehr süßer Einfachzucker und findet sich wie Glukose in Obst, Gemüse, Honig und Süßigkeiten. Fruktose ist als Baustein des Disaccharids Saccharose (Rohr- oder Rübenzucker) weit verbreitet.

Disaccharide

Die allgemeine Summenformel für Disaccharide, wie z. B. Saccharose, lautet: $\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$. Disaccharide bzw. Zweifachzucker bestehen aus zwei Monosacchariden, die über eine glykosidische Bindung miteinander verknüpft wurden. Bei der Bildung der Disaccharide erfolgt eine H_2O -Abspaltung. Bekannte Beispiele für Zweifachzucker sind Saccharose (Haushaltszucker), Maltose (Malzzucker) oder

Laktose (Milchzucker). Saccharose besteht aus Glukose und Fruktose, Maltose aus zwei Glukosebausteinen und Laktose aus einem Glukose- und einem Galaktosebaustein.

Oligosaccharide

Oligosaccharide sind Mehrfachzucker bestehend aus mehreren gleichen oder unterschiedlichen Monosacchariden, die über glykosidische Bedingungen verknüpft sind. Dabei sind 3 bis ca. 100 Monosaccharide verknüpft, wobei der Übergang von Oligosacchariden zu Polysacchariden fließend ist. Oligosaccharide können sowohl unverzweigt (linear) als auch verzweigt sein. Beispiele für Oligosaccharide sind Fruktane und Inulin, die aus einer verschiedenen Anzahl an Fruktoseeinheiten bestehen, sowie Maltodextrin, welches aus Glukoseeinheiten besteht.

Polysaccharide

Polysaccharide können aus 100 bis 1000 Einfachzuckern aufgebaut sein und stellen somit makromolekulare Naturstoffe dar, deren allgemeine Summenformel $(C_6H_{10}O_5)_n$ lautet.

Aufbau und Größe unterliegen naturgemäß einer großen Variabilität. Die wichtigsten in der Natur vorkommenden Polysaccharide sind Stärke (Pflanzen), Glykogen (Tier) und Zellulose (Pflanzen). Je nach Verknüpfung kann ein Mehrfachzucker von den menschlichen Enzymen verdaut und/oder der Darmmikrobiota fermentiert werden, d.h. in seine Einfachzucker gespalten werden: So kann der menschliche Organismus α -glykosidisch verknüpfte Polysaccharide, wie Stärke, durch geeignete Enzyme (α -Glukosidasen) abbauen und daher für die Energiegewinnung nützen. Stärke ist ein Speicherkohlenhydrat von Pflanzen und besteht aus α -glykosidisch verknüpften α -D-Glukoseeinheiten. Die beim Abbau von Stärke zunächst entstehenden größeren Bruchstücke nennt man Dextrine, die noch aus 20 bis 30 Glukosebausteinen aufgebaut sind. Sie lösen sich in Wasser und schmecken süßlich. Besonders Kartoffeln, Getreide und Hülsenfrüchte enthalten viel Stärke. Für die Verdaulichkeit von Stärke muss jedoch noch beachtet werden, dass die Stärkemoleküle aus zwei verschiedenen Glukoseketten bestehen, der Amylose (lineare Glukosekette) und dem Amylopektin (verzweigt-kettige Glukosemoleküle). Amylose ist für tierische Darmenzyme (α -Amylase) weniger verdaulich als Amylopektin. Deswegen wird die Stärke von roher Kartoffel schlechter vom tierischen Organismus verdaut als die von Getreide. Durch das Kochen der Kartoffel verändert sich die Molekülstruktur der Amylose und wird für die tierische Amylase besser angreifbar.

Glykogen bildet das Speicherkohlenhydrat bei Menschen und Tieren und befindet sich in der Leber und der Muskulatur. Glykogen besteht aus α -glykosidisch verknüpften D-Glukoseeinheiten, ist sehr stark verzweigt und kann deshalb, wenn nötig, viele Glukosemoleküle speichern. Bei kurzfristig erhöhtem Glukosebedarf wird Glykogen aus dem Muskel und der Leber freigesetzt und gespalten und dient damit der Energieversorgung.

Sind die Polysaccharide hingegen aus β -glykosidisch verknüpften Einfachzuckern (z. B. Zellulose) aufgebaut, können sie von tierischen Darmenzymen nicht verdaut und damit auch nicht verwertet werden. Zellulose ist der Gerüststoff pflanzlicher Zellwände. Sie besteht aus einer langgestreckten Polysaccharidkette, aufgebaut aus 8000 bis 12000 Glukosebausteinen. Es bilden sich zwischen den benachbarten Ketten Wasserstoffbrückenbindungen aus. Die Substanz ist faserig, nicht wasser-löslich und quillt kaum.

Um Zellulose spalten zu können, wird das Enzym Zellulase (eine β -Glukosidase) benötigt, welches Säugetiere nicht besitzen.

3.2 FETTE

Fette und Öle sind unterschiedliche Verbindungen, die aufgrund ihrer apolaren Struktur nicht in Wasser löslich sind. Sie lösen sich allerdings in vielen organischen Lösungsmitteln. Obwohl verschiedene Verbindungen zu den Fetten gehören, wird häufig einfach nur von „Fetten“ gesprochen. Fette bestehen aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Fettmoleküle kommen in vielen Zellen von Pflanzen, Tieren und Menschen vor und werden als Energiespeicher genutzt. Im tierischen Organismus kommen Fette als Triglyzeride, Phospholipide, Cholesterin und anderen vor, welche wichtige Funktionen im Organismus als Bausteine von Membranen und als Vorstufe von Hormonen haben.

Gebildet werden z. B. Triglyzeride immer aus zwei Bausteinen, dem Glycerin (Glycerol) und einer oder mehreren Fettsäuren. Die Fettsäuren können außerdem über entweder keine (gesättigt), eine (einfach ungesättigt) oder mehrere Doppelbindungen (mehrfach ungesättigt) verfügen. Einige ungesättigte Fettsäuren sind essenziell und müssen mit der Nahrung aufgenommen werden. Durch diesen Aufbau besitzen Fettsäuren einen hydrophilen „Kopf“ und einen lipophilen „Schwanz“.

Flüssige Fette (Öle) haben eine größere Anzahl an Doppelbindungen in den Fettsäuren (mehrfach ungesättigte Fettsäuren) und meist kürzere Fettsäureketten als **feste Fette**. Sie sind daher bei Zimmertemperatur flüssig. Feste Fette bestehen aus gesättigten und langkettigen Fettsäuren (z. B. Talg), weiche Fette aus kürzer kettigen Fettsäuren (z. B. Butter). Beim Erhitzen von Fetten, wie Frittieren oder Braten, kann es zu einer Isomerisierung von Doppelbindungen von ungesättigten Fettsäuren kommen, was zur Bildung von Transfettsäuren führt. Es entstehen dann die sogenannten Transfettsäuren, denen eine ungesunde Wirkung auf das kardiovaskuläre System zugesagt wird (Arteriosklerose, erhöhtes Herzinfarkt- und Schlaganfallrisiko). Ungesättigte Fettsäuren sind gegenüber Sauerstoff und Licht sehr empfindlich und oxidieren. Fette und Öle werden ranzig. Durch die Oxidation entstehen aber auch freie Radikale, die eine schädliche Wirkung auf den Organismus haben können.

Durch Natron- oder Kalilauge können die Fette gespalten werden („Verseifung“). Bei dieser Verseifung werden die Grundbausteine Glycerin und die Fettsäuren (in Form ihrer Salze) z. B. aus Triglyzeriden freigesetzt.

3.3 EIWEIßSTOFFE (PROTEINE)

Eiweiße, auch Proteine genannt, bestehen aus Aminosäuren. Diese bestehen aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und manchmal Schwefel (S) und Phosphor (P). Sie besitzen zwei funktionelle Gruppen, eine Amino- und eine Carboxygruppe. Sie bilden die Grundbausteine für Muskeln und Enzyme (körpereigene Katalysatoren). Proteine werden von Pflanzen und Mikroorganismen aus Kohlenstoff, Wasserstoff und Stickstoff gebildet. Die Pflanzen produzieren die Proteine aus den im Zuge der Photosynthese gebildeten Kohlenhydraten sowie wasserlöslichen Stickstoffverbindungen, die aus dem Boden aufgenommen werden. Die bedeutendsten Stickstoffverbindungen sind die Nitrate sowie die Ammoniumsalze. Sie gelangen im Idealfall über die natürlichen Düngemittel, wie verrottete Pflanzenteile (Kompost) oder Ausscheidungen von Tieren (Jauche, Stallmist), in den Boden und können dann von den Pflanzen aufgenommen werden. Im Boden befinden sich Mikroorganismen, welche die Stickstoffverbindungen abbauen und folglich elementaren Stickstoff an die Luft abgeben können.

Häufig werden allerdings künstliche Dünger aus Ammonium- und Nitratverbindungen verwendet.

Leguminosen (Hülsenfrüchte) leben in Symbiose mit Knöllchenbakterien (Bodenbakterien), die elementaren Stickstoff direkt aus der Luft zur Eiweißproduktion verwenden können.

3.3.1 Struktur von Proteinen

Die beim Menschen vorkommenden Eiweiße (Proteine) sind aus alpha-Aminosäuren (2-Aminocarbonsäure) aufgebaut. Neben den alpha-Aminosäuren werden aber auch beta- und gamma-Aminosäuren für die Signalübertragung bei der Reizleitung benötigt. Die DNA kodiert für insgesamt 20 verschiedene alpha-Aminosäuren, aus denen alle Proteine aufgebaut sind. Davon sind acht Aminosäuren essenziell, d.h. diese können nicht vom Organismus selber hergestellt werden und müssen deshalb mit der Nahrung aufgenommen werden.

Aufbau einer Aminosäure

Alle Aminosäuren besitzen dieselbe Grundstruktur und unterscheiden sich lediglich in ihrem Rest, welcher als Seitenkette bezeichnet wird. Die Proteine des menschlichen Organismus sind ausschließlich aus L-Aminosäuren aufgebaut. Die kleinste Aminosäure ist Glycin. Aminosäuren können durch eine Amidbindung miteinander verknüpft werden. Man spricht auch von einer Peptidbindung. Es können sich dadurch sehr lange Aminosäureketten (Peptidketten) ausbilden.

3.3.1 Einteilung der Proteine

Man kann Proteine entweder nach ihrer Funktion in sieben Hauptgruppen oder nach ihrer Struktur einteilen. Gemäß ihrer Struktur unterteilt man die Proteine in einfache und komplexe (zusammen-gesetzte) Proteine.

Einfache Proteine sind ausschließlich aus Aminosäuren aufgebaut. Sie werden aufgrund ihrer Tertiärstruktur in fibrilläre und globuläre Proteine unterteilt.

Fibrilläre Proteine sind lange faserige und wasserunlösliche Moleküle mit einer hohen Zugfestigkeit. Beispiele dafür sind die Muskelbestandteile Aktin und Myosin, die Hornsubstanz Keratin von Haut und Haaren, das Kollagen und Elastin des Bindegewebes und das Blutgerinnungsprotein Fibrinogen. Kollagen kommt als häufigstes Faserprotein im tierischen Organismus vor. Es ist Bestandteil von Sehnen, Knochen, Haut und anderen Festigungsgeweben. Für diese Funktion ist eine sehr hohe Reißfestigkeit und geringe Dehnbarkeit nötig.

Globuläre Proteine sind wasserlösliche, eng gefaltete, kugelförmige Proteine. Beispiele dafür sind Albumine, Globuline und das Klebereiweiß Gluten.

Komplexe bzw. zusammengesetzte Proteine enthalten neben dem Eiweiß- auch einen Nicht-eiweißanteil. Man bezeichnet diesen Anteil als prosthetische Gruppe. Ein Beispiel für ein komplexes Protein wären die Lipoproteine. Sie besitzen als prosthetische Gruppe Lipide. Weiter gibt es noch Metallproteine, Glyko- und Mucoproteine, Chromoproteine, Phosphorproteine und Nucleoproteine. Unter physiologischen Bedingungen bleibt die komplexe Struktur der Proteine stabil. Kommen sie allerdings in Berührung mit Säuren, Laugen, Schwermetallsalzen oder Lösungsmitteln oder werden auf über 42 °C erhitzt, werden die Strukturen irreversibel zerstört. Mit dem Verlust der räumlichen Struktur geht auch ein Verlust der biologischen Aktivität einher. Dieser Prozess wird als Denaturierung bezeichnet. Es kann zu Gerinnung, Ausflockung oder Koagulation kommen. Dieser Vorgang wird für die Herstellung von Milchprodukten und Käse angewendet.

3.4 DIE ERNÄHRUNG DER TIERE

Um alle Körperfunktionen wie zum Beispiel DNA-Replikation, Zell- und Organaktivität sowie Sinne und Fortbewegung zu gewährleisten, brauchen Tiere chemische Energie, die sie aus der Nahrung gewinnen müssen. Diese Nährstoffe (größtenteils Kohlenhydrate, Proteine und Lipide) werden verdaut und teilweise in ATP umgewandelt, das dann für Zellatmung und Energiespeicherung zur Verfügung steht. Der Rest liefert Rohstoffe für die Biosynthese, das sind organische Kohlenstoffverbindungen (z. B. Zucker) und organische Stickstoffverbindungen (in der Regel Aminosäuren). Diese Stoffe werden für den Aufbau organischer Moleküle gebraucht und sind somit notwendig für Wachstum, Instandhaltung und Fortpflanzung eines Lebewesens. Nährstoffe, die nach der Resorption nicht direkt vom Organismus zur Energiegewinnung oder für Aufbauprozesse verwendet werden, werden in Triglyzeride umgewandelt und im Fettgewebe gespeichert. Wichtige Substanzen, die vom Organismus nicht selbst hergestellt werden können, heißen essenzielle Nährstoffe.

3.4.1 Versorgung mit Nährstoffen

Von den 20 Aminosäuren, die Tiere benötigen, sind acht (für die meisten) essenziell, müssen also mit der Nahrung aufgenommen werden. Für Carnivoren wie die Katze ist auch Arginin und die β -Aminosäure Taurin essenziell. Während Proteine in tierischen Produkten wie Fleisch und Milch vollständig sind, das heißt die essenziellen Aminosäuren in richtigen Mengenverhältnissen liefern, sind pflanzliche Proteine meist unvollständig; Bohnen enthalten z. B. nicht genug Methionin. Deshalb muss vor allem bei einer rein veganen Lebensweise auf eine ausgewogene Ernährung, die mit allen essenziellen Aminosäuren ausreichend versorgt, geachtet werden. Fettsäuren können Tiere hingegen größtenteils selbst synthetisieren. Es sind nur wenige mehrfach ungesättigte Fettsäuren essenziell. So müssen α -Linolsäure und Linolensäure aufgenommen werden. Der Bedarf an diesen wird jedoch durch Samen und Getreide sowie Fettfischarten wie Lachs und Sardine abgedeckt. Vitamine sind lebenswichtige organische

Moleküle, die Tiere nicht selbst produzieren können, und die daher in der Nahrung enthalten sein (gegebenenfalls als Vorstufe) oder von Darmbakterien synthetisiert werden müssen. Es gibt wasserlösliche und fettlösliche Vitamine. Mineralstoffe sind hingegen anorganische Nährstoffe wie z. B. Eisen oder Kupfer die in kleinen Mengen durch die Nahrung aufgenommen werden müssen.

3.4.2 Hauptstadien der Nährstoffverarbeitungen

Nahrungsverarbeitung lässt sich unterteilen in Nahrungsaufnahme, Verdauung, Resorption und Ausscheidung. Die Aufnahme, also das Fressen, kann in flüssiger oder fester Form geschehen, wobei man zwischen vier Mechanismen unterscheidet: Filtrierer filtern Nahrungsteilchen aus dem Wasser, Substratesser leben vom Gewebe eines Lebewesens in oder auf dem sie leben, Sauger ernähren sich von den Flüssigkeiten eines Wirtes und Schlinger und Zerkleinerer leben von großen, festen Nahrungsanteilen. Bei der Verdauung wird die Nahrung abgebaut, damit der Körper sie resorbieren kann. Enzyme bewirken bei der chemischen Verdauung das Aufspalten großer Moleküle durch Addition von Wasser (Hydrolyse). So werden Di- und Polysaccharide in Monosaccharide, Proteine in Aminosäuren, Nukleinsäuren in Nukleotide und Fette und Phospholipide in Fettsäuren und andere Bestandteile zerlegt. Verdauung geschieht in spezialisierten Hohlräumen oder Kompartimenten, um die eigenen Zellen nicht mitzuverdauen. Nach der Verdauung werden die kleinen Moleküle wie Aminosäuren und Monosaccharide von den tierischen Zellen resorbiert (aufgenommen). Danach wird unverdautes Material aus dem Verdauungstrakt ausgeschieden.

3.5 VERDAUUNG UND ABSORPTION

In diesem Abschnitt wird beschrieben, wie unser Organismus in seinem Verdauungstrakt die mit der Nahrung angebotenen Nährstoffe so verarbeitet, dass sie aufgenommen und im Körper verwendet werden können. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den Makromolekülen Kohlenhydrate, Lipide und Proteine. Sie stellen uns vor besondere Herausforderungen durch ihre Größe und ihre unterschiedliche Wasser- und Fettlöslichkeit. Ihre Zerlegung in aufnahmefähige Bruchstücke wird als Verdauung bezeichnet, die anschließende Aufnahme in den Organismus als Absorption.

Die Verdauung wird von mechanischen und biochemischen Prozessen bewirkt. Unter mechanischen Prozessen versteht man die Aktivität der Muskulatur der verschiedenen Abschnitte des Verdauungstrakts. Diese führt einerseits zur Zerkleinerung und Vermischung der Nahrung mit Verdauungssäften (Mischbewegung), andererseits wird der Transport des Speisebreis durch den Verdauungstrakt ermöglicht (Peristaltik oder antreibende Bewegung). Bei den biochemischen Prozessen werden die Makromoleküle in der Nahrung durch Enzyme in absorptionsfähige kleinere Bausteine aufgespalten.

3.5.1 Intra- und extrazelluläre Verdauung

Die einfachsten Kompartimente für intrazelluläre Verdauung sind Nahrungsvakuolen (spezialisierte Zellorganellen). Hier wird die Nahrung durch Enzyme hydrolysiert, nachdem sie entweder durch Phagozytose (feste Nahrung) oder Pinozytose (Flüssignahrung) in die Zelle aufgenommen wurde. Bei dieser Aufnahme bilden sich die Nahrungsvakuolen, welche später mit Lysosomen verschmelzen. Lysosomen sind Zellorganellen, die die hydrolytischen Enzyme enthalten, welche zur chemischen Verdauung gebraucht werden. Die meisten Tiere betreiben Hydrolyse während der extrazellulären Verdauung. Diese erlaubt das Verdauen einer viel größeren Menge an Nahrung als die Phagozytose und verlangt nach einem Verdauungstrakt (einem Stück eingestülpter Außenwelt). Dieser ist meist ein vollständiger Verdauungstrakt oder Verdauungskanal, das heißt er besitzt zwei Öffnungen: Mund und Anus. Da die Nahrung hier nur in eine Richtung wandert, kann bereits neue Nahrung aufgenommen werden, während die alte noch verdaut wird. Er kann außerdem in spezialisierte Abschnitte gegliedert sein (wie zum Beispiel Speiseröhre, Magen, Dünndarm, Dickdarm und Anus).

3.5.2 Aufbau des Verdauungstraktes von höheren Tieren

3.5.2.1 Organe zur Nahrungsverarbeitung bei Säugetieren

Säugetiere besitzen einen Verdauungskanal und Hilfsdrüsen, welche Verdauungssäfte beisteuern. Die Nahrung wird durch Peristaltik im Verdauungstrakt vorwärtsbewegt: Die glatte Muskulatur in der Wand des Kanals kontrahiert und entspannt sich abwechselnd. Als Abgrenzung zwischen einigen Kompartimenten dienen Schließmuskeln (Sphinkter) aus ringförmiger Muskulatur.

Mundhöhle

Die Verdauung beginnt bereits in der Mundhöhle, wo auch die Nahrungsaufnahme geschieht. Die Nahrung wird hier, für leichteres Schlucken und zur Oberflächenvergrößerung, von den Zähnen zerschnitten, zerquetscht und zermahlt. Der Speichel startet die chemische Verdauung und schützt die Mundhöhle. Das darin enthaltene Enzym Amylase spaltet Stärke und Glykogen durch Hydrolyse in kleinere Poly- und Disaccharide. Weitere Bestandteile sind beispielsweise Muzine (Schleim zum Schutz) und Antikörper (hemmen Bakterien).

Die Zunge ist mitverantwortlich für das Testen (durch Schmecken) und den Weitertransport (Schlucken) der Nahrung. Nach der Mundhöhle gelangt diese in den Pharynx (Schlund), wonach sich der Transportweg spaltet in Speiseröhre und Atemwege. Eine komplexe Zusammenarbeit verschiedener Strukturen ist notwendig, um richtiges Schlucken zu ermöglichen.

Magen

Im Magen wird Nahrung gespeichert und weiterverdaut, wobei auch hier schon einige Nährstoffe ins Blut abgegeben werden. Im Magen wird Magensaft durch Knetbewegungen mit der Nahrung vermischt (Abb. 3.1). Der Magensaft beinhaltet unter anderem Salzsäure (HCl), welche die extrazelluläre Matrix zerstört, die die organischen Zellen zusammenhält, und dafür sorgt, dass das Mageninnere einen pH-Wert von etwa 2 hat. Das saure Milieu sorgt für eine Denaturierung der Nahrungsproteine und eine Abtötung von Bakterien. Das Enzym Pepsin zerlegt Proteine durch Spalten der Peptidbindungen in kleinere Polypeptide, die später im Dünndarm weiter verdaut werden. Die Lipase aus dem Speichel wird durch den sauren pH-Wert aktiviert und kann so Fette spalten.

In der Magenschleimhaut finden sich Drüsen (Abb. 3.2), deren Zellen inaktive Vorstufen der Bestandteile der Magensäure produzieren. Aktiviert werden diese erst im Lumen (Innenraum) des Magens, sodass die Zellen der Magenwand nicht geschädigt werden. Pepsinogen wird in ein aktives Pepsin verwandelt. Pepsin kann auch selbst Pepsinogen spalten, sodass durch positive Rückkopplung immer mehr aktives Pepsin entsteht. Nebenzellen schließlich produzieren Teile des Schleims, der die Magenwand vor dem Magensaft schützt, und der aus Glykoproteinen, Zellen, Salzen und Wasser besteht. Zusätzlich bildet sich zum Schutz alle drei Tage eine neue Epithelzellschicht an der Magenwand.

Der Pförtner (Pylorus) ist der Schließmuskel am Übergang zwischen Magen und Dünndarm. Er erlaubt jeweils nur einer geringen Menge des Speisebreis den Durchtritt, und zwar etwa zwei bis sechs Stunden nach einer Mahlzeit.

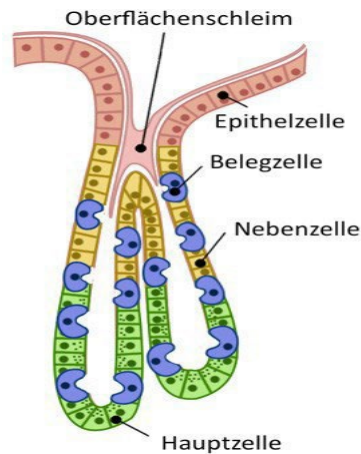
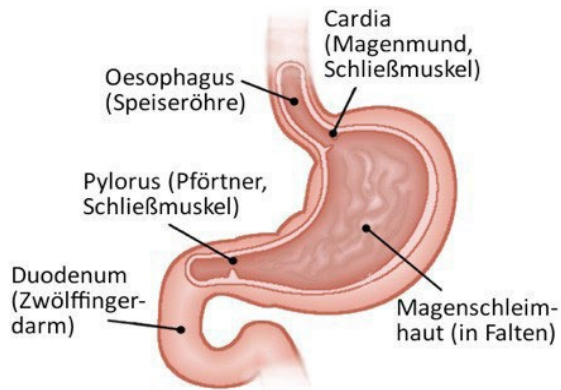


Abb. 3.1: Vereinfachte Skizze eines menschlichen Magens Abb. 3.2: Schematische Zeichnung einer Magendrüse

Dünndarm

Im Dünndarm findet der Großteil der enzymatischen Hydrolyse der Makromoleküle statt. Der Zwölffingerdarm (Duodenum) ist davon der erste kurze Teil. Hier werden Verdauungssäfte aus Pankreas (Bauchspeicheldrüse), Gallenblase und Leber sowie der Dünndarmwand mit dem Speisebrei vermischt. Das Pankreassekret ist leicht alkalisch, enthält Enzyme und Enzymvorstufen sowie Bicarbonat, welches als Puffer dient und den Speisebrei neutralisiert. Die inaktiven Enzymvorstufen werden von der Bauchspeicheldrüse abgegeben und im Duodenum als Proteasen aktiviert. Fette und andere Lipide werden vorwiegend im Dünndarm verdaut mithilfe der Galle, die in der Leber gebildet und in der Gallenblase gespeichert und angereichert wird. Sie enthält Gallensalze, die als Detergenzien (Emulgatoren) bei der Verdauung und Resorption von Lipiden mitwirken. Auch das Epithel des Duodenums produziert einige Verdauungsenzyme.

Für die effiziente Resorption von Nährstoffen wird eine große Oberfläche benötigt. Der Großteil der Resorption von Nährstoffen geschieht im Dünndarm, wobei sie die Dünndarmwand passieren. Tiefe Falten, die darauf sitzenden Darmzotten (Villi, siehe Abb. 3.3) und die auf deren Epithelzellen sitzenden Mikrovilli (mikroskopisch kleine Ausstülpungen) sorgen für eine Oberflächenvergrößerung der Dünndarmwand. Durchschnittlich misst diese so etwa 30 m^2 . Nährstoffe verlassen das Lumen durch die Epithelzellen. Der Zucker Fruktose etwa gelangt durch erleichterte Diffusion, also Diffusion entlang seines Konzentrationsgefälles, in die Epithelzellen. Er verlässt sie durch ihre Basalmembran und wird von Kapillaren (dünne Blutgefäße) in den Darmzotten resorbiert.

Andere Stoffe wie Glukose oder Aminosäuren müssen mittels aktivem Transport gegen das Konzentrationsgefälle aufgenommen werden, womit diese Nährstoffe stärker aufgenommen werden können als durch passive Diffusion.

Viele Nährstoffe gelangen danach ins Blut, Fettsäuren und Monoglyceride (Glycerinmoleküle mit einer Fettsäure) werden jedoch in ein Lymphgefäß im Villus transportiert und durch das lymphatische System zu den großen Venen befördert. Das nährstoffreiche Blut in den Kapillaren wird hingegen zur Leberpfortader transportiert. Diese führt zur Leber, welche die Nährstoffzusammensetzung des Blutes verändern und giftige Substanzen abbauen kann, bevor das Blut zum Herzen gelangt.

Dickdarm

Der Dünndarm geht über in den Dickdarm, der aus Kolon (Grimmdarm, ca. 1,5 m lang), Zäkum (Blinddarm) und Rectum (Enddarm) besteht. Der Blinddarm bildet eine Tasche unter dem Übergang von Dünn- zu Dickdarm. Er ist bei Tieren, die viel pflanzliches Material verzehren, wichtig für die Vergärung derselben und ist beim Menschen relativ klein.

Eine wichtige Aufgabe des Dickdarms ist die Resorption von Wasser, welches in großen Mengen (etwa sieben Liter täglich) mit den Verdauungssäften in den Verdauungskanal abgegeben wird. Dünn- und Dickdarm nehmen gemeinsam etwa 90% davon wieder auf.

Im Dickdarm geschieht dies durch Osmose, indem aktiv Na^+ und andere Ionen aus dem Darmlumen aufgenommen werden und somit ein Konzentrationsgefälle für Wasser entsteht. So werden die Fäzes (Exkremente) immer fester, je weiter sie durch die Peristaltik durch den Darm geschoben werden, bis sie schließlich im Enddarm landen, wo sie bis zur Ausscheidung gespeichert werden. Der Nahrungsbrei braucht für den gesamten Weg durch den Verdauungstrakt etwa 12-24 Stunden.

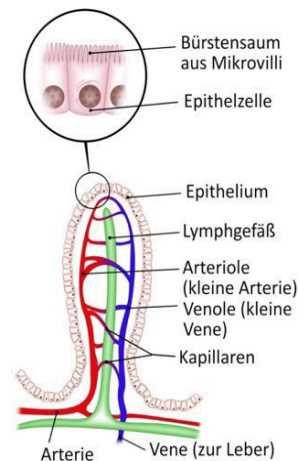


Abb. 3.3:
Vereinfachte
Darstellung eines
Villus (Darmzotte)
mit Detailansicht
einer Epithelzelle.

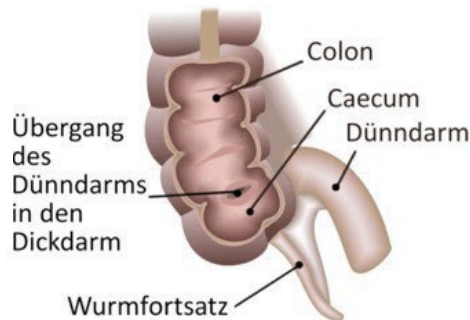


Abb. 3.4: Schematische Zeichnung des
Übergangs von Dün- zu Dickdarm mit teilweise
aufgeschnittenem Dickdarmsegment.

3.5.2.2 Organe zur Nahrungsverarbeitung im Speziellen bei Menschen

Mund, Mundhöhle, Rachen und Speiseröhre

Die flüssige und feste Nahrung wird über den Mund aufgenommen und große Partikel in der Mundhöhle mechanisch durch die Kaubewegung zerkleinert. Hierbei wird Speichel zugesetzt, um einen Speisebrei zu erhalten und die Verdauung durch enthaltene Enzyme zu starten. Der Speichel wird von den Speicheldrüsen produziert und weist einen neutralen pH-Wert von 6 bis 7 auf. Er enthält hauptsächlich α -Amylase, welche für die Spaltung von Stärke notwendig ist. Im Bereich des Rachens treffen sich die Wege von Nahrungsaufnahme und Atmung. Es wird hier der Schluckreflex ausgelöst, wodurch der Speisebrei über die Speiseröhre letztlich direkt in den Magen transportiert wird.

Magen

Im Magen wird der Magensaft gebildet, eine klare und farblose Flüssigkeit mit einem pH-Wert von 0,9 bis 1,6. Für dieses saure Milieu ist Salzsäure verantwortlich, die von den Belegzellen produziert wird (Abb.3.2). Dadurch wird Pepsinogen zum Enzym Pepsin aktiviert, dass bei der Verdauung von Proteinen eine wesentliche Rolle spielt. Ebenfalls von den Belegzellen wird der 'intrinsic factor' gebildet, ein Glykoprotein, das für die Bindung und Absorption von Vitamin B_{12} notwendig ist. Um die Magenschleimhaut vor dem sauren Milieu und der Selbstverdauung durch Pepsin zu schützen, produzieren Nebenzellen Muzin, welches die Magenwand auskleidet.

Leber

Die Aufgaben der Leber im Hinblick auf die Verdauung liegen in der Bereitstellung verschiedener Flüssigkeiten, die im Verdauungsprozess benötigt werden, sowie der Prozessierung der aufgenommenen Nährstoffe. Sie sondert Gallenflüssigkeit ab, welche zuerst in die Gallenblase transportiert und bei Bedarf in den Dünndarm abgegeben wird. Sie setzt sich v.a. aus den Salzen der Gallensäuren, Cholesterin und Lecithin zusammen. Dadurch trägt die Gallenflüssigkeit einerseits zur Neutralisierung des Speisebreis bei, andererseits wird auch eine Emulgierung von Nahrungsfetten und die Bildung von Mizellen möglich.

Bauchspeicheldrüse (Pankreas)

Der endokrine Pankreas ist für die Synthese von Insulin und Glukagon verantwortlich, die für die Steuerung des Blutzuckerspiegels entscheidend sind. Gleichzeitig wird von den exokrinen Zellen der

Bauchspeicheldrüse der Pankreassaft in den Dünndarm abgesondert. Er enthält große Mengen an Bikarbonat zur Neutralisierung des sauren Speisebreis aus dem Magen. Zusätzlich enthält das exokrine Sekret zahlreiche Enzyme, welche an der Verdauung einzelner Nahrungsinhaltsstoffe beteiligt sind, z. B. Glukosidasen (Stärke), Proteasen (Proteine) und Lipasen (Fett).

Dünndarm

Der Dünndarm weist drei Abschnitte auf: Zwölffingerdarm, Leerdarm und Krummdarm. Im Dünndarm findet die Resorption der Nahrungsbestandteile statt. Dies betrifft neben den durch Verdauung vorbereiteten Makronährstoffen auch Wasser, Elektrolyte und Vitamine.

Die Schleimhaut des Dünndarms (Mukosa) verfügt zu diesem Zweck über eine stark vergrößerte Oberfläche. Man unterscheidet Einstülpungen (Krypten) und Ausstülpungen (Villi oder Zotten).

Die Zotten besitzen gleichermaßen weitere Ausstülpungen (Mikrovilli), welche den sogenannten Bürstensaum bilden und somit die Oberfläche um ein Vielfaches vergrößern (die entstehende Oberfläche des Dünndarms entspricht in etwa der eines Tennisplatzes).

Die Zellen der Bürstensaummembran stellen an ihrer Oberfläche zahlreiche Enzyme zur Verfügung, die größere Nährstoffmoleküle kurz vor der Absorption in aufnahmefähige Einheiten zerlegen.

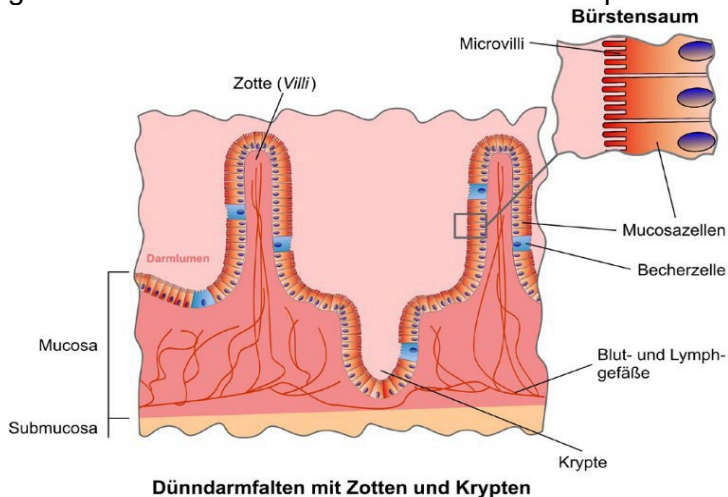


Abb. 3.5: Aufbau der Darmschleimhaut

Dickdarm

Wesentliche Aufgabe des Dickdarms ist die Rückresorption von Wasser und Elektrolyten, wobei der Darminhalt immer mehr eingedickt wird, bis sich Kot (Fäzes) bildet. Abschließend wird der Darminhalt durch den After entleert.

Eine besondere Bedeutung erhält der Dickdarm dadurch, dass er dicht mit Bakterien besiedelt ist.

3.5.3 Evolutionäre Anpassungen an Ernährungsformen

Die Verdauungssysteme der Wirbeltiere folgen einem Grundbauplan, der jedoch in verschiedenen Spezies adaptiv verändert ist. Ein Beispiel ist die Anpassung des Gebisses (siehe Abb. 3.6), welche ein wichtiger Grund für den Erfolg der Säugetiere in der Evolution war.

Auch der Magen ist an die verschiedenen Ernährungsgewohnheiten angepasst. So besitzen fleischfressende Wirbeltiere tendenziell einen sehr dehnbaren Magen, da sie oft lange Zeit ohne Nahrung verbringen, und wenn Nahrung vorhanden ist, meist sehr große Mengen verzehren. Ein afrikanischer Löwe kann etwa 40 kg auf einmal fressen. Pflanzenfresser besitzen, abgesehen von einem langen Zäkum und/oder Kolon, meist einen um einiges längeren Darm als Fleischfresser, da pflanzliches Material dank der pflanzlichen Zellwände schwerer verdaulich ist als Fleisch. Daher wird mehr Oberfläche und Zeit benötigt, um die Nährstoffe aus der Nahrung zu resorbieren. Die Symbiose, also eine Wechselwirkung zwischen zwei Spezies, die jeder der beiden einen Vorteil bringt, spielt eine wichtige Rolle bei vielen Verdauungsmechanismen.

Vermutlich wird bei allen Vertebrata und Invertebra der Verdauungstrakt von symbiotischen

Mikroorganismen wie Protozoa, Fungi und vor allem Bakterien bevölkert. Diese verrichten Fermentationsprozesse in den Gärkammern (z. B. der Pansen von Wiederkäuern und Dickdarm) der Verdauungssysteme und können auch lebenswichtige Nährstoffe wie Vitamine und Aminosäuren liefern. Für Pflanzenfresser sind sie besonders wichtig, da Tiere keine Enzyme zur Zellulose-Hydrolyse herstellen können: Diese Aufgabe übernehmen Pilze und Bakterien, die den pflanzlichen Zellbaustoff in einfache Zucker und andere resorbierbare Stoffe abbauen können. Wiederkäuer (eine Gruppe von Säugetieren) sind besonders aufwändig an ihre pflanzliche Ernährung angepasst durch den Besitz mehrerer spezialisierter Mägen (Pansen-, Netz-, Blätter- und Labmagen), die von Mikroorganismen besiedelt sind. Das Wiederkäuen – mehrmaliges Hochwürgen und wiederholtes Kauen – in Verbindung mit diesen Vormägen ermöglicht die effiziente Verdauung der zellulosereichen Nahrung. Das Verdauungssystem eines Säugetieres kann bis zu ca. 10^{11} mikrobische Zellen pro Milliliter enthalten, weshalb es zu den am dichtesten besiedelten Ökosystemen für Mikroorganismen zählt.

3.5.4 Energiehaushalt

Tiere produzieren beinahe ihr ganzes ATP durch Oxidation von Fetten, Kohlenhydraten und Proteinen während der Zellatmung. Bevorzugt verwenden sie dafür Kohlenhydrate und Fette; Proteine

werden nur verbrannt, wenn die anderen Stoffe schon beinahe verbraucht sind. Am meisten Energie liefern Fette: Ein Gramm Fett gibt durch Oxidation fast doppelt so viel Energie frei wie ein Gramm Kohlenhydrat oder Protein. Im Überfluss aufgenommene energiereiche Stoffe werden in Speichersubstanz umgewandelt wie etwa bei Tieren in Form von Glykogen (Polymere aus Glukoseeinheiten) und Fett. Im menschlichen Körper geschieht die Speicherung von Glykogen vorwiegend in den Leber- und Muskelzellen und jene von Fett in Fettzellen. In Zeiten, in denen der Kalorienverbrauch die Kalorienaufnahme übersteigt (Nahrungsmangel, Anstrengung etc.), wird Speichermaterial zur Energienutzung abgebaut. Die Hormone Insulin und Glukagon sind verantwortlich für Glykogensynthese und -abbau und somit für die Glykogenhomöostase. Sind die Glykogenspeicher bereits voll, beginnt der Körper in der Regel, überschüssig aufgenommene Kalorien in den Fettzellen als Fett zu speichern. Die meisten Menschen besitzen genügend Körperfett, um wochenlang ohne Nahrung überleben zu können. Jedoch wird bei Energiebedarf zuerst die Glykogenreserve in der Leber geleert.

3.5.4.1 Kohlenhydratstoffwechsel

Während und kurz nach einer Mahlzeit gelangt die Glukose ins Blut und kann von den Organen direkt als Energiequelle genutzt werden. In den „Kraftwerken“ der Zellen, den Mitochondrien, wird die Glukose zu Kohlenstoffdioxid und Wasser abgebaut und die dabei freiwerdende Energie nutzbar gemacht. Glukose ist die vorrangige Energiequelle von Nervenzellen und Gehirn. Vor allem rote Blutkörperchen sind abhängig von Glukose, andere Gewebe können auch aus Fettgewebe Energie gewinnen. Nicht benötigte Glukose wird in dieser Phase in Glykogen umgewandelt in Muskeln oder nach Umwandlung in der Leber gespeichert. Bei Energiebedarf kann der tierische Organismus auf diese Reserven zurückgreifen. Aus dem Glykogen wird wieder Glukose freigesetzt und steht als Energiequelle zur Verfügung. Glykogen aus der Leber kann von allen Zellen genutzt werden, das Muskel-Glykogen steht vorrangig den Muskelzellen zur Verfügung. Die Speicher sind aber spätestens 18 Stunden nach der letzten Mahlzeit aufgebraucht. Das bedeutet, dass Leber und Muskeln nur eine bestimmte Menge an Glukose in Form von Glykogen speichern können. Überschüssige Glukose wird in der Leber zu Fett umgewandelt und längerfristig im Fettgewebe eingelagert. Deshalb kann es bei übermäßiger Kohlenhydrataufnahme (Stärke und Zucker) schnell zu Übergewicht kommen. Wenn die Glykogenspeicher aufgebraucht sind, mobilisiert der Organismus seine Fettreserven, vor allem Triglyzeride. Neben der β -Oxidation von Fettsäuren und der Umwandlung von Glycerin in Glukose, werden auch Ketonkörper gebildet. Diese können von den meisten Geweben und Organen (Ausnahme: rote Blutkörperchen) für die Energiegewinnung herangezogen werden. In Form von sogenannten Glykoproteinen werden Kohlenhydrate auch für den Aufbau von Knochen, Knorpel, Mukus und anderen Körpersubstanzen benötigt.

3.5.4.2 Abbau von Depotfett

Wird Energie benötigt, kann der Körper die Triglyzeride im Depotfett zu Glycerin und Fettsäuren spalten. Die Leber baut weiter das Glycerin zu Glukose um und versorgt so Muskeln, Herz und Nieren mit Energie. Die Fettsäuren binden an Albumine (Blutplasmaeiproteine) und gelangen so zu den Zellen. Das bedeutet, dass Depotfett für den Körper durchaus lebensnotwendig ist. Neben der Energieversorgung dient es außerdem dem Schutz innerer Organe vor Stößen und Druck sowie als Wärmeschutz. Außerdem besteht jede Membran des Organismus aus einer Lipiddoppelmembran. Wird allerdings zu viel Depotfett gebildet, bedeutet das eine Zusatzbelastung für Herz und Kreislauf und damit eine Gesundheitsbelastung. Obwohl der Anteil an Depotfett gleichzeitig mit zunehmendem Körpergewicht ansteigt, bleibt der Anteil an Zelfett, welches für den Aufbau von Zellmembranen etc. benötigt wird, gleich. Der durchschnittliche Anteil an Depotfett macht bei Männern 15%, bei Frauen 25% des Körpergewichts aus.

3.5.4.3 Eiweißstoffwechsel

Jede Zelle benötigt Proteine und erneuert sie ständig. Je nach Eiweißverbindung beträgt die Erneuerungszeit unterschiedlich lang und kann von 10 Tagen bei Proteinen der inneren Organe bis 100 Tagen für Hauteiweißstoffe betragen.

Werden die Proteine des Körpers erneuert, können einige Aminosäuren nicht wieder für den Aufbau verwendet werden und müssen in der Leber und Niere in Kohlenstoffdioxid, Wasser und Ammoniak zerlegt werden. Dabei wird Energie für den Körper frei. Das Zellgift Ammoniak wird in weiterer Folge zu Harnstoff umgewandelt und damit unschädlich für den Organismus gemacht. Einige Aminosäuren können auch in Kohlenhydrate und Fette umgewandelt werden, wenn die Eiweißaufnahme den Eiweißbedarf überschreitet. Auch wenn ein Tier hungert, mobilisiert der Organismus Muskelprotein, um Energie zu gewinnen. Bei der Aufnahme von Eiweißstoffen sollte es immer zu einer ausgeglichenen Stickstoffbilanz kommen. Das bedeutet, dass pro Tag nur die Menge an Aminosäuren (Stickstoff) aufgenommen werden soll, wie auch ausgeschieden wird. Ausnahmen bilden die Fleischfresser, deren Nahrung (neben Knochen, Bindegewebe und Innereien) zu einem höheren Anteil an Fleisch besteht.

3.5.4.4 Täglicher Eiweißbedarf

Der Bedarf an Eiweiß bzw. an Aminosäuren kann sich von Mensch zu Mensch in Abhängigkeit von Alter, Wachstum und Aktivität unterscheiden. Im Wachstum ist der Bedarf erhöht.

Säuglinge, Kleinkinder und Jugendliche beispielweise benötigen Eiweiß nicht nur zur Erneuerung, sondern auch zum Aufbau von Körpereiwweiß. Schwangere und Stillende fallen ebenfalls in diese Gruppe. Der Eiweißbedarf senkt sich im Alter nicht. Es sollte immer auf eine möglichst hohe Nährstoffdichte geachtet werden, denn Eiweiß kann durch keinen anderen Nährstoff ersetzt werden.

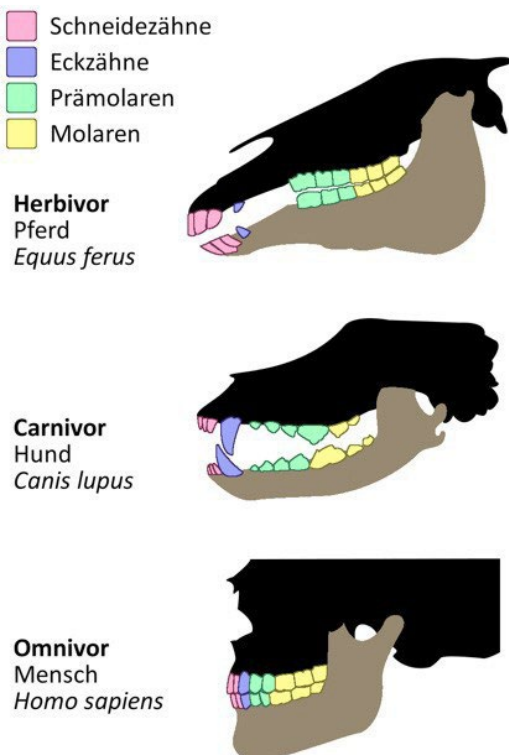


Abb. 3.6: Die unterschiedlichen Gebisse von Pflanzen-, Fleisch- und Allesfressern innerhalb der Mammalia, gezeigt anhand von Beispielschädeln.

3.5.5 Mikrobiota und Hormone

Mikrobiota

Als Mikrobiota bezeichnet man die Gesamtheit aller Bakterien, die im Verdauungstrakt beheimatet sind. Sie haben gerade in den letzten Jahren an Bedeutung für die Wissenschaft gewonnen, da deren Einfluss auf unseren Körper deutlich größer ist als bisher angenommen. Sie fördern das Wachstum von Darmzellen und verhindern eine Fremdbesiedelung durch krankheitsverursachende (pathogene) Keime. Die Zusammensetzung und Dichte der Mikrobiota variiert zwischen den verschiedenen Abschnitten des Verdauungstrakts stark, wobei der Magen am geringsten, hingegen der Dickdarm am dichtesten besiedelt ist.

Man bezeichnet die Mikrobiota gelegentlich auch als kommensal (d.h. „mit am Tisch sitzend“). Die Darmbakterien stellen aber keine Konkurrenten dar, die uns wichtige Nährstoffe wegnehmen. Durch die Konzentration auf den Dickdarm erhält die Mikrobiota nur unverdauliche Nahrungsbestandteile, z. B. Ballaststoffe. Daraus werden von den Bakterien häufig biologisch wirksame Substanzen gebildet, die uns nützen (z. B. Schutz vor Dickdarmkrebs durch Verhinderung von übermäßigem Wachstum der Zellen des Dickdarms).

Hormone

Die verschiedenen Vorgänge im Verdauungstrakt müssen reguliert werden, um chaotische Zustände zu vermeiden. Einen wichtigen Beitrag hierzu leisten die Hormone des gastrointestinalen Systems, die v.a. in Magen und Dünndarm produziert werden. Sie werden in das Blut freigesetzt und gelangen so in andere Bereiche des Körpers, womit sie Einfluss auf alle an Verdauung und Absorption beteiligten Organe nehmen können.

Hormon	Primärer Ort der Bildung	Einige Funktionen
Ghrelin	Magen	stimuliert den Appetit
Gastrin	Magen, Dünndarm	stimuliert die Bildung von Magensäure und Pepsin
Cholecystokinin (CKK)	Dünndarm	stimuliert den Gallenfluss
Sekretin	Dünndarm	hemmt die Sekretion von Magensäure
Glukagon-like Peptide1 (GLP-1)	Dünndarm, Dickdarm	steigert die Insulinsekretion, hemmt die Glukagonfreisetzung und verzögert die Magenentleerung

Tabelle 3.1: Übersicht über wichtige Hormone bei Verdauung und Absorption

3.6 ENZYMATISCHE VERDAUUNG VON MAKRONÄHRSTOFFEN

Kohlenhydrate

Zur Aufspaltung von komplexen Kohlenhydraten (Poly-, Oligo- und Disaccharide) in absorptionsfähige Monosaccharide verfügt der Verdauungstrakt über verschiedene Enzyme wie beispielsweise Amylasen, Glukosidasen, Disaccharidasen oder Lactase.

Bestimmte Nahrungsbestandteile gelten für den menschlichen Organismus als unverdaulich, da ihm die erforderlichen Enzyme zum Abbau fehlen. Dieses gilt beispielsweise für das Polysaccharid Cellulose, einem wesentlichen Bestandteil pflanzlicher Zellwände. Die unverdaulichen Nahrungsbestandteile werden gelegentlich unter dem Begriff Ballaststoffe zusammengefasst, was insofern irreführend ist, als dass sie keinen unnötigen Ballast darstellen.

Lipide

Der überwiegende Teil der Nahrungsfette liegt als Triglyceride mit langkettigen Fettsäuren vor. In geringen Mengen finden sich hier noch Cholesterin und Cholesterinester, aber auch Phospho-, Glyko- und Sphingolipide.

Lipide stellen den Verdauungstrakt vor das Problem, dass sie nicht wasserlöslich sind, was für die zur Verdauung erforderlichen Enzyme aber nicht gilt. Die Vermengung von fettlöslichen Nahrungslipiden mit wasserlöslichen Verdauungsflüssigkeiten wird als Emulgieren bezeichnet.

Eiweiß

Proteine werden von Peptidasen gespalten, wobei man zwischen Exopeptidasen und Endopeptidasen unterscheidet (je nachdem ob das Makromolekül an den Enden oder in der Mitte gespalten wird).

Die vorhandenen Enzyme sind spezifisch für verschiedene Aminosäuren.

Enzym	Peptidasen-Typ	Herkunft
Pepsin	Endopeptidase	Magen
Trypsin	Endopeptidase	Pankreas
Chymotrypsin	Endopeptidase	Pankreas
Elastase	Endopeptidase	Pankreas
Carboxypeptidase A und B	Exopeptidase	Pankreas
Aminopeptidasen	Exopeptidase	Bürstensaum

Tabelle 3.2: Wichtige Enzyme bei der Verdauung von Eiweiß im menschlichen Organismus

3.6.1 Kohlenhydratverdauung

Bei der Verdauung von Kohlenhydraten werden die Di-, Oligo- und Polysaccharide durch Enzyme zu Einfachzuckern gespalten und dadurch abgebaut. Liegen dann letztlich die Einfachzucker vor, können diese über die Blutbahn zu den Zellen transportiert werden und können dort zur Energieversorgung herangezogen oder im Falle von Glukose in Leber und Muskel als Glykogen gespeichert werden.

Bei einer Verknüpfung von zwei Einfachzuckern zu einem Zweifachzucker wird immer ein Wassermolekül frei. Umgekehrt geschieht die Spaltung von einem Zweifachzucker zu zwei Einfachzuckern immer unter Aufnahme eines H₂O Moleküls.

Viele Organe und Verdauungssäfte sind in die Verdauung der Kohlenhydrate eingebunden. Der erste Schritt der Verdauung von Stärke beginnt bereits im Mund. Im Speichelsaft befindet sich das Enzym α -Amylase. Im Magen wird die Verdauung der Stärke durch den niedrigen pH-Wert unterbrochen. Weiter geht es im Dünndarm, in dem der pH-Wert im alkalischen vorliegt und die kohlenhydratspaltenden Enzyme aktiv sind. Im Zwölffingerdarm mündet der Eingang der Bauchspeicheldrüse, die α -Amylase produziert, welche den Hauptanteil der Stärkeverdauung übernimmt. Der Dünndarm sekretiert verschiedene Glukosidasen (Maltase, Saccharase und Lactase) an der Bürstensaummembran der Darmschleimhaut, die die entstandenen Maltodextrine, Maltose und andere Disaccharide (Laktose, Saccharose) gemeinsam mit den im Pankreassaft und Dünndarmsaft befindlichen Enzymen spalten.

Das Enzym Amylase spaltet die unverzweigten Ketten von Stärke und Glykogen zu Dextrinen unter Wasseranlagerung. Im weiteren Schritt werden die Dextrine zu Maltosen und letztlich zu Glukose gespalten.

Glukose wird aus Stärke langsamer freigesetzt als aus Saccharose. Daher führt Saccharose im Umkehrschluss zu einem schnelleren Anstieg des Blutzuckers.

3.6.1.1 Ballaststoffe

Beinahe alle pflanzlichen Lebensmittel enthalten unverdauliche Ballaststoffe in Form von Zellulosen, Hemizellulosen, Pektinen oder Ligninen. Ballaststoffe müssen einerseits aufgrund ihrer festeren Struktur stärker gekaut werden, wodurch die Kautätigkeit und die Speichelsekretion angeregt werden. Andererseits können Ballaststoffe nicht verdaut werden, bleiben länger im Magen und sorgen für ein lang anhaltendes Sättigungsgefühl. Ihr vergleichsweise großes Volumen führt außerdem zu einer erhöhten Ausschüttung von Verdauungssäften. Gelangen die Ballaststoffe schließlich in den Darm, binden sie Wasser, quellen auf und regen damit die Dickdarmbewegung an. Es ist förderlich, dass Ballaststoffe die Verdauung von Stärke verzögern, Schadstoffe können sogar gebunden und wieder ausgeschieden werden. Jedoch muss der

mögliche Effekt von Ballaststoffen auf eine verzögerte Aufnahme von Mineralstoffen durch deren Bindung sowie von Vitaminen bei der Ernährung beachtet werden. Ballaststoffe sind für Menschen wichtig für eine gesunde Ernährung, da sie Obstipation, Übergewicht, Zuckerkrankheit und Fettstoffwechselstörungen erfolgreich entgegenwirken können. Allerdings sollte bei einer erhöhten Ballaststoffaufnahme gleichzeitig auch die Flüssigkeitszufuhr gesteigert werden, da die Fasern stark wasserbindend sind. Bei einer erhöhten Ballaststoffaufnahme kann es des Weiteren zu einer erhöhten Gasbildung im Darm kommen, was zu Unwohlsein führen kann.

3.6.2 Fettverdauung und -stoffwechsel

Aufgrund der Unlöslichkeit der Fette in wässrigem Milieu können auch die Verdauungsenzyme nicht wirksam werden. Um Fette verdauen zu können, müssen sie zunächst mithilfe von Gallensäuren emulgiert werden, damit die Verdauungsenzyme (Lipasen) wirken können (siehe auch 3.5.1). Die Gallensäuren werden von der Leber gebildet und in der Gallenblase gespeichert. Nach einer Fett-enthaltenden Mahlzeit wird die Galle in den Dünndarm sezerniert. Die Gallensäuren fungieren als Emulgatoren, indem sie sich mit den Fetten (z. B. Triglyzeride) verbinden und sogenannte Mizellen bilden. Gallensäuren haben dafür ein hydrophobes und ein hydrophiles Ende. Im Inneren der Mizelle sind die hydrophoben Fette; nach außen schauen die hydrophilen Enden der Gallensäuren, die im Kontakt mit der wässrigen Umgebung im Darminhalt sind. Durch die Mizellenbildung kommt es zur Vergrößerung der Oberfläche und die Lipasen können die Fettmoleküle besser angreifen. Die Lipasen wiederum spalten unter Wasseranlagerung die Fette in ihre Bausteine, nämlich in Glycerin und die dem betreffenden Fett zugrundeliegenden Fettsäuren. Die Fettsäuren und das Glycerin werden in den Mizellen zur Darmschleimhaut verbracht und aufgenommen.

In den Darmzellen werden Glycerin und Fettsäuren wieder zu Triglyzeriden zusammengesetzt und mit sogenannten Lipoproteinen, Eiweiß, Phospholipiden und Cholesterin zu Chylomikronen umgebaut, welche nun wasserlöslich sind und über die Lymphe ins Blut und weiter zum Fettgewebe transportiert werden. Dort werden Fettsäuren abgespalten und ins Depotfett eingebaut. Die wasserlöslichen kurzkettigen und mittelkettigen Fettsäuren gelangen direkt über die Pfortader zur Leber.

3.6.3 Eiweißverdauung

Die enzymatische Eiweißverdauung beginnt im Magen und wird im Dünndarm fortgesetzt (siehe auch 3.5.1). Neben dem Magen und der Dünndarmschleimhaut ist die Bauchspeicheldrüse durch die Bildung von Proteasen (eiweißspaltende Enzyme) an der Eiweißverdauung beteiligt.

Bei der Eiweißverdauung werden die Proteine in ihre Grundbausteine, die Aminosäuren, zerlegt. Zunächst gerinnen die Proteine durch Einwirken der Magensäure und die räumliche Struktur wird zerstört. Dabei wird die Oberfläche der Proteine vergrößert und die Verdauung kann leichter stattfinden. Zwei verschiedene Typen von Verdauungsenzymen spalten unter Wasseranlagerung die Proteine. Die Endopeptidasen spalten die Proteine in der Mitte der Aminosäurenkette, wodurch zunächst Polypeptide entstehen. Die Exopeptidasen spalten von den Polypeptiden die jeweils endständige Aminosäure ab. Nach und nach werden die Polypeptide vollständig in die einzelnen Aminosäuren zerlegt. Die einzelnen Aminosäuren gelangen schließlich über die Pfortader zur Leber. Die Leber verwendet sie zum Aufbau von Bluteiweißstoffen wie Albumine und Globuline. Diese wiederum transportieren die Aminosäuren zu allen anderen Zellen des Körpers.

3.6.4 Absorption von Nährstoffen

Hinsichtlich der Energie, die für den Transport der Nährstoffe durch die Zellen des Verdauungstrakts benötigt wird, unterscheidet man zwischen passiven (keine Energie erforderlich) und aktiven Mechanismen (Energie erforderlich).

Ein sehr wichtiger aktiver Absorptionsvorgang in unserem Organismus betrifft das Elektrolyt Natrium, dass in geladener Form als Natriumion aus dem Verdauungstrakt (v.a. dem Dünndarm) in das Blut transportiert wird. Die Zellen des Dünndarms verfügen auf der Seite, die dem Speisebrei zugewandt ist, über mehrere Transportproteine, die Natriumionen in das Innere der Zelle schleusen können. Es gibt Ausnahmen von

diesen natriumabhängigen Transportprozessen; eine dieser Ausnahmen betrifft die Absorption von Lipiden.

Lipide stellen den Verdauungstrakt durch ihre Fettlöslichkeit vor einige Probleme, was die enzymatische Spaltung betrifft. Sind diese Probleme überwunden, gelangen die Spaltprodukte der Lipide durch passive Diffusion (also ohne Energieaufwand) in die Dünndarmzelle, da Zellmembranen ebenfalls fettlöslich sind. In der Zelle findet ein Neuaufbau komplexerer Lipide statt.

3.6.5 Ernährungsabhängige Krankheiten

Die Ernährungsepidemiologie ist ein noch junger Forschungszweig. Sie entstand aus der Erkenntnis heraus, dass ein Zusammenhang zwischen Ernährungsweise und dem Auftreten von Erkrankungen besteht. Hier werden exemplarisch Adipositas und Diabetes mellitus betrachtet.

3.6.5.1 *Übergewicht und Adipositas*

Sowohl bei Übergewicht als auch Fettsucht (Adipositas) ist die Fettmasse des Körpers über ein normales Maß hinaus erhöht. Als Orientierung in der Klassifizierung bei Erwachsenen gilt der Body Mass Index (BMI), welcher Hinweise auf diese Erkrankung gibt. Längerfristig ist bei Übergewicht oder Adipositas mit dem Auftreten von chronischen Folgeerkrankungen zu rechnen. Dazu zählen neben dem im Folgenden beschriebenen Diabetes mellitus Typ 2 auch Störungen des Herz-Kreislauf-Systems oder Tumorerkrankungen.

Neben der BMI-Klassifizierung gilt die Analyse der Körperfettverteilung zur Beurteilung von Gesundheitsrisiken. Die Entstehung von Übergewicht und Adipositas ist beeinflusst von exogenen und endogenen Faktoren.

Zu den äußeren Einflüssen zählen insbesondere falsche Ernährung, Umweltgifte und mangelnde Bewegung.

Als endogene Faktoren gelten z. B. genetische Anlagen oder Störungen des Hormonhaushalts. Ein ungesunder Lebensstil (wie er z. B. durch falsche Ernährungsgewohnheiten und ein zu geringes Ausmaß an körperlicher Aktivität zum Ausdruck kommt) kann die Entstehung von Übergewicht und Adipositas nach sich ziehen. Es kommt zu einer langfristigen positiven Energiebilanz, d.h. es wird mehr Energie über die Nahrung aufgenommen, als durch Umsatzgrößen wieder verbraucht wird. Der Überschuss wird von unserem Organismus in Form von Fettgewebe gespeichert.

Übergewicht und Adipositas führen zu einer Vielzahl von Komplikationen, die im Folgenden nur stichpunktartig aufgelistet werden:

- Der Bewegungsapparat (Knochen und Gelenke) wird durch das höhere Körpergewicht mehr beansprucht als üblich, wodurch es zu Veränderungen bei Knien, Füßen und Wirbelsäule kommen kann.
- Die Bronchien der Lunge sind anfälliger für Erkrankungen und Infektionen.
- Weitere typische Folgen betreffen das Herz- und Kreislauf-System (z. B. Bluthochdruck, Arteriosklerose, Herzinfarkt).
- Ebenfalls wird die Entstehung von Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes mellitus Typ II, Fettstoffwechselstörungen und Gicht begünstigt.
- Ein nicht zu unterschätzendes Risiko besteht auch für verschiedene Formen von Krebs.
- Nicht zuletzt können psychische Erkrankungen wie Depression (z. B. durch Minderwertigkeitsgefühle wegen des erhöhten Körpergewichts) auftreten, die in einen Selbstverstärkungsprozess münden können.
- Neben krankheitsbedingten Folgeerscheinungen können Unfälle durch eingeschränkte Beweglichkeit und verminderte Reaktionsgeschwindigkeit auftreten.

Bei Übergewicht und Adipositas zählt der Grundsatz „Vorbeugen ist besser als heilen“, d.h. durch einen gesunden Lebensstil wird ein normales Körpergewicht aufrechterhalten, Übergewicht und Adipositas stellen sich gar nicht erst ein. Wenn sich Übergewicht und Adipositas bereits manifestiert haben, gilt es, die zahlreichen Folgekomplikationen zu vermeiden. Diese Maßnahmen setzen am Lebensstil an.

3.6.5.2 *Diabetes mellitus*

Unter dem Begriff Diabetes mellitus werden verschiedene Erkrankungen des Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsels zusammengefasst, bei welchen eine Störung der Sekretion von Insulin in den β -Zellen der Langerhansschen Inseln des Pankreas oder der Wirkung des Insulins an den Körperzellen vorliegt. In beiden Fällen führt dies zu einem chronischen Anstieg des Blutzuckerspiegels (Hyperglykämie). Umgangssprachlich wird die Stoffwechselstörung häufig als „Zuckerkrankheit“ bezeichnet. Es gibt zwei Ausprägungsformen dieser Erkrankung.

Bei Diabetes mellitus Typ I kann bereits im Kindes- oder Jugendalter eine verminderte oder fehlende Insulinproduktion vorhanden sein. Es handelt sich hierbei um eine Autoimmunerkrankung, bei der die Immunabwehr die körpereigenen β -Zellen der Langerhansschen Inseln im Pankreas zerstört.

Symptome sind rascher Gewichtsverlust, Durstgefühl, häufiger Harndrang, Dehydratation, Erbrechen, Müdigkeit, Konzentrationsstörungen u. a.

Diabetes mellitus Typ II entwickelt sich schleichend und langsam. Personen mit dieser Erkrankung bilden eine Insulinresistenz aus. Hierbei versucht der Organismus anfänglich noch selbstständig die Energiespeicher aufzufüllen, indem er immer mehr und mehr Insulin produziert. Die Körperzellen nehmen jedoch das Signal des Insulins nur stark vermindert wahr, wodurch Glukose nicht in die Zellen gelangt und der Blutglukosespiegel weiter ansteigt.

Symptome sind häufig unspezifisch (z. B. Müdigkeit, erhöhte Infektneigung), Harndrang, Durstgefühl, Gewichtsverlust etc.

Die Bedeutung von Insulin

Insulin ist ein Hormon, das im Glukose- und Energiestoffwechsel eine wichtige Rolle spielt. Die Vorstufe wird in Zellen der Bauchspeicheldrüse am endoplasmatischen Retikulum (ER) gebildet und durch Spaltungsvorgänge später aktiviert.

Zu seinen wichtigsten Funktionen zählt die zelluläre Aufnahme von Glukose, aber auch von Fettsäuren und Aminosäuren, wodurch die Konzentration dieser Substanzen im Blut geregelt wird. Weiters ist Insulin an der Synthese von Glykogen, Triglyzeriden und Proteinen beteiligt.

Liegt ein Mangel vor, werden die Zellen verschiedener Bereiche des Körpers nur vermindert mit Glukose versorgt – die Aufnahme und Oxidation ist z. B. in den Muskeln und im Fettgewebe herabgesetzt: Die Konzentration der Glukose im Blut steigt, wird die Substanz mit dem Harn ausgeschieden („Nierenschwelle“), und das Durstgefühl nimmt zu. Durch den Mangel an Insulin ist infolge auch der Aufbau von Glykogen gestört, welches u. a. als Kohlenhydratspeicher für die Phasen zwischen den Mahlzeiten benötigt wird. Von einem Überzucker (Hyperglykämie) wird gesprochen, wenn der Blutglukosespiegel stark oder extrem erhöht ist. Das kann durch Konsum von größeren Mengen an Kohlenhydraten, Gabe von zu wenig Insulin oder fehlenden Medikamenten gegen einen hohen Blutglukosespiegel (bei Typ II) passieren. Typische Symptome sind Durstgefühl, Harndrang, Müdigkeit, verringerter Appetit.

Sinkt der Blutglukosespiegel unter 50 mg/dL, liegt ein Unterzucker (Hypoglykämie) vor. Eine Hypoglykämie kann eintreten nach zu geringer Kohlenhydratzufuhr, hoher körperlicher Belastung oder einer falschen Dosierung von Medikamenten. Die Hypoglykämie geht einher mit Zittern, Schweißausbruch, raschem Puls, Schwindel, vermehrtem Appetit. Das diabetische Koma ist eine lebensbedrohliche Form der Blutzuckerentgleisung, bei der durch fehlende oder stark verminderte Insulinfreisetzung kaum noch Energie in die Zellen gelangt und im Stoffwechsel über die β -Oxidation vermehrt Ketonkörper gebildet werden. Personen können in eine schwere Bewusstlosigkeit fallen. Die Art und Weise, wie Diabetes behandelt wird, orientiert sich an der Ursache dieser Erkrankung (Typ I oder II). Bei den verzehrten Lebensmitteln muss neben der Menge auch die Art der zugeführten Kohlenhydrate berücksichtigt werden. Beim Konsum von zuckerreichen Speisen muss der Körper viel Insulin ausschütten, um dieses in die Zellen zu schleusen bzw. dadurch die Blutzuckerkonzentration zu senken. Komplexe Kohlenhydrate wie Stärke werden in den Abschnitten des Darms deutlich langsamer zu Glukose abgebaut und ins Blut abgegeben. Bei Anwesenheit von Ballaststoffen verzögert sich die Aufnahme zusätzlich. Häufig ist neben einer strengen Diät eine regelmäßige Gabe von Insulin unverzichtbar.

3.6.5.3 *Glykämischer Index (GI)*

Der Glykämische Index ist ein experimentell ermittelter Wert, bei dem der Anstieg der Blutzuckerwerte durch zuckerhaltige Lebensmittel mit dem durch Glukose ausgelösten Anstieg verglichen wird. Beispielsweise führt die gleiche Menge an Kohlenhydraten in gekochten Bohnen zu einem niedrigeren Blutzuckeranstieg als reine Glukose. Das liegt daran, dass in Bohnen die Freisetzung der Zucker zum

einen durch den Amylose- zu Amylopektin-Anteil, die Stärkemolekülstruktur sowie die in Bohnen enthaltenen Ballaststoffen verzögert abläuft. Bohnen besitzen folglich einen niedrigeren GI als Glukose. Sie liefern aber deshalb in Summe nicht weniger Glukose.

Nach der Absorption erhöht die Glukose den Blutzuckerspiegel (Hyperglykämie), welcher dazu führt, dass die Bauchspeicheldrüse vermehrt Insulin sekretiert, um den Blutzucker auf das normale Niveau zu senken. Insulin hat die Aufgabe, Glukose aus dem Blut in die Zellen zu schleusen. Bei Diabetes-Typ I hat die Bauchspeicheldrüse ihre Funktion verloren, Insulin zu produzieren, wodurch der Blutzuckerspiegel der Patienten hoch bleibt. Bei Diabetes-Typ II sprechen die Körperzellen schlechter auf das Insulin an; sie werden insulinresistent, sodass die Glukose im Blut verbleibt. Verschiedene Lebensmittel können somit zu unterschiedlichen Blutzuckeranstiegen und Insulinausschüttungen führen. Dies ist auch der Grund, weshalb diabetische Patienten nach Möglichkeit Lebensmittel mit einem niedrigen Glykämischen Index zu sich nehmen sollten.

3.7 WICHTIGE STOFFWECHSELWEGE ZUR ENERGIEGEWINNUNG AUS NAHRUNG

3.7.1 Glykolyse

Die Glykolyse stellt den Hauptabbauweg der Kohlenhydrate dar. Der folgende Stoffwechselweg beschreibt die Energiegewinnung aus Kohlenhydraten aus der Nahrung (in Form von Glukose) sowie den Glykogenreserven. Der Abbau von Glukose kann im Organismus unter aeroben und anaeroben Bedingungen ablaufen (d.h. unter Anwesenheit von Sauerstoff oder ohne).

Am Anfang der Glykolyse stehen wahlweise zwei Substrate zur Verfügung: Glykogen (körpereigene Speicher) und Glukose (aus Nahrung). Entsprechend finden verschiedene Reaktionsschritte zu Beginn statt (1 bei Glykogen bzw. 2 bei Glukose), um ein gemeinsames Ausgangsprodukt für alle weiteren Reaktionen zu erhalten.

3.7.2 β -Oxidation

Fette dienen dem Körper als langfristige Energiereserven, welche bei längeren Hungerphasen zur Energiegewinnung herangezogen werden. Fette werden als Triglyzeride im Fettgewebe gespeichert. Durch Lipasen werden Fettsäuren von Glycerin abgespalten und in der β -Oxidation abgebaut, welche in den Mitochondrien stattfindet.

3.7.3 Citratzyklus

Der Citratzyklus stellt einen zentralen Stoffwechselweg dar. Es handelt sich hierbei um ein komplexes System, bestehend aus Abbau- und Synthesereaktionen für Kohlenhydrate, Lipide und Proteine sowie weiterer Substanzen im menschlichen Organismus. Dieser Mechanismus läuft in der Zelle in den Mitochondrien ab. Während des Zyklus finden mehrere Redoxreaktionen statt.

4 Herzkreislauf

Das Blut wird vom Herzen durch das Blutgefäßsystem gepumpt. Das Blutgefäßsystem besteht – ausgehend vom Herz – aus Arterien, die sich zu Kapillaren (Haargefäßen) verzweigen, welche wieder zu Venen zusammenführen und das Blut zum Herz zurückleiten.

Bei den Gefäßen unterscheidet man also:

- Arterien: Diese führen meist O₂-reiches Blut. Sie sind dickwandig und elastisch, und leiten das Blut vom Herzen weg. Sie besitzen reichlich glatte Muskulatur.
- Venen: Diese führen meist O₂-armes, aber CO₂-reiches Blut und sind dünnwandiger. Sie leiten das Blut zum Herzen hin.
- Kapillaren: Diese sind sehr dünnwandig und bestehen oft nur aus einer Zellschicht. Hier findet der Stoffaustausch zwischen Blut und Gewebe statt.

4.1 AUFBAU DER GEFÄßE

Alle Blutgefäße besitzen ein glattes Innenhäutchen, das Endothel; Kapillargefäße bestehen zum Teil nur aus Endothelzellen. Herznahe Gefäße wie beispielsweise die Aorta (Hauptschlagader) haben viele elastische Fasern eingelagert (elastische Arterien), während in den herzfernen Arterien die Muskulatur dominiert (muskuläre Arterien). Venen besitzen Venenklappen, die das Rückströmen von Blut verhindern können.

Das Blut wird vom Herzen über die Arterien zu den verschiedenen Organen geleitet. Es gibt dort O₂ und Nährstoffe ab, nimmt CO₂ sowie Stoffwechselprodukte auf und wird über die Venen zum Herzen zurückgeleitet. Vom Herz wird das Blut zur Lunge gepumpt, wo es mit O₂ angereichert wird, und CO₂ an die Atemluft abgibt. Das O₂-reiche Blut gelangt dann zum Herzen zurück und wird über die Aorta und die Arterien wieder zu den Organen und Geweben gepumpt.

4.2 HERZ UND BLUTGEFÄßSYSTEM

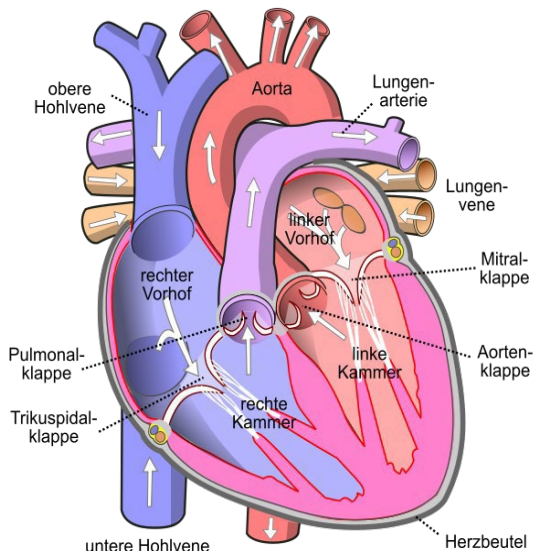


Abb. 4.1.: Exemplarisch: Schematischer Aufbau des menschlichen Herzens.

Das Herz liegt in der Brusthöhle, etwas mehr links der Medianebene. Es liegt nicht frei in der Brusthöhle, sondern ist vom Herzbeutel (Perikard) umgeben. Der Herzbeutel schützt das Herz vor Überdehnung und fixiert es nach ventral hin. Er besteht aus zwei Anteilen: dem Pericardium fibrosum und dem Pericardium serosum. Zwischen diesen beiden Schichten befinden sich ca. 10-15 ml Flüssigkeit. Dadurch ist eine leichte Verschieblichkeit des Herzens während der Herzarbeit gewährleistet.

Schichtenaufbau: Die Herzwand ist – von außen nach innen – aus drei Schichten aufgebaut. Sie besteht

aus:

- Epikard, einer dünnen Serosa
- Myocard, einer dicken Muskelschicht und
- Endocard, einer glatten Wandschicht.

Kammersystem des Herzens: Das Herz besteht (bei Säugetieren) aus zwei Vor- und zwei Hauptkammern, jeweils einer linken und einer rechten.

- Linke Vorkammer (= Atrium): In den linken Vorhof münden die Lungenvenen, die aus der Lunge O₂-reiches (arterielles) Blut zuführen. Der linke Vorhof ist kleiner als der rechte. Die Innenfläche des Vorhofes ist glatt, nur im Herzohr, einer Ausstülpung des Vorhofes, ist sie durch Muskelwülste uneben. Im Boden des linken Atriums befindet sich die Öffnung zur linken Hauptkammer (= linker Ventrikel).
- Linke Kammer (= Ventrikel): Diese hat eine starke muskulöse Wand. Die Innenseite ist durch Muskelwülste uneben. In den Ventrikelraum hinein ragen die Papillarmuskeln.
- Rechtes Atrium: In den rechten Vorhof münden die vordere und die hintere Hohlvene. Auch der rechte Vorhof besitzt ein Herzohr, dessen Innenfläche uneben ist.
- Rechter Ventrikel: Der rechte Ventrikel hat eine dünnere Muskelwand als der linke. Aus dem rechten Ventrikel wird das Blut über die Lungenarterie der Lunge zugeleitet.

Gefäßversorgung des Herzens

Das Herz wird durch Herzkranzarterien (Aa. coronariae), die aus dem Anfangsteil der Aorta entspringen, versorgt. Die Herzkranzvenen, die das O₂-arme Blut abtransportieren, münden in den rechten Vorhof. Kleinere Venen münden sowohl in den rechten wie auch linken Vorhof.

Anatomie des Blutgefäßsystems

Das vom Herzen in die Hauptschlagader (= Aorta) gepumpte Blut versorgt alle Gewebe. Aus der Aorta entspringen aufeinanderfolgend die Arterien für die Versorgung der einzelnen Organe. Im Arteriensystem zweigt sich die Aorta auf. Nachdem das Blut in den Kapillaren das Gewebe durchflossen hat, sammelt es sich wieder in größeren Gefäßen, den Venen, und fließt über die vordere und hintere Hohlvene zum Herzen zurück. Die entsorgenden Venen der Organe werden meist ähnlich wie die entsprechenden versorgenden Arterien benannt.

Physiologie des Herzens

Das Herz hat die Aufgabe, die Blutströmung im kleinen und großen Kreislauf aufrechtzuerhalten. Um mit größtmöglicher Sicherheit ein kontinuierliches Pumpen des Herzens zu gewährleisten, werden die Erregungen, die die Kontraktion der Herzmuskulatur verursachen, im Herzen selbst gebildet.

4.3 ERREGUNGSBILDUNG UND ERREGUNGSLEITUNG IM HERZEN

Die wichtigste Struktur für die Erregungsbildung ist der **Sinusknoten**, welcher sich in der Wand des rechten Vorhofs befindet. Hier entstehen im Normalfall die elektrischen Erregungen für die Herzkontraktion; daher wird dieser auch als „Schrittmacher“ bezeichnet. Vom Sinusknoten gelangt die elektrische Erregung über die Vorhofmuskulatur zum sog. **Atrioventrikulärknoten**. Dieser befindet sich im rechten Vorhof dicht an der Grenze zwischen Vorhof und Kammer. Von hier gelangt die elektrische Erregung zum **His-Bündel** (in der Scheidewand zwischen Vorhöfen und Kammern), welches sich in einen rechten und in einen linken Kammerschenkel teilt. Diese **Kammerschenkel** ziehen an den Seiten der Kammerscheidewand in Richtung Herzspitze und zweigen sich hier in die sog. **Purkinjefasern** auf. Der Impuls geht nun direkt auf die Kammermuskulatur über. Die Weiterleitung der Erregung geschieht sehr schnell. Lediglich im Atrioventrikulärknoten ist eine minimale Verzögerung. Hierdurch ziehen sich erst die Vorhöfe und dann die Kammern zusammen.

Elektrokardiogramm (EKG)

Die elektrischen Vorgänge am Herz während der Erregungsausbreitung über das gesamte Herz projizieren sich nach außen und bewirken auch Spannungsunterschiede an der Körperoberfläche. Diese

Potentialdifferenzen können mittels Elektroden abgeleitet und nach entsprechender Verstärkung aufgezeichnet werden (= EKG). Diese ableitbaren Spannungsveränderungen entsprechen ungefähr denjenigen, die am in Erregung versetzten Muskelstreifen ableitbar sind.

Dazu setzt man zwei Elektroden in entsprechendem Abstand voneinander auf einen Muskelstreifen und kann nun mittels Spannungsmessgerät (Voltmeter) die Veränderungen der Spannung zwischen den beiden Ableitungen ablesen. Zu Beginn, während des Membranruhepotentials, ist die Außenseite des Muskelstreifens an beiden Ableitungen positiv geladen. Es fließt kein Strom zwischen den Ableitungen, das Voltmeter zeigt null. Sobald die Erregung die erste Ableitung erreicht, schlägt das Voltmeter aus. Die erregte Stelle ist durch das Aktionspotential negativ gegenüber der noch unerregten und es fließt Strom. Wenn die Erregung auch die zweite Ableitung erreicht, sind beide Stellen negativ geladen. Es fließt kein Strom mehr und die am Voltmeter ablesbare Spannung kehrt wieder zur Nulllinie zurück.

Dann beginnt an der ersten Ableitung die Wiederherstellung des Membranruhepotentials (Repolarisation), die Stelle wird wieder unerregt. Es fließt Strom in der umgekehrten Richtung, das Voltmeter zeigt wiederum eine Spannungsdifferenz an, und die Kurve geht nach unten. Sobald die Repolarisation auch die zweite Ableitung erreicht, sind wiederum beide Stellen unerregt und es fließt kein Strom mehr.

Am Herzen steigt zu Beginn der Erregungsausbreitung in den Vorhöfen die Potentialdifferenz und damit auch die Kurve an. Sobald die gesamte Vorhofmuskulatur erregt ist, fällt die Kurve ab (P-Zacke oder Welle des EKG's) und bleibt dann auf der Nulllinie.

Wenn nur mehr ein Teil der Vorhofmuskulatur erregt ist, wird die Potentialdifferenz negativ. Die Erregung geht nun über den AV-Knoten auf die Kammermuskulatur über. Wegen der Stärke der Kammermuskulatur sind die Potentialschwankungen ausgeprägter. Zu Beginn sieht man die durch die Vorkammerendschwankung negative Q-Zacke, während der Erregungsausbreitung in der Kammermuskulatur die hohe R-Zacke und dann die wegen der unterschiedlichen Erregungsausbreitung in der Kammermuskulatur negative S-Zacke. Da die Erregung zuerst in der Herzspitze abnimmt, ist die Endschwankung (T-Zacke) im Gegensatz zur Ableitung vom isolierten Muskelstreifen positiv.

Aus einem aufgezeichneten EKG kann man nun durch abnormale Zacken, fehlende Zacken oder unterschiedliche Abstände zwischen den Zacken auf Fehler in der Erregungsbildung oder -leitung am Herzen schließen. Beispiele wären Herzblöcke (Störungen in der Erregungsleitung) und Extra-systolen (Störungen in der Erregungsbildung).

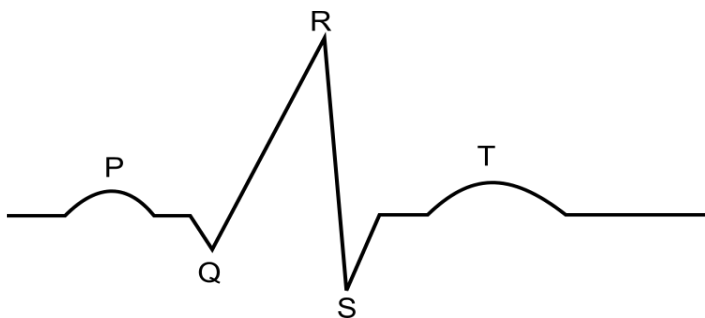


Abb. 4.2: EKG

Die mechanischen Erscheinungen der Herztätigkeit

Die Herztätigkeit unterteilt sich in Herzarbeit (= Systole) und Herzuhe (= Diastole). Während der Systole pumpt das Herz, während der Diastole erholt es sich. Die Herztätigkeit der Kammern teilt man in fünf Phasen:

- Füllungsphase: Die Füllung des Herzens erfolgt zunächst rein passiv, wird aber gegen Ende der Füllungsphase durch die Kontraktion der Vorhöfe aktiv.
- Umformungsphase: Am Beginn der Kontraktion der Kammern geht die Form des Herzens von einer Kegel- in eine Kugelform über. Der Druck im Ventrikel bleibt dabei noch unverändert.
- Druckanstiegsphase: Die Atrioventrikularklappen sind nun verschlossen. Die Muskulatur des Herzens sowie auch die Papillarmuskeln kontrahieren sich und die Sehnenfäden zu den Segelklappen werden gespannt. Der Druck steigt während dieser Phase solange an, bis er den Druck in der Aorta bzw. der Lungenarterie überschreitet. Durch die Kontraktion der Kammern nimmt gleichzeitig das Fassungsvermögen der Vorkammern zu.

- Austreibungsphase: Der Druck im Ventrikel übersteigt den Druck in der Aorta bzw. in der Pulmonalarterie, die Klappen werden durch diesen Überdruck geöffnet und das Blut wird rasch aus den Ventrikeln geschleudert.
- Entspannungsphase: Nach dem Austreiben des Blutes aus dem Herzen schließen sich die Klappen, da jetzt der Druck in der Aorta bzw. in der Lungenarterie wieder größer ist als in den Ventrikeln. Am Ende der Entspannungsphase öffnen sich die Segelklappen und eine neue Füllungsphase beginnt. Während der Entspannungsphase sind die Gefäße der Herzmuskulatur weitgestellt und die Durchblutung ist sehr gut. Je länger die Entspannungsphase dauert, desto mehr wird der Herzmuskel geschont.

Akustische Erscheinungen der Herztätigkeit (=Herztöne)

1. Herzton: Entsteht durch die Kontraktion der Muskulatur bei gefüllter Kammer zu Beginn der Anspannungsphase (zeitlicher Zusammenhang mit der R-Zacke des EKG).

2. Herzton: Ist lauter, heller und kürzer als der erste. Er entsteht durch den Schluss der Semilunarklappen der Aorta und des Truncus pulmonalis am Ende der Austreibungsphase (zeitgleich mit der T-Welle im EKG).

Herzarbeit

Die Leistung des Herzens kann durch Veränderung der Herzfrequenz (Schläge des Herzens pro Minute) und des Schlagvolumens (Blutausstoß pro Herzschlag) gesteigert werden. Aus Schlagvolumen und Herzfrequenz kann man sich das Herzminutenvolumen (Blutausstoß pro Minute) berechnen.

Ruhewerte des Menschen und verschiedener Tiere (Tabelle 4.1):

Art	Gewicht (kg)	Herzfrequenz	Schlagvolumen (ml)	Minutenvolumen (l)
Pferd	500	34	852	29
Rind	500	50	696	34,6
Mensch	70	70	72	5,07
Schaf	50	75	53	3,98
Hund	10	100	14	1,45

4.4 PHYSIOLOGIE DES PERIPHEREN KREISLAUFSYSTEMS

Physikalische Gesetzmäßigkeiten, die auch für das Gefäßsystem gelten:

- Je kleiner der Rohrquerschnitt ist, desto größer ist der Strömungswiderstand.
- Je länger das Rohr ist, desto größer ist der Strömungswiderstand.
- Je größer die Strömungswiderstände in einem Rohrabschnitt sind, desto rascher fällt der Druck in diesem Bereich ab.
- Geht ein dünnes Rohr in ein dickes über, so ist die lineare Strömungsgeschwindigkeit im dicken Rohr geringer als im dünnen.
- Je dickflüssiger (visköser) eine Flüssigkeit ist, desto größer sind die Strömungswiderstände.

Druck- und Querschnittsverhältnisse im Gefäßsystem

Im Blutgefäßsystem nimmt der Gesamtquerschnitt zu den Kapillaren hin zu, der Durchmesser der Gefäße wird hingegen durch die Aufzweigung in viele kleine Gefäße kleiner. Vom venösen Kapillarteil an kehren sich diese Verhältnisse um.

Aus der Zunahme des Gesamtquerschnittes bei gleichzeitiger Verengung des Gefäßdurchmessers resultiert eine starke Abnahme des Blutdruckes im Bereich der Arteriolen und Kapillaren. Durch die Zunahme des Einzelgefäßquerschnittes bei gleichzeitiger Abnahme des Gesamtgefäßquerschnittes im venösen Teil sinkt der Blutdruck in diesem Teil des Gefäßsystems nur wenig ab, während die Strömungsgeschwindigkeit wieder zunimmt. Am geringsten ist die Strömungsgeschwindigkeit in den Kapillaren.

Puls, Pulswelle

Das vom linken Ventrikel ausgeworfene Blut gelangt in die elastische Aorta und dehnt diese. Während der Diastole zieht sich die Aorta wieder zusammen, drückt das Blut dabei weiter, und bewirkt damit eine fortgesetzte Blutströmung. Aus dem diskontinuierlichen Pumpen des Herzens wird ein kontinuierlicher Blutstrom. Die vom Herzen bei jeder Systole ausgehende Druckwelle pflanzt sich über das Gefäßsystem bis zu den Arteriolen hin fort und ist als Pulswelle fühlbar. Die Geschwindigkeit, mit der sich die Pulswelle fortpflanzt, ist viel größer als die Blutströmungsgeschwindigkeit. Der Puls wird an einer genügend großen, auf einer festen Unterlage gelegenen, oberflächlichen Arterie gemessen.

Beim Puls werden folgende Kriterien beurteilt:

- **Frequenz:** Das ist die Anzahl der Pulswellen pro Minute. Es wird 1/4 Minute gezählt und die gezählten Pulswellen mit 4 multipliziert.
- **Kraft:** Es wird dabei untersucht, ob die Pulswelle schwer unterdrückbar ist. Bei der Überprüfung der Kraft des Pulses wird mit zwei Fingern am Gefäß gefühlt. Man versucht mit dem herznahen Finger die Pulswelle zu unterdrücken und fühlt mit dem herzfernen Finger ob der Puls noch durchschlägt. Aus der Kraft, die dazu benötigt wird, um die Pulswelle zu unterdrücken, schließt man auf die Kraft des Pulses. Je mehr Kraft aufgewendet werden muss, desto größer ist die Kraft des Pulses und desto größer ist auch der systolische Blutdruck. Die Überprüfung der Kraft des Pulses ist daher eine grobe Messung des "systolischen Blutdruckes".
- **Regelmäßigkeit:** Überprüfung, ob die Pulswellen in gleichen Abständen zueinander erfolgen.
- **Gleichmäßigkeit:** Untersuchung, ob die Pulswellen alle gleich stark sind.
- **Füllung des Gefäßes:** Untersuchung des Gefäßlumens, das ist die innere Weite des Gefäßes. Man untersucht dabei, ob ein Gefäß dick oder dünn ist.
- **Spannung des Gefäßes:** Überprüfung, ob das Gefäß leicht oder schwer verformbar ist.

Bei der genaueren Blutdruckmessung verwendet man direkte (blutige) oder indirekte Methoden. Bei den indirekten Methoden wird durch eine aufblasbare Gummimanschette ein Außendruck erzeugt, der dem im Gefäß vorhandenen Blutdruck entspricht und dadurch den Blutstrom unterbricht.

Regulierung der Organdurchblutung

Die Organdurchblutung wird den jeweiligen Verhältnissen und Bedürfnissen im Gewebe angepasst. Bestimmte Abschnitte des Kapillarnetzes können daher je nach Bedarf durch Selbstregulation mehr oder weniger durchblutet werden. Stoffwechselprodukte (wie z. B. Milchsäure) führen zu einer Erweiterung der Gefäßmuskulatur vor den Kapillaren und damit zu einer besseren Durchblutung. Ist nur eine geringe Durchblutung nötig, wie z. B. beim ruhenden Muskel, so wird das Kapillarnetz durch Kurzschlüsse umgangen.

Zentralnervale Regulation der Durchblutung

Das Kreislaufzentrum liegt im Stammhirn und besteht aus einem gefäßerweiternden, blutdruck-senkenden und einem gefäßverengenden, blutdruckerhöhenden Unterzentrum. Diese Zentren beeinflussen über Nerven und Hormone das Herz (bezüglich Herzfrequenz, Schlagvolumen) und die Gefäße (Verengung oder Erweiterung).

In der Wand des Aortenbogens, an der Wurzel der großen Hohlvenen und Lungenvenen, in den Vor- und Hauptkammern sowie im Herzbeutel befinden sich Druckfühler, die ihre Information zum Kreislaufzentrum senden.

Ist der Druck im arteriellen Teil des Gefäßsystems erhöht, so nimmt die Herzfrequenz ab und die Gefäße werden erweitert. Ist der Druck im venösen Teil erhöht, so steigt die Herzfrequenz und der Druck im Venensystem sinkt ab.

In Aorta und Sinus caroticus (Anfang der Kopfschlagader) befinden sich auch Chemorezeptoren, die die chemische Beschaffenheit des Blutes überprüfen und laufend insbesondere die CO₂ und O₂-Konzentration des Blutes überwachen. Bei einem Anstieg von CO₂ und einem Abfall von O₂ wird das Herzminutenvolumen erhöht und die Blutspeicher (z. B. Leber, Milz) werden entleert.

Zu einer Erhöhung der Herzfrequenz kommt es bei Aufregung und Stress. Bei einer Überlastung der zentralnervalen Regulation des Kreislaufes kommt es zum Kreislaufzusammenbruch (Kollaps) und Schock.

Lymphgefäße

Die von der Kapillaren ins Gewebe abgegebene Flüssigkeit wird nicht nur über Venen, sondern auch über

die sehr dünnwandigen Lymphgefäße abgeleitet. Diese transportieren die Lymphe über Lymphknoten und weiterführende Lymphgefäße in den Brustmilchgang, der in die vordere Hohlvene mündet.

Sekretion und Exkretion sowie die Atmung werden in Kapitel 7 behandelt.

5 Immunbiologie

Das Immunsystem schützt den Körper vor schädlichen Einflüssen (Pathogenen); körperfremde Einflüsse bezeichnet man als exogen, körpereigene als endogen. Eindringlinge werden dabei zunächst von mechanischen Barrieren wie z. B. der Haut abgehalten. Werden diese dennoch überwunden, so wird die Immunabwehr aktiviert, welche ein Eindringen erkennt und entsprechend reagiert.

5.1 BARRIEREN

Fremdkörper werden vom Eindringen in den Organismus zunächst von mechanischen Barrieren abgehalten. Letztere verfügen zusätzlich über Mechanismen, um Pathogene wieder abzutransportieren. Diese Barrieren sind Teil der sogenannten unspezifischen Abwehr, auf die später noch detaillierter eingegangen wird.

- Haut: Sie bildet die erste Barriere. Ihr Säureschutzmantel, auf der Haut lebende Mikroorganismen sowie Talg und Schweiß unterstützen sie bei der Abwehr von Pathogenen, indem deren Wachstum gehemmt wird.
- Schleimhaut, Atemwege: Durch den Schleim werden Pathogene gebunden und können abtransportiert werden.
- Augen, Mundhöhle: Durch Tränen/Speichel werden Pathogene gebunden und können abtransportiert werden. Zudem enthalten sie das antimikrobielle Enzym Lysozym.
- Magen: Durch die Magensäure werden Eindringlinge abgetötet oder in ihrem Wachstum gehemmt.
- Darm: Die Darmflora hemmt das Wachstum von Pathogenen. Durch die Entleerung des Darms werden diese abtransportiert.
- Harntrakt: Eindringlinge werden ausgeschwemmt.

5.2 BLUT

Blut dient als Transportmittel für Sauerstoff (O₂) und Kohlendioxid (CO₂) über die roten Blutkörperchen, transportiert Nährstoffe und Abbauprodukte des Körpers sowie Zellen und Moleküle des Immunsystems. Auch Hormone, die Botenstoffe des Organismus gelangen über den Blutweg an ihr Ziel.

5.2.1 Zusammensetzung des Blutes

Da die Blutkörperchen in der Blutflüssigkeit suspendiert (fein verteilt) sind, ist das Blut bei Betrachtung im Blutröhrchen undurchsichtig. Gibt man Blut allerdings auf einen Objektträger und bedeckt es mit einem Deckglas, kann man die Zellzusammensetzung des Blutes im Mikroskop untersuchen. Dabei kann man die Blutkörperchen, das sind rote (Erythrozyten) und weiße (Leukozyten), Blutzellen und Blutplättchen (Thrombozyten) unterscheiden.

Der Anteil der Blutzellen und Blutplättchen am Vollblut beträgt ca. 35 - 45%. Diesen Anteil nennt man Hämatokrit.

5.2.1.1 Blutplasma

Das Blutplasma ist jener Anteil des Blutes, der nach Abtrennung der Blutkörperchen übrigbleibt. Blutserum ist Blutplasma nach einer Gerinnung, d.h. ohne Fibrinogen.

- Organische Bestandteile:
 - o Plasmaproteine (6-8g/100ml)
 - o Diese Eiweiße im Plasma können in Albumin (ca. 40%; in der Leber gebildet), α-, β- und γ-Globuline unterschieden werden. Die γ-Globuline sind hauptsächlich Immunglobuline (=Antikörper); diese dienen der Körperabwehr.

Die Funktion der Plasmaproteine besteht neben ihren speziellen Aufgaben (Transport, Blutgerinnung, Abwehr, ...) auch in der Aufrechterhaltung des kolloidosmotischen Druckes; das bedeutet, dass sie

Flüssigkeit ins Blutgefäßsystem ziehen. Sie wirken dabei dem Austreten von Blutflüssigkeit aus den Blutgefäßen ins Gewebe und damit der Ödembildung entgegen.

- o Aminosäuren, Blut-Harnstoff-Stickstoff (= blood urea nitrogen, BUN; Abbauprodukt des Eiweiß-, Nukleinsäuren- und Muskelstoffwechsels)
- o Blutglukose (Blutzucker für Energiegewinnung)
- o Lipide (Blutfette)
- o Enzyme, Hormone, Botenstoffe, Vitamine, Farbstoffe
- Mineralbestandteile:
Na (Natrium), Cl (Chlor), Ca (Calcium), P (Phosphate), K (Kalium), Mg (Magnesium)
- Spurenelemente:
Fe (Eisen), Cu (Kupfer), Se (Selen), Zn (Zink), ...

5.2.1.1 Blutzellen

• **Erythrozyten (rote Blutkörperchen)**

Die Funktion der Erythrozyten besteht im Transport von Sauerstoff von der Lunge zum Gewebe sowie von CO₂ vom Gewebe zur Lunge. Diese Funktion erfüllen sie durch ihren Gehalt an Hämoglobin (roter Blutfarbstoff), das O₂ in größerer Menge reversibel (= umkehrbar) binden kann. Diese Zellen sind ca. 4-7 µm groß, bikonkav (an zwei Seiten eingedellt), rund und kernlos. Ihre Zahl beträgt je nach Tierart 5-15 Millionen/µl.

• **Hämoglobin**

Erythrozyten bestehen grob genommen aus ca. 70% Wasser (H₂O) und 30% Hämoglobin. Das Hämoglobin besteht aus einem Porphyrinring mit einem zentralen Eisenatom und einer daran hängenden Globinkette (Eiweißanteil). Das Hämoglobin (Hb) kann Sauerstoff leicht aufnehmen und auch leicht wieder abgeben. Hämoglobin ist in den Erythrozyten gelagert und befindet sich nicht frei im Blut, da das Blut sonst durch diesen Gehalt zu dickflüssig wäre.

• **Leukozyten (weiße Blutkörperchen)**

Leukozyten sind maßgeblich an der Immunabwehr beteiligt und ihre Zahl beträgt ca. 5000-15000/µl Blut. Man unterscheidet dabei zwischen polymorphkernigen Leukozyten (Granulozyten) und mononukleären Leukozyten.

o *Granulozyten* haben einerseits die Fähigkeit der Lokomotion (Beweglichkeit), dem Durchdringen von Kapillarwänden, der Phagozytose (Aufnahme von Teilchen) und der Digestion (Verdauung). Sie sind ein Teil der angeborenen Körperabwehr und können sich auf eingedrungene Mikroorganismen (Krankheitserreger) zubewegen (Locomotion), dazu aus dem Gefäßsystem ins Gewebe austreten, den Keim aufnehmen (Phagozytose), abtöten und abbauen (Digestion). Bei Infektionsbeginn sind vermehrt neutrophile Granulozyten im Blut vorhanden.

o Bei den *mononukleären Leukozyten* unterscheiden wir Monozyten/Makrophagen, dendritische Zellen und Lymphozyten.

Monozyten/Makrophagen: Die Bildung der Monozyten erfolgt im Knochenmark, wonach sie in die Blutbahn gelangen. Nach Aktivierung entwickeln sie sich zu Makrophagen (=Großfresser), die ins Gewebe wandern, wo sie Keime (vor allem Bakterien) aufnehmen, verdauen und Bruchstücke (= Peptide) über sogenannte MHC-Moleküle an ihrer Zelloberfläche den T-Lymphozyten präsentieren. Diese Interaktion kann dann zur Aktivierung von Lymphozyten führen.

Dendritische Zellen: Dendritische Zellen sind spezialisiert darauf, den Körper auf Eindringlinge zu überwachen. Ähnlich wie Makrophagen nehmen sie diese auf, prozessieren sie und präsentieren sie über MHC-Moleküle den T-Zellen. Durch diese Funktion sind sie (ebenso wie Makrophagen) ein wichtiges Bindeglied zwischen der angeborenen und adaptiven Immunantwort.

Lymphozyten: Der größte Anteil der Lymphozyten befindet sich außerhalb der Blutbahn im Gewebe, das Blut dient dabei als Transportmittel. Die Lymphozyten sind sehr beweglich und können die Gefäßwände durchwandern. Sie dienen der hochspezifischen Körperabwehr, sind gegen Ende einer Infektion vermehrt in der Blutbahn, und bei Stress vermindert. Ihre Vermehrung erfolgt im lymphatischen Gewebe, das sind Lymphknoten und Lymphknötchen (Lymphfollikel) der Milz sowie im Magen-Darmtrakt (Peyersche

Platten). Zu den Lymphozyten gehören die natürlichen Killerzellen (NK-Zellen) sowie die T- und B-Lymphozyten. NK-Zellen gehören zum angeborenen Immunsystem und töten hauptsächlich virusinfizierte Zellen und Tumorzellen. T- und B-Lymphozyten gehören zum adaptiven Immunsystem. T-Lymphozyten können entweder virusinfizierte Zellen und Tumorzellen töten (zytolytische T-Zellen) oder sie sind an der Immunregulation beteiligt (T-Helferzellen). B-Lymphozyten entwickeln sich zu antikörperproduzierenden Plasmazellen. T- und B-Lymphozyten erkennen nicht ganze Erreger, sondern nur bestimmte Strukturen auf diesen Erregern – sogenannte Antigene. Bei Kontakt mit diesen Antigenen kommt es zum einen zu einer starken Vermehrung dieser Zellen und zum anderen zur Entwicklung von spezifischen Funktionen, die gegen den Erreger wirken, der das Antigen trägt (wie z. B. die Zelltötung oder Antikörperproduktion). Antigene sind also Stoffe, die den Körper zur Produktion von Abwehrzellen und Antikörpern anregen.

- **Thrombozyten (= Blutplättchen)**

Diese sind die kleinsten der zellulären Elemente des Blutes (ca. 3 - 5 µm) und sind eigentlich nur Zellteile. Sie werden im Knochenmark gebildet und sind Abschnürungen von Megakaryozyten, die ins Blut abgegeben werden. Thrombozyten besitzen Gerinnungsfaktoren, die wichtig für die Blutgerinnung sind. Bei Verletzung von Blutgefäßen kommt es zusätzlich zur Anheftung (Adhäsion) und Verklumpung (Aggregation), die zur Blutgerinnung, Pfropfbildung und dem Verschluss des beschädigten Blutgefäßes führen.

5.2.1.2 Blutstillung

Zum Verschluss verletzter Blutgefäße kommt es durch

- Gefäßverengung
- Bildung eines Thrombus (Pfropfen),
 - o der aus verklumpten Thrombozyten und
 - o durch Vernetzung von bestimmten Proteinen gebildet wird.

Dieser Vorgang wird als Blutgerinnung bezeichnet. Ein Großteil dieser Proteine wird in der Leber gebildet. Bei einer Gefäßverletzung wird ihre Vernetzung aktiviert. Gemeinsam mit Thrombozyten wird das Blutgefäß verschlossen.

Blutgerinnungshemmende Stoffe:

- werden bei Blutentnahme für Untersuchungen dem Blut beigesetzt, um eine Verklumpung der Blutzellen zu verhindern.

- o Heparin:

Diese Substanz hemmt die Vernetzung der Gerinnungsproteine.

- o Zitrat, Oxalat, EDTA:

Diese Substanzen binden Kalziumionen. Da für die Aktivierung der Vernetzung von Proteinen Kalziumionen benötigt werden, stehen diese dann für die Gerinnung nicht mehr zur Verfügung; die Blutgerinnung wird dadurch gehemmt.

- Bei Patienten bewirken sog. Blutverdünner eine verminderte Gerinnungsneigung.
- Gifte verhindern die Blutgerinnung im Körper.
 - o Vitamin-K-Antagonisten: Diese Substanzen sind Gegenspieler des Vitamin K und hemmen die Bildung von Gerinnungsfaktoren in der Leber. Sie bewirken spontane Blutungen aus Kapillaren und führen zu innerer Verblutung.

5.3 LYMPHATISCHES SYSTEM

Ein weiterer Teil des Immunsystems ist das lymphatische System. Dieses besteht aus den lymphatischen Organen sowie dem Lymphgefäßsystem. Letzteres steht in enger Beziehung mit dem Blutkreislauf und ist auch wichtig für den Flüssigkeitstransport.

Es handelt sich beim Lymphgefäßsystem jedoch nicht um ein Kreislaufsystem. In der Peripherie sammelt sich Gewebsflüssigkeit, die in Lymphgefäße einfließen kann. Man bezeichnet diese Flüssigkeit dann als Lymphflüssigkeit (=Lymphe). Durch diese Lymphgefäße gelangt die Lymphe und darin enthaltene Keime und Immunzellen zu Lymphknoten. Hier sitzen T- und B-Zellen, die die Lymphe nach ihren spezifischen Antigenen durchsuchen. T-Zellen erkennen diese Antigene, die von antigenpräsentierenden Zellen (z. B. dendritischen Zellen) präsentiert werden. B-Zellen können ihr spezifisches Antigen direkt in der Lymphflüssigkeit finden. Die Lymphknoten bilden also eine Art von Filterstationen der Lymphgefäße. Nach

dieser Filtration führen die Lymphgefäße weiter und münden in den venösen Blutkreislauf. Die Lymphflüssigkeit bildet also das Zwischenglied zwischen Gewebsflüssigkeit und Blut. Lymphknoten befinden sich überall im Körper, außer im zentralen Nervensystem. Sie treten gehäuft im Halsbereich, den Achseln, in der Leistengegend sowie im Brust- und Bauchraum auf. Neben der Filtrationsaufgabe sind die lymphatischen Organe wesentlich für die Entwicklung und Vermehrung von Lymphozyten (siehe 4.2.1.) verantwortlich.

Gehirn und Rückenmark sind zu deren besonderem Schutz vom lymphatischen System ausgespart. Es besteht jedoch eine Verbindung zum gehirneigenen Entsorgungssystem.

5.4 ABWEHR VON KRANKHEITSERREGERN

Wir unterscheiden zwei Abwehrmechanismen: die angeborene Abwehr, die weniger spezifisch arbeitet, und die erworbene, anpassungsfähige (adaptive) Abwehr, die hochspezifisch an einen bestimmten Erreger angepasst ist. Beide untergliedern sich jeweils zusätzlich in zelluläre und humorale (= in Körperflüssigkeiten lösliche Komponenten) Bestandteile. Die Gesamtheit der Abwehrreaktionen gegen einen Krankheitserreger wird als Immunantwort bezeichnet. Körperfremde Stoffe, die eine Immunantwort auslösen können, werden als Antigene bezeichnet.

5.4.1 Angeborene Abwehr

Die angeborene Abwehr besteht aus dem Zusammenspiel der zellulären und humoralen Komponenten. Sie richtet sich gegen jeden eindringenden Erreger. Die angeborene Abwehr muss dabei nicht passgenau auf den Erreger abgestimmt sein. Die ausgelöste Immunantwort kann jedoch für eine bestimmte Gruppe von Erregern (z. B. Würmer) spezifisch sein. Generell gilt, dass Eindringlinge, die durch die Schutzbarrieren (Haut, Schleimhaut) ins Gewebe gelangen, von den dort befindlichen Makrophagen und dendritischen Zellen über Rezeptoren auf der Zelloberfläche erkannt werden. Diese Rezeptoren erkennen Strukturen, die auf bestimmten Erregergruppen vorkommen: z. B. die Struktur „Lipopolysaccharid“ (oder LPS) auf sogenannten gramnegativen Bakterien; Makrophagen und dendritische Zellen tragen Rezeptoren, die dieses LPS erkennen. Durch diese Rezeptoren werden Makrophagen und dendritische Zellen von gramnegativen Bakterien aktiviert. Sie setzen dann Botenstoffe frei, was eine weitere Einwanderung von Makrophagen und Granulozyten ins infizierte Gewebe bewirkt. Diese beginnen dann mit der Phagozytose. Die Wände der Blutgefäße werden durch die Botenstoffe aktiviert, klebriger und durchlässiger für Flüssigkeiten, Proteine und andere Immunzellen. Hierdurch kommt es zu den typischen Entzündungszeichen wie Schwellung, Rötung, Wärme und Schmerz. Die angeborene Abwehr reagiert sehr rasch auf Eindringlinge. Daher bildet sie die erste Phase der Abwehr einer Infektion, aber sie kann (im Gegensatz zur adaptiven Abwehr) kein immunologisches Gedächtnis ausbilden. Im Allgemeinen arbeiten im weiteren Verlauf der Immunreaktion die angeborene und adaptive Abwehr zusammen.

Zellulär

Die angeborene zelluläre Abwehr erfolgt hauptsächlich durch Phagozytose (aktive Aufnahme von Partikeln). Folgende Blutzellen sind zur Phagozytose fähig bzw. daran beteiligt: Granulozyten, Monozyten/Makrophagen und dendritische Zellen. Monozyten/Makrophagen und dendritische Zellen präsentieren Teile der aufgenommenen Erreger an die Zellen der adaptiven Abwehr. Daher werden sie auch als antigenpräsentierende Zellen bezeichnet. Sie können durch diese Antigenpräsentation die spezifische adaptive Immunantwort aktivieren. Zusätzlich zu diesen Phagozyten gehören NK-Zellen (natürliche Killer) zur angeborenen Abwehr. NK-Zellen erkennen, ob Körperzellen von Erregern befallen oder anderweitig verändert sind und töten diese ab.

Humoral

Die angeborene humorale Abwehr beinhaltet u. a. verschiedene Plasmaproteine, die die Zellwand von Bakterien angreifen. So bereitet das bei der Komplementreaktion gebildete Eiweiß Opsonin die Bakterienoberfläche für die Phagozytose vor. Von Leukozyten werden Botenstoffe, die Zytokine (wie z. B. Interleukine), gebildet. Interleukine regen u. a. das Wachstum und die Vermehrung der Leukozyten an. Zudem bewirken sie Entzündungsreaktionen im Organismus. Interleukine dienen auch der Regulation des Immunsystems.

5.4.2 Adaptive Abwehr

Die adaptive (erworbene) Immunantwort ist speziell auf den jeweiligen Eindringling zugeschnitten und wird aktiviert, wenn ein Pathogen die angeborene Abwehr besonders stark herausgefordert hat. Die Träger der erworbenen Immunantwort sind die T- und B-Lymphozyten. Diese reagieren hochspezifisch auf einen eindringenden Erreger. Die angeborene Immunantwort ist maßgeblich an der Aktivierung der adaptiven Immunabwehr beteiligt. Daher folgt die adaptive Immunabwehr zeitlich versetzt auf die angeborene Immunantwort; sie braucht auch länger (mehrere Tage) bis sie effektiv gegen Erreger vorgehen kann. Es kann länger als eine Woche dauern bis schützende Antikörper in ausreichender Menge vorhanden sind, um den Erreger zu neutralisieren und den Organismus zu schützen. Dieser Zeitraum wird von der angeborenen Abwehr überbrückt.

Die adaptive Abwehr erkennt spezifische Strukturen auf Erregern, entweder in freier Form, wie die B-Lymphozyten, oder als Teile des Erregers, die über MHC-Moleküle den T-Lymphozyten nach dem Schlüssel-Schloss-Prinzip präsentiert werden. Das bedeutet, dass eine adaptive Immunantwort hochspezifisch gegen bestimmte Erreger gerichtet ist. Wie die angeborene Immunantwort besitzt die adaptive Immunantwort sowohl humorale als auch zelluläre Komponenten.

Zelluläre adaptive Immunantwort

Die Zellen der adaptiven Immunabwehr (T- und B-Lymphozyten) werden im Knochenmark gebildet. Diese vorerst inkompetenten Vorläuferzellen durchgehen einen Reifungsvorgang, der sie zu immunkompetenten Lymphozyten macht. Bei B-Lymphozyten findet dieser Reifungsvorgang im Knochenmark statt (oder bei Vögeln in der Bursa Fabricii, dem Namensgeber der B-Zellen). Die T-Lymphozyten vollenden ihre Reifung im Thymus (Bries). Dieses Organ gibt den T-Zellen ihren Namen. Nach Verlassen des Thymus durchkreisen T-Zellen den Körper über Blut und Lymphe. T-Lymphozyten können in zytolytische T-Lymphozyten und Helfer-T-Lymphozyten unterschieden werden. Beim ersten Antigenkontakt werden sie aktiviert. Die zytolytischen T-Lymphozyten können mit fast allen Körperzellen interagieren und z. B. virusinfizierte Körperzellen abtöten. Helfer-T-Lymphozyten sind wichtige Regulatoren und Stimulatoren der Immunantwort. Sie haben unterschiedliche Funktionen bei der Bekämpfung intrazellulärer und extrazellulärer Erreger sowie auch bei der Regulation, um eine überschießende oder andauernde Immunantwort zu verhindern. Dies geschieht hauptsächlich durch die Produktion bestimmter Zytokine. Ein Teil von ihnen stimuliert und aktiviert aber auch B-Lymphozyten und trägt dadurch essenziell zur Antikörperproduktion bei. Hierfür differenzieren sich die B-Lymphozyten zu Plasmazellen, die große Mengen an Antikörper produzieren und ins Blut abgeben. Die Produktion von Antikörpern wird als humorale adaptive Immunantwort bezeichnet. Wurde der eingedrungene Erreger erfolgreich beseitigt, so wird der größte Anteil der bei der Abwehrreaktion gebildeten Zellen abgebaut. Ein Teil der T- und auch der B-Lymphozyten wird nach Beendigung einer Infektion zu Gedächtniszellen. Diese Gedächtnis T- und B-Lymphozyten sind sehr langlebige Zellen und ermöglichen bei einem zweiten Kontakt mit dem gleichen Antigen eine raschere und stärkere Reaktion. Dieser Mechanismus des "immunologischen Gedächtnisses" ist die Grundlage der aktiven Immunisierung (= Impfung).

Humorale adaptive Immunantwort

Wie die Zellen der angeborenen Immunantwort produzieren auch T- und B-Lymphozyten Zytokine, die die Immunreaktion regulieren. Diese Zytokine gehören zur humoralen Immunantwort. Neben den Zytokinen sind allerdings die von Plasmazellen produzierten Antikörper ein essenzieller Bestandteil der adaptiven humoralen Immunantwort. Wie oben erwähnt, entwickeln sich B-Zellen nach Aktivierung zu antikörperproduzierenden Plasmazellen. Diese Plasmazellen produzieren große Mengen an Antikörpern und geben diese an ihre Umgebung wie z. B. ins Blutplasma ab. Von dort werden die Antikörper durch den Körper transportiert, um spezifisch an entsprechende Erreger oder Toxine zu binden. Die Bindung der Antikörper ist hochspezifisch und kann Erreger für Phagozytose oder Neutralisation kennzeichnen. Durch Gedächtnis-B-Zellen und langlebende Plasmazellen erfolgt die Produktion dieser Antikörper über die Infektion hinaus und kann dadurch den Körper gegen zukünftige Infektionen durch diesen Erreger schützen.

5.4.3 Immunisierung bzw. Impfung (Schutz des Körpers vor Krankheitserregern)

Es wird zwischen einer aktiven und passiven Immunisierung unterschieden.

Aktive Immunisierung = Impfung

Bei einer aktiven Immunisierung wird ein sogenanntes Impfantigen verabreicht. Als Impfantigen können durch Abtötung inaktivierte Krankheitserreger, an Zellkulturen angepasste und dadurch abgeschwächte Krankheitserreger, Teile von Krankheitserregern oder dem Krankheitserreger sehr ähnliche apathogene (nicht krankheitsauslösende) Erreger (Viren, Bakterien, Pilze oder Parasiten) verwendet werden. In der Regel sollten nur gesunde Individuen aktiv immunisiert werden.

Bei einer weiteren Immunisierung entsteht durch das immunologische Gedächtnis eine verstärkte Immunantwort (= Boosterung), die sich u. a. in einer höheren Antikörperproduktion widerspiegelt. Bei einem erneuten Kontakt mit diesem Krankheitserreger reagieren die spezifischen Gedächtniszellen sehr rasch, sodass die Infektion in der Frühphase („im Keim“) erstickt wird und dann milder oder symptomlos verläuft.

Aufgrund der längeren Aktivierungsphase der adaptiven Immunabwehr ist der Impfschutz erst nach 2 - 3 Wochen voll wirksam.

Passive Immunisierung

Bei Infektionsverdacht oder auch vorbeugend bei voraussichtlichem Kontakt mit einem Erreger oder, wenn kurzfristig immunologischer Schutz nötig ist, werden dem Organismus Antikörper (Immuno-globuline) gegen diesen Erreger injiziert. Dieser Schutz nimmt allerdings nach wenigen Wochen (2-4) wieder ab. Ein dauerhafter Schutz wird nur bei aktiver Immunisierung erreicht.

Allergie

Unter einer Allergie versteht man eine Immunreaktion gegen unschädliche, meist überall vorhandene Strukturen (Allergene, wie z. B. Pollen), bei der eine besondere Klasse von Antikörpern gebildet wird. Im alltäglichen Sprachgebrauch versteht man unter „Allergie“ meist eine unnatürliche Überreaktion des Immunsystems auf normale Umgebungsantigene.

Wir können dabei zwei Phasen unterscheiden:

- Sensibilisierung: Der Organismus kommt in Kontakt mit einem neuen Antigen. Der Erst-kontakt löst eine Immunantwort aus, bei der Gedächtniszellen gebildet werden.
- Krankheitssymptome: Diese Gedächtniszellen bzw. Antikörper verursachen dann bei jedem weiteren Kontakt (der auch viel später stattfinden kann) eine heftige Reaktion.

Je nach Art dieser Reaktion unterscheidet man:

o Den Soforttyp der allergischen Reaktion: Dieser tritt sehr rasch ein; dabei werden Botenstoffe freigesetzt, die Blutgefäßwände schädigen und Juckreiz und Schwellung auslösen können (z. B.: Bienenstichallergie, Asthma, Blasenbildung auf der Haut, anaphylaktischer Schock). Die Auslöser dieser Allergieform sind eine besondere Klasse von Antikörpern.

o Den verzögerten Typ der allergischen Reaktion: In diesem Fall dauert das Anlaufen der Reaktion etwas länger (bis zu Tagen); T-Lymphozyten wandern dabei zum Antigen ins Gewebe und das umliegende Gewebe wird zum Teil zerstört. Es treten z. B. Ausschläge auf.

5.5 BLUTGRUPPEN

Erythrozyten (rote Blutkörperchen) aller Säugetiere tragen an ihrer Oberfläche unterschiedliche Moleküle (Antigene), deren Struktur vererbbar ist. Am bekanntesten ist das menschliche AB0-Blutgruppensystem: Erythrozyten mancher Menschen tragen keine dieser Moleküle (Blutgruppe 0), manche das Molekül A (Blutgruppe A) oder B (Blutgruppe B), oder beide Moleküle (Blutgruppe AB). Neben diesem AB0-System gibt es auch noch eine Reihe anderer Systeme. Allerdings unterscheidet sich das AB0-System des Menschen von allen anderen Blutgruppensystemen bei Säugern. Während die meisten Säuger (inklusive Haussäugetiere) keine oder nur eine geringere Konzentration von präformierten Antikörpern gegen diese Oberflächenstrukturen auf Erythrozyten besitzen, entstehen beim Menschen im Laufe der ersten Lebensmonate Antikörper gegen diese A/B Moleküle, die der betreffende Mensch nicht besitzt.

Antigen 0	→	Antikörper gegen A und B	kann allen spenden
Antigen A	→	Antikörper gegen B	Spender für A
Antigen B	→	Antikörper gegen A	Spender für B
Antigen AB	→	keine Antikörper	kann von allen erhalten

Tabelle 5.1: Antigene und Antikörper der menschlichen Blutgruppen

Diese Eigenschaft ist wesentlich bei Bluttransfusionen: Wird das Spenderblut nicht mit dem Empfänger abgestimmt, können Antikörper des Empfängers mit diesen A/B-Molekülen reagieren und zum Verklumpen der Erythrozyten führen – es kommt zur Agglutination. Diese kann bei solch einer Bluttransfusion zu erheblichen Komplikationen bis zum Tod des Patienten führen. Da die im Spenderblut enthaltenen Antikörper vom Empfängerblut verdünnt werden, spielen sie meist nur eine geringe Rolle. Daher kann Blut der Blutgruppe 0 von Trägern jeder Blutgruppe empfangen werden (Universalspender). Die Blutgruppe AB kann wiederum jede Blutgruppe empfangen, da sie weder Antikörper gegen Blutgruppe A noch gegen B enthält (Universalempfänger).

6 Neurobiologie

Die Neurobiologie beschäftigt sich mit dem Aufbau des Nervensystems, die Neurophysiologie mit dessen Funktion. Das Nervensystem besteht aus drei Komponenten: Zentralnervensystem (ZNS), peripheres Nervensystem (PNS) sowie vegetatives Nervensystem.

Die Steuereinheit bildet das zentrale Nervensystem (ZNS). Dieses ist u. a. verantwortlich für die Kontrolle der Motorik, der Organfunktionen sowie des Schlaf-Wach-Rhythmus, die Verarbeitung eintreffender Informationen sowie für unsere Gefühle, Triebe und kognitiven Funktionen. Die über die Nerven im ZNS eintreffenden Informationen führen zur Wahrnehmung. Die verwendeten Botenstoffe heißen Neurotransmitter. Das ZNS besteht aus dem Gehirn, der Hypophyse (Hirnanhangsdrüse) und dem Rückenmark.

Alle Nervenfasern und -leitungen außerhalb des ZNS bilden das Periphere Nervensystem (PNS); darunter finden sich motorische, sensible und vegetative Nerven. Das somatische Nervensystem steuert die willkürlichen Akte. Das vegetative Nervensystem verhält sich autonom; es ist also der Willkür entzogen. Der Teil des vegetativen Nervensystems, der den Körper in erhöhte Leistungsbereitschaft versetzt, heißt Sympathikus. Antagonistisch dazu (also der Erregung entgegen) verhält sich der Parasympathikus. Die zugehörigen Botenstoffe sind Acetylcholin und Noradrenalin.

6.1 NERVENZELLEN (NEURONE)

Das Neuron, das die Grundeinheit des Nervensystems bildet, ist eine Nervenzelle mit ihren Fortsätzen. Ein Neuron besteht aus dem Zellleib mit dem Zellkern, zuführenden Dendriten und einem Axon [= eine begleitende Nervenfasern (= Neurit)]. Die Besonderheit der Nervenzellen im Gegensatz zu anderen Körperzellen ist, dass sie sehr leicht durch Reize chemischer, elektrischer oder mechanischer Natur erregbar sind. Je nach Aufbau unterscheidet man multipolare Neurone, wenn mehrere Dendriten zum Zellleib ziehen, sowie unipolare Neurone, wenn nur ein Fortsatz (Axon) entwickelt ist und pseudounipolare Neurone, bei denen die Anfangsabschnitte der beiden Fortsätze (Axon und Dendrit) verschmolzen sind.

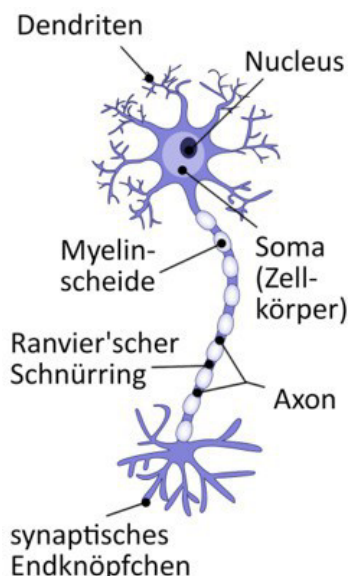


Abb 6.1: Schematische Zeichnung eines Neurons.

6.2 ARBEITSWEISE

6.2.1 Erregungsleitung

Die Möglichkeit einer Weiterleitung der Erregung beruht auf unterschiedlichen Verteilungen von elektrisch geladenen Molekülen (den Ionen) innerhalb und außerhalb der Zellmembran. Ein

Konzentrationsunterschied dieser Ionen wird durch die halbdurchlässige (semipermeable) Membran aktiv unter Verbrauch von Energie aufrechterhalten.

Diese unterschiedliche Verteilung von Na⁺-Ionen und K⁺-Ionen bedingt eine Ladungsdifferenz bzw. Spannung (= Membranruhepotential MRP), und wird durch die energieverbrauchende Na⁺/K⁺-Pumpe aufrechterhalten. Im Zellinneren befinden sich dabei K⁺-Ionen, die entsprechend dem Konzentrationsgefälle nach außen diffundieren würden und dabei negativ geladene Proteinionen, die nicht durch die semipermeable Membran mit durchgehen können, mitziehen. Diese Proteinionen lagern sich dabei innen an der Zellmembran an. Dadurch wird die Innenseite der Zellmembran gegenüber der Zellumgebung, in der sich vor allem positiv geladene Na⁺-Ionen befinden, die nicht in das Zellinnere diffundieren können und aktiv nach außen gepumpt werden, negativ geladen (ca. -70 mV). Bei Reizung der Nervenzelle wird die Membran durchlässig für die Na⁺-Ionen, sie strömen lawinenartig ein. Dadurch kehrt sich das Membranruhepotential um, es kommt zu einer Entladung (Depolarisation). Nun ist die Zellinnenseite positiv, die Zellaußenseite negativ geladen. Wenn man diese Potentialveränderungen mit einer Mikroelektrode an der Zelle ableitet, kann man diese Spannungsschwankungen als sogenanntes Aktionspotential aufzeichnen.

Durch die Depolarisation an einer Stelle der Nervenfasern beginnt nun zwischen erregter und der benachbarten unerregten Stelle ein Strom zu fließen, der dort wiederum eine Depolarisation hervorruft, sodass sich die Depolarisation nach beiden Seiten hin wie ein Zündfunke auf einer Zündschnur ausbreitet. Die depolarisierte Stelle wird danach durch den Ausstrom von K⁺-Ionen und den Rücktransport der Na⁺-Ionen nach außen wieder repolarisiert, das heißt das Ruhemembranpotential wird wiederhergestellt.

Eine Erregung verläuft nach dem sog. Alles-oder-Nichts-Gesetz: Sobald das Membranruhepotential unter einen bestimmten Wert gesunken ist, strömen die Na⁺-Ionen ein und die Depolarisation bzw. Erregung entsteht. Während der Depolarisation ist die Zelle refraktär. Dies bedeutet, dass die Zelle nicht erregbar ist, ehe nicht das Membranruhepotential durch eine Repolarisation wiederhergestellt wird.

Ein Anteil der Nervenfasern (Axone) des peripheren Nervensystems wird von einer Isolations-schicht, der Myelinscheide, die von Schwannschen Zellen gebildet wird, umgeben. Zwischen den Schwannschen Zellen, die sich um das Axon wickeln, befinden sich die Ranvierschen Schnürringe. Je nach Myelinausstattung unterscheidet man marklose, markarme und markreiche Nervenfasern. Bei markarmen Fasern bildet eine Zelle für mehrere Neurone eine Myelinscheide, bei markreichen nur für ein Neuron. Im ZNS bilden Gliazellen diese Isolations-schicht für die Neuronen. Die Erregungs-leitung an marklosen, nicht myelinisierten Nervenfasern läuft kontinuierlich und langsam ab. An

markhaltigen, myelinisierten Nervenfasern verläuft sie sprunghaft (saltatorisch) von Ranvierschem Schnürring zu Schnürring, und dadurch sehr schnell (bis zu 120 m/sec = 430 km/h).

6.2.2 Erregungsübertragung

Die Erregungsübertragung von einem Neuron auf das nächste erfolgt an Synapsen. Diese neuronalen Kontaktstellen bestehen aus praesynaptischer Membran, Synapsenspalt und post-synaptischer Membran. In der Praesynapse ist in kleinen Bläschen ein Überträgerstoff (Neurotransmitter) gespeichert. Der Inhalt dieser Bläschen wird, wenn eine Erregung am Nervenende ankommt, in den Synapsenspalt freigesetzt. Der Neurotransmitter diffundiert durch den Synapsenspalt an die postsynaptische Membran, wo er sich mit Strukturen dieser Membran, Rezeptoren, verbindet. Diese Bindung an Rezeptoren verändert die Membrandurchlässigkeit, die Membran wird für Na⁺-Ionen durchlässig, und das Folgeneuron wird damit erregt.

Verschiedenste Substanzen, die das nachfolgende Neuron erregen oder auch hemmen können, werden vom Organismus als Neurotransmitter verwendet. Beispiele sind: Acetylcholin, Noradrenalin, Adrenalin, Serotonin, GABA, etc. Damit die Synapse wieder funktionsfähig und das Folge-neuron nicht dauernd erregt wird, müssen diese Neurotransmitter schnell wieder aus dem Synapsenspalt entfernt werden. Dies geschieht durch Spaltung (wie z. B. Acetylcholin durch die Cholinesterase) oder Wiederaufnahme in die Präsynapse.

Für das Zustandekommen einer weitergeleiteten Erregung an einer Nervenzelle ist in den meisten Fällen entweder die rasche aufeinanderfolgende Erregung einer Synapse – die sogenannte zeitliche Summation – oder die gleichzeitige Erregung mehrerer Synapsen eines Neurons – die sogenannte räumliche Summation – erforderlich. Räumliche Summation bedeutet also, dass gleichzeitig aus verschiedenen Richtungen unterschwellige Erregungen auf ein Neuron eintreffen, im Neuron summiert werden können, und so zu einer einzelnen fortgeleiteten Erregung führen. Eine zeitliche Summation bedeutet, dass rasch hintereinander unterschwellige Erregungen aus ein und derselben Richtung auf ein Neuron eintreffen, sich

summieren können, und so zu einer fortgeleiteten Erregung führen. Grundlage für die räumliche Summation ist die Konvergenz. Konvergenz bedeutet, dass mehrere Neurone auf ein weiterführendes Neuron zusammentreffen. Im Gegensatz dazu steht die Divergenz, bei der sich die Erregungsbahnen wie das Geäst eines Baumes aufzweigen und dadurch mehrere Muskelfasern und einen ganzen Muskel erregen können.

6.2.3 Generatorpotential

In Sinneszellen wird bei Reizeinwirkung ein Membranpotential gebildet, dessen Größe direkt proportional zur Stärke des einwirkenden Reizes ist, das sogenannte Generatorpotential. Es wird dann je nach Größe dieses Generatorpotentials eine Serie von Aktionspotentialen fortgeleitet, deren Frequenz der Größe des Generatorpotentials entspricht. Es kann in Neuronen, da das Alles-oder-Nichts-Gesetz gilt, nicht die Stärke, sondern nur die Frequenz der Aktionspotentiale moduliert werden.

6.2.4 Hemmungsmechanismen im Nervensystem

Die Funktion des Nervensystems beruht auf einem ständigen Zusammenspiel von Hemmung und Erregung. Je nachdem, ob nun mehr hemmende oder mehr erregende Neurone auf ein weiterführendes Neuron einwirken, wird das Neuron erregt und es bildet sich ein Aktionspotential aus, oder das Neuron wird gehemmt und die Erregung nicht weitergeleitet.

6.2.5 Reflexe

Ein Reflex ist eine unwillkürliche Reaktion auf einen adäquaten Reiz, die immer in derselben Art und Weise abläuft und meist sinnvoll ist. Der Reflexbogen, das sind die Neurone, die dabei erregt werden, besteht aus einem Rezeptor, der den Reiz aufnimmt, einem afferenten Neuron, das die Erregung zum ZNS leitet, einer zentralen Umschaltstelle (Synapse), einem efferenten Neuron, das die Erregung zum Organ leitet, und einem Effektor, das ist meist ein Muskel, der die Reaktion ausführt. Beispiele wären Patellarreflex, der Pupillarreflex, der Kratzreflex, etc.

6.3 ANATOMIE DES ZENTRALNERVENSYSTEMS (BESTEHEND AUS GEHIRN UND RÜCKENMARK)

6.3.1 Gehirn

Das Gehirn liegt im Gehirnschädel. Es liegt nicht direkt am Knochen an, sondern zwischen Gehirn und Schädelknochen liegen die drei Hirnhäute. Überdies befindet sich zwischen innerer und äußerer Hirnhaut Flüssigkeit. Durch die Hirnhäute und die Flüssigkeit ist das Gehirn gut gegen mechanische Einflüsse von außen geschützt.

Gliederung des Gehirns:

- Endhirn
 - Großhirn (Cerebrum)
 - Riechhirn
- Stammhirn
 - Zwischenhirn: Dieses enthält den Hypothalamus, die Hypophyse, die Zirbeldrüse und den Thalamus.
 - Mittelhirn: Dieses enthält die Vierhügelplatte, die Crus cerebri.
 - Nachhirn: Dieses enthält das Kleinhirn (Cerebellum), den Trapezkörper und die Brücke.
 - verlängertes Rückenmark

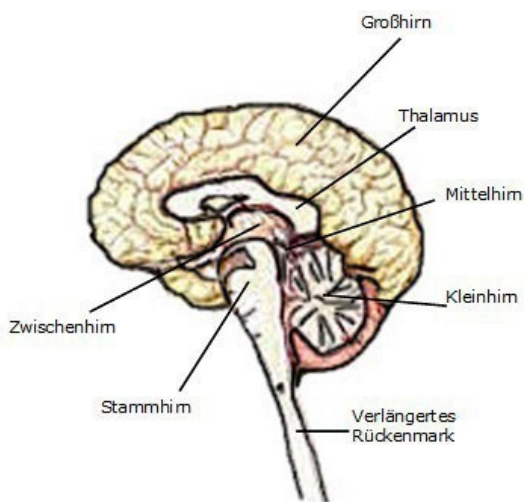


Abb. 6.2: Exemplarisch: Schematischer Aufbau des menschlichen Gehirns

Hohlraumsystem des Gehirns

Das Gehirn enthält ein Hohlraumsystem, das mit Gehirnrückenmarksflüssigkeit gefüllt ist. Dieses Hohlraumsystem besteht aus vier zusammenhängenden Ventrikeln (I, II, III, IV), deren Inhalt über den Gehirnrückenmarkskanal abfließt.

6.3.2 Funktionen des Gehirns

Das Stammhirn, das aus Zwischenhirn, Mittelhirn, Trapezkörper, Brücke und verlängertem Mark besteht, dient der Steuerung und Regelung lebenswichtiger Vorgänge. Es enthält unter anderem die Zentren für Kreislauf, Atmung, Ernähren, Verdauung und Brechen. Weiter ist es an der Ingangsetzung bestimmter Verhaltensabläufe, wie bei Durst, Hunger, Aggression, Flucht und Sexualität, beteiligt. Auch bildet es Hormone und regelt die Hormonproduktion in der Hirnanhangsdrüse (Hypophyse).

Kleinhirn

Das Kleinhirn dient der Bewegungskoordination. Die Funktion des Kleinhirns kann am besten durch die Ausfallserscheinungen, die bei seiner Schädigung beobachtet werden können, erklärt werden. Diese sind schwankender Gang und Schwanken im Stehen. Das Kleinhirn kontrolliert also die Bewegungen.

Großhirn

Das Großhirn dient der Verarbeitung von Informationen, die über Sinnesorgane und sensible Nervenfasern in das Gehirn gelangen. Diese Informationen werden gespeichert und bewirken momentan keine Reaktion des Organismus (Gedächtnis), oder sie werden gespeichert und der Mensch/das Tier reagiert sofort.

Die Veranlassung bestimmter Bewegungen geht vom Großhirn aus (motorische Cortex). Die Verarbeitung der von den Sinnesorganen kommenden Erregungen findet ebenfalls in jeweils bestimmten Cortexarealen statt (z. B. Sehrinde, Hörinde).

Eine Schädigung dieser Rindengebiete (wie z. B. bei Rindenblindheit, Rindentaubheit) führt zum Ausfall des Seh- bzw. Hörvermögens, obwohl das Sinnesorgan vollkommen intakt ist.

6.3.3 Rückenmark

Das Rückenmark liegt im Wirbelkanal und ist wie das Gehirn von Häuten umgeben. Es reicht vom Hinterhauptsloch bis zum Kreuzbein. Im Rückenmark liegt im Gegensatz zum Gehirn die graue Substanz (= grey matter; Nervenzellen) innen, die weiße (= white matter; Neuriten) außen. Zwischen zwei Wirbeln tritt ein Rückenmarksnervenpaar aus. Es führt segmental dorsal sensible Eingänge zum Rückenmark und ventral motorische Ausgänge vom Rückenmark in die Peripherie. Im Zentrum liegt der Rückenmarkskanal, der mit Gehirnrückenmarksflüssigkeit gefüllt ist.

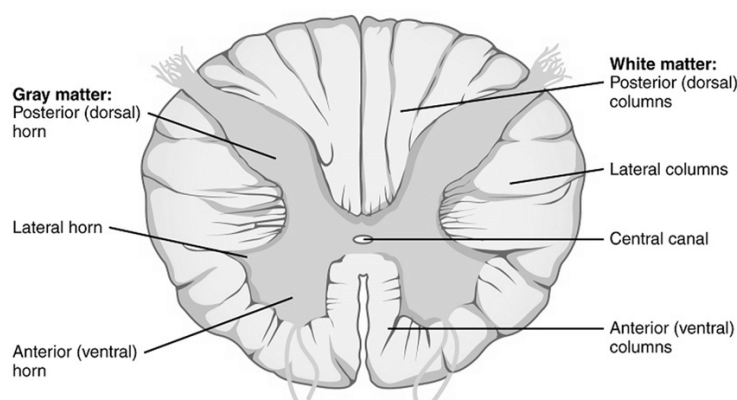


Abb. 6.3: Exemplarisch: Schematischer Aufbau des menschlichen Rückenmarks. White matter = Weiße Substanz; Gray matter = Graue Substanz; Central canal = Zentralkanal; Posterior horn = Hinterhorn; Lateral horn = Seitenhorn; Anterior horn = Vorderhorn; Posterior column = Dorsalstrang; Lateral column = Seitenstrang; Anterior column = Ventralstrang

Aufgabe des Rückenmarks besteht in der Leitung von Erregungen zum Gehirn sowie in der Leitung von Erregungen vom Gehirn in die Peripherie. Bei Durchtrennung des Rückenmarks kommt es daher zu einem Verlust der Empfindlichkeit gegenüber Reizen und zum Verlust der Bewegungsfähigkeit (Motorik) unterhalb der Durchtrennungsstelle (Querschnittslähmung). Im Bereich der Schulterextremität vereinigen sich die Rückenmarksnerven des Hals- und Brustmarks zum Armgeflecht. Aus diesem gehen die Nerven hervor, die die Vorderextremität versorgen. Im Bereich der Hinterextremität treten die Nerven, die die Hinterextremität versorgen, aus dem Lendenwirbelmark aus. Der wichtigste Nerv der Hinterextremität ist der N. ischiaticus.

6.3.4 Funktionen des Rückenmarks

Diese umfassen:

- Leitung von afferenten (sensiblen) und efferenten (motorischen) Erregungen
- Verschaltung von sensiblen mit motorischen Neuronen zur Auslösung von Reflexen [Partellar-(=Kniesehnen)reflex, Defäkationsreflex, Miktionsreflex...]

Bei Verletzungen des Rückenmarks kommt es zum Ausfall der Empfindungen und der Motorik unterhalb der verletzten Rückenmarksstelle (Querschnittslähmung).

6.4 SINNESPHYSIOLOGIE

Die Sinnesphysiologie befasst sich mit den Organen, die Reize aus der Außenwelt des Organismus aufnehmen (Sinnesorgane) und sie über Nervenimpulse als Informationen für den Organismus an das Zentralnervensystem weitergeben. Wichtige Sinne sind Gesichts-, Gehör-, Geruchs-, Geschmacks-, Tast-, Schmerz-, Temperatur- und Gleichgewichtssinn.

6.4.1 Gesichtssinn

Der Gesichtssinn dient der Aufnahme von elektromagnetischen Wellen mit einer Wellenlänge von 400 - 800 nm, die vom Auge gesehen werden. Das Auge ist ein kugelförmiges Gebilde, das aus drei Schichten aufgebaut ist.

Die äußerste Schicht besteht aus der Lederhaut, einer derben und bindegewebigen Hülle des Auges, die am vorderen Augenpol in die Hornhaut übergeht. Die Hornhaut ist lichtdurchlässig. Die Durchsichtigkeit der Hornhaut ist allerdings stark von ihrem Flüssigkeitsgehalt abhängig. Daher kommt es nach dem Tode durch Austrocknung wegen fehlender Tränensekretion zum sogenannten Brechen der Augen. Die Hornhaut ist nicht durchblutet, nur bei Verletzungen kommt es zum Ein-sprossen von Gefäßen. Die Ernährung der Hornhaut erfolgt durch das Kammerwasser der vorderen Augenkammer.

Die mittlere Schicht ist die Aderhaut, die sehr gefäßreich ist. Diese Schicht enthält beim Fleisch-fresser, Wiederkäuer und Pferd eine Pigmentschicht, das einfallende Lichtstrahlen reflektiert und dem Dämmerungssehen dient. Die Aderhaut geht am vorderen Augenpol in die Regenbogenhaut (Iris) und den Ziliarkörper, an dem die Linse befestigt ist, über. Die Iris bildet das Sehloch (Pupille), und besteht unter anderem aus glatten Muskelzellen, die im Sinne ihrer Funktion als Blende die Pupille verengen oder erweitern können. Der Ziliarkörper kann durch Kontraktion die Krümmung der Linse und damit ihre Brechkraft verändern. Dadurch kann sich das Auge auf Punkte in verschiedener Entfernung einstellen (akkommodieren). Der Ziliarkörper ist mit Zilien besetzt und bildet das Kammerwasser. Die Linse hat einen faserigen Aufbau und ist elastisch. Sie ist mit den Zonulafasern am Ziliarkörper befestigt.

Die innere Schicht bildet die Netzhaut (Retina), die Sinneszellen für die Aufnahme von Licht sowie ableitende Nervenfasern besitzt. Diese Sinneszellen, die Stäbchenzellen und Zapfenzellen, reagieren auf Lichteinfall und senden daraufhin Impulse an das ZNS. Im Inneren des Auges befindet sich der Glaskörper,

der lichtdurchlässig ist und den Augendruck aufrechterhält.

Akkommodation

Bei der Akkommodation werden die Linsenkrümmung und damit die Brechkraft der Linse verändert. Zweck der Akkommodation ist, ein scharfes und reelles Bild auf der Netzhaut am Gelben Fleck (= Bereich des schärfsten Sehens) zu erzeugen. Durch die Kontraktion des Ziliarmuskels wird der Kreisdurchmesser, den der Ziliarmuskel bildet, verkleinert. Dadurch werden die Zonulafasern, an denen die Linse befestigt ist, entspannt und die Linse nimmt aufgrund ihrer Elastizität ihre Eigengestalt mit starker Krümmung an. Bei einer Entspannung des Ziliarmuskels nimmt hingegen der Kreisdurchmesser zu, die Zonulafasern werden gespannt und die Linse wird flacher. Bei Gegenständen, die in einer Entfernung über 5 m liegen, muss das Auge nicht akkommodieren, der Ciliarmuskel ist entspannt und die Linse flach. Für Gegenstände, die näher als 5 m liegen, muss das Auge akkommodieren, der Ziliarmuskel kontrahiert sich und die Linse wird rund.

Pupillenreflex

Die Erweiterung und Verengung der Pupille, die durch die Irismuskulatur bewirkt und durch das vegetative Nervensystem gesteuert wird, dient der Regelung der ins Auge einfallenden Lichtmenge. Die Pupille wirkt als Blende, sie verengt sich bei großer Lichtmenge und erweitert sich bei geringer Lichtmenge. Zusätzlich verengt sich die Pupille zur Verbesserung der Tiefenschärfe beim Betrachten naher Gegenstände.

Hell-Dunkeladaption

Bei Verminderung der Lichtmenge erweitert sich die Pupille. Außerdem übernehmen die Stäbchen-zellen, die für das Schwarz-Weiß-Sehen zuständig und lichtempfindlicher sind, die Sehfunktion. Dadurch können in der Dämmerung keine Farben, sondern nur Grautöne gesehen werden.

Da sich beim Gelben Fleck fast nur Zapfen- und kaum Stäbchenzellen befinden, ist die Sehschärfe beim Dämmerungssehen geringer als beim Tagessehen. Beim Eintreten in einen dunklen Raum werden zum Erreichen der Anpassung (Adaption) an die Dunkelheit mehrere Minuten benötigt, da sich auch die Lage der Sehzellen zueinander verändert. Sie schieben sich dem Licht entgegen. In den Stäbchenzellen wird Rhodopsin (Sehpurpur) zum Sehen verwendet. Diese Substanz wird aus Vitamin A synthetisiert, und bei Auftreffen eines Lichtstrahles gespalten. Durch diese Spaltung entsteht eine Potentialveränderung, die an das Gehirn weitergeleitet wird.

Fleischfresser, Pferd und Rind besitzen für das Dämmerungssehen eine besondere Schicht in der Aderhaut, an der das einfallende Licht reflektiert wird, sodass es noch einmal durch die Netzhaut durchtritt und damit besser fürs Sehen genützt wird.

Farbsehen

Das Farbsehen erfolgt durch die Zapfenzellen, die besonders an der Stelle des schärfsten Sehens konzentriert sind. Es gibt unterschiedliche Zapfenzellen, die für die verschiedenen Frequenz-bereiche des Lichts zuständig sind.

Skotom

Der blinde Fleck (physiologisches Skotom) ist jene Stelle der Netzhaut, an der der Sehnerv austritt und an der daher nichts gesehen werden kann. Beim zweiäugigen (binokularen Sehen) wird er nicht wahrgenommen, da das zweite Auge die nicht gesehene Stelle ergänzt und das Gehirn das Gesichtsfeld durch Erfahrung zusammensetzt. Pathologische Skotome, das sind durch Krankheiten (z. B. Netzhautablösung) entstandene blinde Flecken, kann man mit einer Gesichtsfeldbestimmung bzw. einem Wattlebauschtest nachweisen.

Räumliches Sehen

Das räumliche Sehen von Gegenständen wird durch das binokulare Sehen ermöglicht. Entfernungen können dabei durch die relative Lage der Netzhautbildchen zueinander abgeschätzt werden. Bei den Haustieren ist der binokulare Sehbereich je nach Tierart unterschiedlich entwickelt, bei Jägern (wie z. B. Fleischfressern) stärker, bei Fluchttieren (wie z. B. Pferd oder Rind) weniger. Teilweise entstehen auch durch die Stellung der Augen "blinde" Zonen.

6.4.2 Gehörsinn

Der Gehörsinn beruht auf Mechanorezeptoren, die darauf spezialisiert sind, in der Luft sich ausbreitende periodische Druckschwankungen aufzunehmen. Den Bereich, auf den das menschliche Ohr anspricht (16 - 20000 Herz), nennt man Schall, darüber liegende Frequenzen bezeichnet man als Ultraschall. Tiere können höhere Frequenzen (über 60000 Herz) als der Mensch wahrnehmen. Das Ohr besteht aus drei Abschnitten (äußeres Ohr, Mittel- und Innenohr), wobei das äußere Ohr und das Mittelohr vor allem Leitungsfunktionen besitzen.

- **Äußeres Ohr**

Dieses besteht aus Ohrmuschel und äußerem Gehörgang. Es leitet den Schall an das Trommelfell.

- **Mittelohr**

Es liegt in der Paukenhöhle und ist nach außen durch das Trommelfell, eine schalltrichterähnlich geformte Membran, abgeschlossen. Am Trommelfell setzen Gehörknöchelchen, das sind Hammer, Amboss und Steigbügel, an, die den Schall vom Trommelfell auf die Flüssigkeit im Innenohr übertragen und ca. 20 x verstärken. Die Steigbügelplatte steckt im ovalen Fenster des Innenohres, kann sich darin kolbenartig bewegen und überträgt die Druckschwankungen auf das Innenohr.

- **Innenohr**

Dieses besteht aus dem Schneckengang, der durch häutige Hohlgebilde in drei Gänge geteilt ist, die mit Flüssigkeit gefüllt sind. Der mittlere Gang beherbergt die Schicht der Sinneszellen für das Hören, das Corti-Organ. Dieses besetzt die Basilarmembran, besteht aus Stütz- und Sinneszellen und wird von einer Deckschicht bedeckt. In diese hinein ragen die Härchen der Sinneszellen. Die Basilarmembran besitzt unterschiedliche Breite und Steifigkeit, wodurch sich unterschiedliche Resonanzfrequenzen ergeben. Beim Hören des Schalls entstehen Druckdifferenzen zwischen den Gängen, die je nach Frequenz weiter an der Basis oder weiter zur Spitze der Schnecke die Membran zum Schwingen anregen (Funktion eines Frequenzanalysators). Durch das Schwingen des Corti-Organ werden die Härchen der Sinneszellen mechanisch gereizt, und Erregungen, die zum Gehirn weitergeleitet werden, entstehen = Hören.

6.4.3 Geruchssinn

Das Riechorgan liegt in der Nasenhöhle und besteht aus der Riechschleimhaut und den Sinneszellen. Die Größe der Riechschleimhaut ist bei den Tierarten je nach Stärke des Geruchssinnes unterschiedlich: z. B. Schäferhund 150 cm², Dackel 75 cm², Mensch 5 cm². Es besteht ein Unterschied zwischen Empfindungsschwelle, wenn etwas gerochen wird, und Erkennungsschwelle, wenn ein Geruch erkannt wird. Der Geruchssinn passt sich der Umgebung an (= Adaption), ein längeres Einwirken desselben Geruchs wird nicht mehr wahrgenommen. Man stellt sich den Riechvorgang über eine Art Schlüssel-Schloss-Prinzip vor. Das bedeutet, dass die Riechstoffe (Schlüssel) mit formtionsmäßig passenden Rezeptoren (Schloss) der Sinneszellmembran verbinden, und dadurch eine Erregung auslösen. Eine Richtungsfeststellung des Geruchs ist bei Tieren durch den feuchten Nasenspiegel möglich.

6.4.4 Geschmackssinn

Die Sinneszellen für den Geschmackssinn liegen in Geschmacksknospen der Mundhöhle, besonders der Zunge. Diese Geschmacksknospen sind mit Spüldrüsen ausgestattet. Menschen besitzen z. B. ca. 9000, Schwein und Ziege ca. 15000, Kaninchen 17000, Katzen 500 und Enten 200 solcher Geschmacksknospen. Es können die Geschmacksarten süß, umami, sauer, salzig und bitter unterschieden werden. Bei Geschmacksempfindungen ist auch der Geruchssinn beteiligt. Den Schmeckvorgang stellt man sich ähnlich wie den Riechvorgang vor.

6.4.5 Tastsinn

Die Rezeptoren für den Tastsinn liegen in der Haut und sind teilweise, wie die Sinneshaare der Katze, an Haare angelagert. Sie reagieren auf Druck, Berührung und Vibration. Bei mechanischer Einwirkung auf die Haut werden durch Veränderungen des Oberflächenpotentials Impulse an das ZNS weitergeleitet.

6.4.6 Schmerzsin

Durch mechanische, thermische, elektrische oder chemische Einwirkungen kommt es zur Zerstörung von Zellen. Dabei werden Substanzen frei, die Schmerzrezeptoren (z. B. freie Nervenendigungen) erregen. Je

nach Leitungsgeschwindigkeit der ableitenden Nervenfasern unterscheidet man zwischen hellem, stechendem und dumpfem Schmerz. Die Funktion des Schmerzes ist der Schutz des Organismus.

6.4.7 Temperatursinn

Der Temperatursinn beruht auf Thermorezeptoren, die in der Haut liegen. Man unterscheidet dabei Kaltrezeptoren, die auf Temperaturen zwischen 25° und 35 °C maximal ansprechen, und Warmrezeptoren, die auf Temperaturen zwischen 38° und 43 °C maximal ansprechen. Die Heißempfindung wird durch gleichzeitige Erregung der Hitzerezeptoren (45° - 50 °C) und der Schmerzrezeptoren hervorgerufen.

6.4.8 Gleichgewichtssinn

Der Gleichgewichtssinn liegt neben dem Innenohr im Felsenbein. Er spricht auf mechanische Kräfte wie Schwerkraft und Winkelbeschleunigung an, die auf den Organismus einwirken. Er besteht aus den Bogengängen und anschließenden Höhlen, die mit Flüssigkeit gefüllt sind. Bei Drehungen des Körpers wird die Flüssigkeit in den senkrecht zueinanderstehenden drei Bogengängen beschleunigt und bewegt dadurch Sinneshärchen. Für die Schwerkraft liegen in den Höhlen Rezeptorenfelder, die zueinander senkrecht gestellt sind und auf denen kleine schwerere Teilchen (Steinchen) liegen. Durch die Lage des Organismus im Raum drücken diese Teilchen jeweils auf verschiedene Stellen der Rezeptorenfelder und geben damit dem ZNS Auskunft über die Lage des Körpers im Raum.

7 Ethik

Ethik ist ein Teilbereich der Philosophie, der sich mit moralischem Handeln befasst. Die Grundfrage der Ethik wird – in Anlehnung an Immanuel Kant – häufig mit „Was soll ich tun?“ formuliert. Damit sind weder technisch-funktionale Fragen gemeint (also nicht: „Welches Mittel X muss ich einsetzen, um Ziel Y zu erreichen?“) noch Fragen persönlicher Vorlieben (also beispielsweise nicht: „Was soll ich tun, wenn mir langweilig ist?“). Vielmehr geht es darum, wie man in moralisch relevanten Situationen handeln soll: Was ist moralisch richtig? Was ist moralisch falsch? Ist ein gesetztes Ziel überhaupt moralisch erstrebenswert? Diese Fragen sollen in ethischen Reflexionen nicht nur beantwortet werden – die Antworten sollen auch begründet sein. Zwar kann von Ethik dabei nicht derselbe wissenschaftliche Exaktheitsgrad erwartet werden wie von den Naturwissenschaften, dennoch streben ethische Diskussionen danach, den methodischen Idealen der Rationalität und Kohärenz gerecht zu werden.

An dieser Stelle sind drei verbreitete Missverständnisse zu vermeiden: Erstens ist Ethik nicht ausschließlich eine Angelegenheit der akademischen Philosophie. Zwar stellt die Philosophie systematische Ansätze, Begriffe und Methoden zur Verfügung, moralische Fragen betreffen jedoch alle Menschen, sowohl im privaten Alltag als auch im beruflichen Handeln – insofern sind alle Menschen dazu aufgerufen, ihr Handeln ethisch zu reflektieren. Zweitens greift das Argument „Wozu Ethik? Wir haben doch ohnehin Gesetze!“ zu kurz. Nicht alle moralisch relevanten Fragestellungen sind juristisch erfasst oder klar geregelt. Darüber hinaus reicht es nicht aus, sich allein auf bestehende Gesetze zu stützen; vielmehr müssen diese aus ethischer Perspektive kritisch reflektiert werden, um ihre moralische Tragfähigkeit zu beurteilen und gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Ähnliches gilt – drittens – für das Argument „Wozu Ethik? Moralische Fragen soll jeder für sich selbst mit dem eigenen Gewissen klären.“ Bei moralisch relevanten und gesellschaftlich bedeutsamen Fragen reicht eine rein subjektive Bezugnahme nicht aus, da hier die Notwendigkeit besteht, begründbare Positionen zu entwickeln und einen nachvollziehbaren Konsens anzustreben. In der Philosophie hat sich vor diesem Hintergrund eine begriffliche Unterscheidung zwischen „Moral“ und „Ethik“ etabliert: Moral sind all jene Regeln, die sich im Zusammenleben bewährt haben, all jene Dinge, die wir von unserer Familie und im gemeinschaftlichen Zusammenleben mit auf den Weg bekommen haben; so auch die Intuition, „das Gewissen“, das Bauchgefühl, das wir in uns haben, wenn wir vor Entscheidungen stehen. Mit dieser „Moral“ regeln wir einen Großteil der Handlungen in unserem Alltag, aber wir kommen auch in Situationen, wo diese Moral fragwürdig wird. Ethik kann demnach kurz wie folgt definiert werden: Ethik ist die strukturierte Reflexion über Moral und moralische Probleme.

In den vergangenen Jahrzehnten entwickelten sich verstärkt Formen der sogenannten „angewandten Ethik“. Sie fokussieren auf einen bestimmten Lebens- oder Arbeitsbereich. Auch die Tierethik wird häufig der angewandten Ethik zugerechnet, insofern sie sich mit der Frage beschäftigt, welche moralischen Pflichten Menschen gegenüber Tieren haben. Diese Frage stellt sich dabei in verschiedenen Bereichen, etwa in der Forschung, in der Veterinärmedizin, in der Haltung von domestizierten Tieren (z. B. landwirtschaftlich genutzten Tieren, Heimtieren) oder auch im Umgang mit Wildtieren. Hierbei existieren unterschiedliche Positionen. Zwei sollen exemplarisch genannt werden: Der sogenannte Anthropozentrismus (gr. „anthropos“ = Mensch) spricht nur jenen Wesen einen moralischen Eigenwert zu, die über Vernunft, Autonomie, und Rationalität verfügen. Da Tieren diese Eigenschaften in der Regel abgesprochen werden, spielen sie in ethischen Überlegungen des Anthropozentrismus keine unmittelbare Rolle. Ein beispielhafter Vertreter einer anthropozentrischen Ethik ist Immanuel Kant. Im Grunde betrachtet der Anthropozentrismus Tiere primär als Mittel für menschliche Zwecke. Im Gegensatz dazu steht der sogenannte Pathozentrismus (gr. „páthos“ = Schmerz, Leiden). Er richtet den Fokus nicht auf etwaige Unterschiede zwischen Mensch und Tier, sondern auf eine zentrale Gemeinsamkeit: die Fähigkeit zu leiden bzw. zu empfinden. In der Position des Pathozentrismus werden Tiere um ihrer selbst willen in ethischen Reflexionen berücksichtigt, insofern sie empfindungsfähige Wesen sind. Der Mensch darf demnach nicht allein nach instrumentellen Überlegungen über Tiere verfügen, sondern ist verpflichtet, ihr Leid zu berücksichtigen und ihr Wohlergehen in moralische Entscheidungen einzubeziehen. Ein beispielhafter Vertreter einer pathozentrischen Ethik ist Jeremy Bentham. Auch wenn sich der Pathozentrismus weitgehend etabliert hat, bleiben viele Fragen offen. So ist zu diskutieren, wie menschliche Interessen gegenüber den Interessen von Tieren abzuwägen sind. Die bloße

Berücksichtigung der Leidensfähigkeit liefert darüber hinaus keine Richtlinien dafür, inwieweit der Mensch das Leben von Tieren beenden darf – sei es in der Forschung, in der Nahrungsmittelproduktion, bei der Euthanasie oder in anderen Kontexten.

Tierethische – aber auch andere ethische Fragen – spielen eine besondere Rolle in zwei zentralen Feldern der angewandten Ethik, nämlich (1) in der Wissenschafts- und Technikethik sowie (2) in der veterinärmedizinischen Ethik.

(1) Die Technik- und Wissenschaftsethik fragt nach den Zielen von Forschung und Technik und ihren Konsequenzen für Menschen, Tiere und Umwelt. Exemplarisch: Ist moralisch alles erlaubt, was technisch möglich ist? In welchem Maße tragen Wissenschaftler:innen Verantwortung für die Folgen ihrer (Grundlagen-)Forschung? Welche Schäden und Risiken dürfen zugunsten potenzieller Erkenntnisgewinne in Kauf genommen werden? Und wie lässt sich dabei die Wissenschaftsfreiheit angemessen berücksichtigen? Die ethische Brisanz dieser Fragen besteht grundsätzlich – und sie nimmt keinesfalls ab, wenn Tiere involviert sind. Ein prominentes ethisch-basiertes Konzept an der Schnittstelle von Forschung und Tieren sind beispielsweise die sogenannten 3R-Prinzipien: Wo Forschung mit Tieren geschieht, soll diese so gestaltet werden, dass Tierversuche möglichst durch Alternativen ersetzt werden, die Anzahl der Tiere reduziert und das Leiden der Tiere so weit wie möglich minimiert wird. Zusammengefasst: Replace (Ersetzen), Reduce (Verringern) und Refine (Verbessern).

(2) Die veterinärmedizinische Ethik befasst sich mit moralischen Fragen im Kontext tierärztlicher Arbeit. Obwohl sie Überschneidungen mit der Tierethik aufweist, geht sie darüber hinaus und stellt Fragen zur Professionalität und den Herausforderungen, Rollenverständnissen, Leitprinzipien und Verantwortlichkeiten von Tierärzt:innen, aber auch weiteren relevanten Akteur:innen wie etwa Tierhalter:innen oder tiermedizinischen Ordinationsassistent:innen. Die Profession der Tiermedizin veranschaulicht demnach das Zusammenspiel von wissenschaftlichem Wissen und praktischer Anwendung. Die ethische Reflexion im Studium unterstützt angehende Tierärzt:innen dabei, sich fundiert und verantwortungsbewusst auf die vielfältigen moralischen Herausforderungen ihres zukünftigen Berufs vorzubereiten.

8 One Health – Ein ganzheitlicher Ansatz für Gesundheit

Die Gesundheit von Menschen, Tieren und der Umwelt ist eng miteinander verbunden. Das Konzept One Health beschreibt diese Verbindung und betont, dass Gesundheit nur durch die Zusammenarbeit verschiedener Fachrichtungen erreicht werden kann.

Das One Health High-Level Expert Panel (OHHLEP), eine internationale Expertengruppe, definiert One Health als „eine kollaborative, multisektorale und transdisziplinäre Herangehensweise, die darauf abzielt, die Gesundheit von Menschen, Tieren und Ökosystemen in einem zusammenhängenden System zu erhalten und zu fördern“ (OHHLEP, 2022). Dieses Panel wurde von den vier internationalen Organisationen – der Weltgesundheitsorganisation (WHO), der Organisation für Tiergesundheit (WOAH, ehemals OIE), der Lebens- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) und dem United Nations Environment Programme (UNEP) – ins Leben gerufen. Gemeinsam bilden sie die sogenannte Quadripartite, die die weltweiten One-Health-Initiativen koordiniert und fördert.

Diese Definition und Zusammenarbeit machen deutlich, dass die verschiedenen Fachrichtungen nicht nur nebeneinander arbeiten sollen, sondern sich zu einem gemeinsamen Verständnis und koordinierten Handeln verbinden müssen.

Die Umsetzung von One Health erfolgt inter- und transdisziplinär. Das bedeutet, dass nicht nur unterschiedliche naturwissenschaftliche und medizinische Disziplinen wie Humanmedizin, Veterinärmedizin, Biologie und Umweltwissenschaften zusammenarbeiten, sondern auch Sozialwissenschaften eine wichtige Rolle spielen. Soziale, wirtschaftliche und kulturelle Faktoren beeinflussen, wie Menschen mit Tieren und der Umwelt interagieren, wie Gesundheitsmaßnahmen akzeptiert und umgesetzt werden und wie gesellschaftliche Strukturen Gesundheitsrisiken erhöhen oder vermindern können. Sozialwissenschaftliche Methoden helfen beispielsweise dabei, das Verhalten von Menschen zu verstehen, Kommunikation zu verbessern und politische Entscheidungsprozesse zu gestalten. Sie sind daher unerlässlich, um nachhaltige und wirksame Gesundheitsstrategien zu entwickeln, die auch gesellschaftlich tragfähig sind.

Transdisziplinäres Arbeiten geht sogar noch einen Schritt weiter: Hier wird Wissen von Forschenden und nichtwissenschaftlichen Akteuren, wie Landwirt:innen, Gemeindevertreter:innen oder Bürger:innen, gemeinsam genutzt, um Lösungen für komplexe Gesundheitsprobleme zu finden. Dieses Vorgehen ist besonders wichtig, weil viele Gesundheitsfragen nicht isoliert, sondern im Zusammenhang mit sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Bedingungen betrachtet werden müssen.

Viele Infektionskrankheiten haben ihren Ursprung bei Tieren und können auf Menschen übertragen werden, oder auch von Menschen auf Tiere. Solche Zoonosen spielen eine zentrale Rolle bei Epidemien und Pandemien, wie zuletzt bei der COVID-19-Pandemie deutlich wurde. Umweltfaktoren wie Klimawandel, Abholzung oder Verschmutzung können die Entstehung und Verbreitung von Krankheiten zusätzlich begünstigen. Die Umwelt ist somit ein dritter wesentlicher Gesundheitsfaktor.

Ein besonders wichtiges Beispiel, das den One-Health-Ansatz verdeutlicht, ist das Problem der antimikrobiellen Resistenz (AMR). Antibiotika und andere antimikrobielle Mittel werden sowohl in der Humanmedizin als auch in der Tiermedizin eingesetzt. Durch falschen oder übermäßigen Gebrauch entstehen resistente Bakterien, die gegenüber den Medikamenten unempfindlich werden. Diese resistenten Erreger können von Tieren auf Menschen und umgekehrt übertragen werden ebenso wie über die Umwelt, etwa durch kontaminiertes Wasser oder Boden. Die Folgen sind schwerwiegend: Behandlungsoptionen bei Infektionen werden eingeschränkt, Krankheitsverläufe schwerer und es entstehen hohe Kosten im Gesundheitssystem. Deshalb ist die Bekämpfung von AMR ein klassisches Beispiel, bei dem die Zusammenarbeit von Human- und Veterinärmedizin mit Umweltwissenschaften und Sozialwissenschaften unabdingbar ist.

Ein weiteres Beispiel für One Health ist die Kontrolle von Tollwut. Durch die systematische Impfung von Hunden wird die Übertragung auf Menschen drastisch reduziert. Dieses erfolgreiche Vorgehen beruht auf der engen Zusammenarbeit zwischen Akteuren aus der Tier- und der Humanmedizin.

Trotz dieser Vorteile und Erfolge gibt es auch Herausforderungen bei der Umsetzung von One Health. Die Zusammenarbeit zwischen unterschiedlichen Fachrichtungen ist oft schwierig, da jede Disziplin ihre eigene Sprache, Methodik und Denkweise hat. Dies kann zu Missverständnissen oder Konflikten führen. Außerdem erfordern inter- und transdisziplinäre Projekte meist mehr Zeit, Koordination und Ressourcen als traditionelle, disziplinär begrenzte Studien.

Organisatorische und politische Hürden können den Fortschritt bremsen. Zuständigkeiten zwischen Institutionen sind nicht immer klar geregelt und es fehlen häufig verbindliche Strategien für die gemeinsame Arbeit. Zudem ist der Zugang zu Daten, die für die verschiedenen Fachbereiche relevant sind, nicht immer gewährleistet oder standardisiert.

Ein weiterer Punkt ist die Finanzierung von One-Health-Projekten. Weil sie mehrere Sektoren gleichzeitig betreffen, passen sie oft nicht in die üblichen Förderstrukturen, die häufig auf einzelne Fachgebiete ausgelegt sind.

Trotz dieser Herausforderungen bleibt One Health ein wichtiger und zukunftsweisender Ansatz, um die komplexen Zusammenhänge von Gesundheit in einer globalisierten Welt besser zu verstehen und zu steuern. Nur durch enge Kooperation, offene Kommunikation und gegenseitiges Verständnis zwischen den verschiedenen Akteur:innen kann die Gesundheit von Menschen, Tieren und Umwelt nachhaltig geschützt werden.

9 Mikroorganismen - Grundlagen

Mikroorganismen sind Kleinstlebewesen, die fast ausschließlich unter dem Mikroskop gesehen werden können. Zumeist handelt es sich um Einzeller (Bakterien, Archäen, Protozoen); es gibt darunter aber auch wenigzellige Lebewesen (Pilze, Algen). Ob Viren dazu zählen, ist umstritten. Prokaryotische und eukaryotische Zellen wurden bereits in Kapitel 1.2. behandelt. Mikroben können unserem Körper einerseits nützen (Veredelung Lebensmittel, Haut- und Darmflora), andererseits auch schaden. Bakterien, Schimmelpilze und Hefen sind am Verderb von Nahrungsmitteln beteiligt. Gelangen von Mikroorganismen gebildete Giftstoffe (Toxine) über die Nahrung in den Körper, kann daraus eine Lebensmittelvergiftung resultieren. Die Mikroorganismen selbst gelangen dabei nicht notwendigerweise in den Körper. Anders ist dies bei Lebensmittelinfektionen. Dabei werden Nahrungsmittel eingenommen, die krankheitserregende Mikroorganismen enthalten. Der Körper reagiert darauf, indem er sein Immunsystem aktiviert. Fäkal-orale Übertragung oder Schmierinfektion sind die Übertragungswege bei Lebensmittelinfektionen. Infektionen können aber auch durch Tröpfcheninfektion, direkten Kontakt mit anderen Menschen oder Tieren beziehungsweise Bisse (Insekten oder andere Tiere) übertragen werden.

In der Lebensmittelindustrie werden vor allem mit Hefen und Milchsäurebakterien fermentierte Lebensmittel hergestellt. Weiter werden Mikroorganismen noch in der Biotechnologie eingesetzt, z. B. in der Landwirtschaft (Silage), der Gesundheitsbiotechnologie (Antibiotika), der Umweltbiotechnologie (Klärwerke) oder der Industriebiotechnologie (Enzymproduktion für Textil-, Leder- und Papierindustrie). Außerdem wird der menschliche und tierische Körper außen und innen von Mikroorganismen besiedelt, die teils überlebenswichtig sind. Sogar Pflanzen leben mit Mikroorganismen. Sie konkurrieren mit potenziell schädlichen (pathogenen) Bakterien um Nahrung und schützen so Tiere und Menschen vor Infektionen.

9.1 ARCHÄEN

Archäen (Archäobakterien) sind prokaryotische Einzeller. Gemeinsam mit Bakterien bilden sie die Prokaryoten, die im Gegensatz zu Eukaryoten keinen Zellkern besitzen. Archäen besitzen zwar viele Eigenschaften, die für Bakterien typisch sind, ähneln aber in vielen molekularbiologischen Eigenschaften mehr den Eukaryoten. Früher bezeichnete man Archäen auch als Arche- oder Urbakterien. Sie unterscheiden sich jedoch von Bakterien stark u. a. bei genetischen, biochemischen oder strukturellen Eigenschaften. Daher wird diese Bezeichnung heute nicht mehr verwendet. Archäen zeigen eventuell Merkmale des frühen Lebens auf der Erde. Sie können auch in extrem unwirtlichen Gebieten vorkommen, da sie hohen Temperaturen, sehr niedrigen oder sehr hohen pH-Werten, hohen Salzkonzentrationen oder hohem Druck standhalten. Daher können sie beispielsweise durch das Kochen von Wasser nicht abgetötet werden. Allerdings sind bisher keine Krankheitserreger unter ihnen bekannt. Oftmals sind sie in sehr heißen bzw. salzigen Gewässern oder vulkanischen Gebieten anzutreffen. Archäen sind für die Forschung besonders interessant, da sie bei Boden- und Gewässersanierungen eingesetzt werden können.

9.2 BAKTERIEN

Bakterienzellen sind überall vorkommende, prokaryotische Einzeller. Sie können auf Umweltreize sowie auf andere Bakterien reagieren. Sie sind nur etwa 1 µm groß (abgesehen von sogenannten Riesenbakterien). In Bezug auf Bakterien wird Wachstum mit der Erhöhung der Anzahl an Bakterien (= Vermehrung) gleichgesetzt. Bakterien können sich schneller vermehren als andere Lebewesen. Manche Bakterien haben eine oder mehrere Geißeln zur Fortbewegung. Ihr Zytoplasma ist enzymreich; in ihm ist zudem die Erbinformation gespeichert. Die Zellmembran umschließt das Zellplasma vollständig und besteht aus Lipiden sowie Proteinen. Bakterien haben weder Organellen noch Chromosomen. Sie sind die einfachsten Zellen, die es gibt. Geformt werden sie von der Zellwand (starres äußeres Gerüst), die aus Murein besteht. Murein kommt nur bei Bakterien vor. Viele Antibiotika greifen genau dieses Murein an und zerstören so die Bakterien (z. B. Penicillin). Lebensmittel werden von Mischpopulationen besiedelt, sprich von mehr als einer Bakterienart; aus biologischen Gründen sind die verschiedenen Bakterienarten auch unterschiedlich stark vertreten. Die Zusammensetzung der Mikrobengemeinschaft wird als Sukzession bezeichnet.

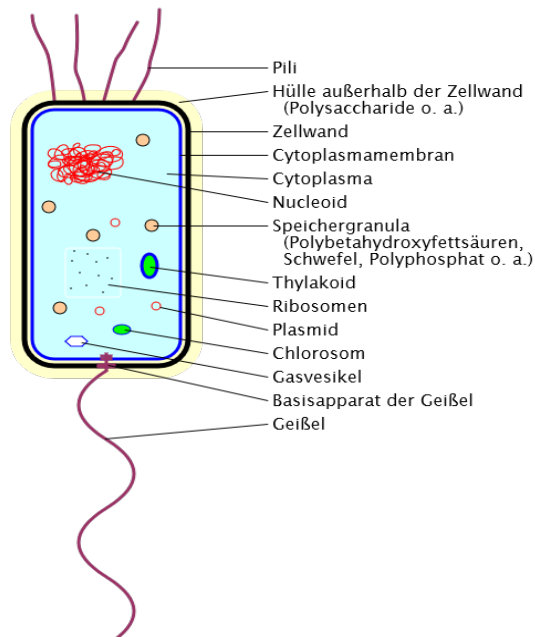


Abb. 9.1: Schematische Darstellung eines Bakteriums

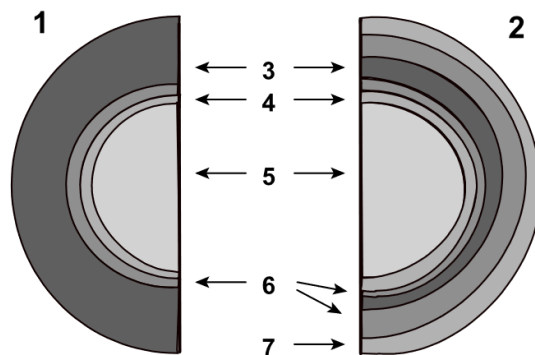


Abb. 9.2: Zellwand-Schema nach Gramfärbung

Gramfärbung

Eine Methode, um Bakterien einzufärben, ist die sogenannte Gramfärbung. Durch die Zugabe von Alkohol kann man auf Eigenschaften der Zellwand schließen.

- Grampositive Bakterien (z. B. Staphylokokken, Milchsäurebakterien, ...) haben eine dicke, robuste Zellwand und der Farbstoff bleibt auch nach der Zugabe von Alkohol in ihnen. Die robuste Zellwand der grampositiven Bakterien lässt sie außerhalb des Körpers überleben.
- Gramnegative Bakterien (z. B. Escherichia (E.) coli, Salmonella, ...) haben eine dünnere Zellwand. Außerhalb von dieser ist eine äußere Membran, die aus großen, komplexen Molekülen aufgebaut ist. Es handelt sich um Verbindungen aus Lipiden und Zuckerketten, die als Endotoxine bezeichnet werden. Diese äußere Membran schützt gramnegative Bakterien auch vor einigen Antibiotika sowie vor Lysozym, das die Zellwand angreift und daher für Bakterien gefährlich werden kann. Viele Bakterien des Verdauungstraktes sind gramnegative Bakterien, deren besondere Zellhülle sie vor den dortigen Enzymen und Gallensäuren schützt.

Manche Bakterien verfügen über Kapseln oder Schleimabsonderungen. Dadurch sind sie z. B. vor dem Immunsystem des Wirtes geschützt, da sich die Antikörper nicht direkt an die Zelle binden können. Der Schleim ermöglicht aber auch, dass sie sich an Oberflächen festsetzen können.

Einteilung

Die Einteilung der Bakterien erfolgt unterschiedlich nach bestimmten Kriterien, wie z. B.:

- Aktivität, z. B. Milchsäurebakterien
- Gramfärbung: grampositiv und gramnegativ (Vorhandensein einer äußeren Zellwand)
 - o grampositiv z. B. Staphylokokken, Milchsäurebakterien, Corynebakterien
 - o gramnegativ z. B. E. coli, Salmonellen
- Bildung von Endosporen: zum Überdauern widriger Zeiten gebildet

- Abhängigkeit von Sauerstoff:
 - o aerob: brauchen Sauerstoff
 - o mikroaerophil: tolerieren nur geringen O₂-Gehalt
 - o anaerob: benötigen keinen Sauerstoff
 - o aerotolerant: benötigen keinen Sauerstoff, tolerieren ihn aber
- Zellform:
 - o Kokken
 - o Stäbchen
 - o Vibrionen
 - o Spirillen
- Begeißelung: Bewegungsvermögen
 - o unbegeißelt
 - o polar begeißelt
 - o peritrich begeißelt (an gesamter Zelloberfläche)

Bakterien derselben Art können auch unterschiedliche Eigenschaften haben (durch Mutation). Serotypen bzw. Bakterienstämme nennt man unterschiedliche Varianten innerhalb einer Art. So sind die Salmonellen, die eine Lebensmittelvergiftung auslösen denen sehr ähnlich, die Typhus verursachen und unterscheiden sich nur als Serotypen voneinander.

Beschleunigt durch Enzyme werden im Stoffwechsel kontrolliert Nährstoffe abgebaut, um die Energie zu nutzen und neue Zellbestandteile zu bilden. Im Atmungsstoffwechsel wird die in Substraten gespeicherte Energie am effizientesten genutzt, um neue Biomasse aufzubauen. Dabei wird zwischen aerober und anaerober Atmung unterschieden. Die aerobe Atmung kann mit vollständiger oder unvollständiger Oxidation vonstattengehen. Das aus den Substraten (z. B. Glukose) entstehende Produkt der vollständigen Oxidation (aerobe Bakterien) ist Kohlenstoffdioxid CO₂. Bei der unvollständigen Oxidation (Essigsäurebakterien) entstehen CO₂ und Essigsäure sowie bei der anaeroben Atmung (Nitritatmer) Stickstoff oder Ammoniak. Atmende Bakterien werden zur Produktion von Enzymen, Aromastoffen, Aminosäuren etc. eingesetzt, Essigsäurebakterien zur Produktion von Speiseessig. Die Gärung ist ein weiterer Weg, um ohne Sauerstoff auszukommen. Nur gewisse Nährsubstrate können überhaupt vergoren werden; am besten eignet sich Zucker. Bei der Gärung ist der Energiegewinn bei höheren Stoffumsätzen geringer, während bei der Atmung der Energiegewinn bei hohen Wachstumsraten höher ist. Der hohe Stoffumsatz der Gärung ermöglicht den Einsatz dieser Bakterien für die Lebensmittelproduktion (fermentierte Lebensmittel). Dabei gibt es verschiedene Arten der Gärung:

Tab. 9.1 Arten der Gärung

Art der Gärung	Endprodukte	Bakterien	Verwendung, Wirkung
Alkoholische Gärung	Ethanol CO ₂	Zymomonasbakterien	Alkoholische Getränke Verderb
Propionsäuregärung	Propionsäure CO ₂	Propionsäurebakterien	Hartkäse Verderb
Milchsäuregärung	Milchsäure	Milchsäurebakterien	Milchprodukte Wurstwaren Sauergemüse Verderb
gemischte Säuregärung	Ameisensäure Säuren Alkohole CO ₂ H ₂	Enterobacteriaceen	Verderb
Buttersäuregärung	Buttersäure Essigsäure CO ₂ H ₂	Clostridien	Verderb

Wachstum und Vermehrung

Bei der Vermehrung der Bakterien (auch Wachstum genannt) entstehen aus einer Mutterzelle zwei Tochterzellen, die jeweils die DNA vollständig erhalten. Sichtbar werden sie z. B. in einer Flüssigkeit als Trübung oder im Labor in Petrischalen auf festem Agar-Nährboden. Bakterien vermehren sich exponentiell: Aus einem Bakterium werden zwei, daraus werden vier, daraus werden acht, dann 16, 32 etc. Verdopplungszeit bzw. Generationszeit nennt man jene Zeitspanne, in der sich die Bakterienmenge verdoppelt und ist abhängig von der Phase des Vermehrungszyklus, in der sich die Bakterien gerade befinden. Aufgrund der exponentiellen Vermehrung ist der Anfangskeimgehalt (z. B. in keimbelasteten Lebensmitteln) relevant. Je höher dieser ist, umso schneller verdirbt das Lebensmittel. Die Vermehrung von Bakterien läuft in Phasen ab und beginnt mit der Anfangsphase (Anlaufphase, Lag-Phase). Hierbei nimmt das Wachstum ständig zu, die Bakterien stellen sich auf die neue Umgebung ein und produzieren spezifische Enzyme. In der exponentiellen Wachstumsphase teilen sich die Bakterien mit maximaler Geschwindigkeit, die Verdopplungszeit ist hier am geringsten. Nach einer Zeit führt Nährstoffmangel zum Absterben vieler Bakterien und zur Reduktion der Geschwindigkeit, Verluste und Zellproduktion gleichen sich hierbei aus und es besteht kein Netto-Wachstum. In der Absterbephase nimmt die Zellzahl im Gesamten ab. In dieser Phase werden von einigen Bakterien Endosporen oder andere Dauerformen gebildet, um diese Zeit bis zur Verbesserung der Lebensbedingungen überdauern zu können.

Das Wachstum wird durch mehrere Faktoren beschränkt. Bakterien verbrauchen ihre Nährstoffe (z. B. Zucker oder Aminosäuren) nach einer gewissen Zeit. Für aerobe Keime stellt Sauerstoffmangel einen hemmenden Faktor dar. Konkurrenz durch andere Keime und Endprodukte, die durch Mikroben ausgeschieden werden, können ebenfalls das Wachstum hemmen. Gewisse Bakterien verhindern aktiv das Wachstum anderer Bakterien durch Veränderung des Milieus mittels organischer Säuren, Kohlendioxid, Ammoniak, Amine oder Alkohol. Manche greifen andere Bakterien auch direkt mit Hemmstoffen, Bakteriozinen oder Wasserstoffperoxid an.

Um unwirtliche Zeiten zu überleben, bilden bestimmte Gruppen Dauerformen wie Zysten (Boden-bakterien), Konidien (Aktinomyceten), VBNC-Formen (z. B. E. coli) und Endosporen (Clostridien, Bacillen). Abgesehen von den Endosporen können all diese Dauerformen bei 100 °C abgetötet werden.

Tab. 9.2 Mechanismen von Bakterien zum Überstehen unwirtlicher Gegebenheiten

Begriff	Erklärung
Dauerzellen	Besonders ausgestattete, meist dickwandige Zellen, die unwirtliche Zeiten überleben können.
Vegetative Bakterienzellen	Bakterienzellen, die viel wachsen und sich stark vermehren.
Sporen	Der Fortpflanzung dienende Zellen, oft mit Eigenschaften von Dauerzellen.
Zysten	Dauerformen, die Austrocknung überleben.
Konidien, Exosporen	abgeschnürte Sporen
VBNC-Formen	Ruhezustand mit stark eingeschränkter Lebensfunktion; in diesem Stadium auf Nährmedien nicht anzüchtbar.
Endosporen	Dauerformen im Zellinneren, nur bei Bacillen und Clostridien möglich; resistent gegenüber Hitze (über 100 °C für gewissen Zeitraum zur Abtötung nötig), Austrocknung, Säuren, Strahlung.

9.3 PILZE

Pilze gehören wie Tiere und Pflanzen zu den „höheren Organismen“, da sie einen Zellkern aufweisen. Im Unterschied zu Pflanzen besitzen sie kein Chlorophyll und betreiben somit keine Photosynthese. Daher brauchen sie organische Substanzen für

die Energiegewinnung. Pilze können vielfältig unterteilt werden.

- Mehrzellige Pilze

z. B. Schimmel-, Speise- und Giftpilze: Die fadenförmigen Zellen der Pilze heißen Hyphen, diese bilden zusammen das Myzel. Teilweise bilden diese auch Fruchtkörper aus.

- Einzellige Pilze

z. B. Hefen

Pilze beteiligen sich am Kohlenstoffkreislauf der Erde. Zusammen mit Bakterien bauen Pilze organische Substanz ab, die zuvor von Produzenten mit Sonnenstrahlung aufgebaut wurde, mineralisieren abgestorbene Pflanzen sowie Tiere und stellen im Zuge dessen CO₂ her, das wiederum von den Produzenten benötigt wird. Diese Prozesse sind unabdingbar für andauerndes Wachstum auf der Erde.

Pilze können sich ungeschlechtlich (asexuell) oder geschlechtlich (sexuell) fortpflanzen. Es gibt allerdings keine Unterteilung in männliche und weibliche Pilze; es paaren sich einfach zwei Pilzindividuen. Zur Fortpflanzung errichten sie Fruchtkörper mithilfe ihrer Hyphen. Die Hyphen zweier Pilze verschmelzen, die Zellkerne der zwei Paarungstypen vereinigen sich zu einer Zygote in den dann gebildeten Fruchtkörpern. Zellen mit einem diploiden Chromosomensatz entstehen, teilen sich danach wieder in Zellen mit einem haploiden Chromosomensatz.

Die Zellen der Pilze sind ca. 10 µm groß, also um einiges größer als Bakterienzellen. Pilzzellen weisen Kompartimente (durch Membranen geschaffene Räume innerhalb der Zellen), sogenannte Zellorganellen, auf. Die äußere Begrenzung bildet die Zellwand, die sie schützt. Die Zellmembran darunter kontrolliert die Aufnahme von Substanzen. Gefüllt ist die Zelle mit Zytoplasma, welches unter anderem Enzyme enthält. Im Zytoplasma liegen außerdem die Organellen. Mitochondrien erzeugen als „Kraftwerke“ Energie, die Chromosomen enthalten die Erbanlagen. Lysosomen sind für die Verdauung gewisser Stoffe zuständig, in Vakuolen sind Reserve- und Abfallstoffe gespeichert und in den Ribosomen werden die Proteine synthetisiert. Innere Membransysteme stellen den Stofftransport innerhalb der Zelle sicher. Die Zellwand ist meist aus Chitin gebaut, manchmal aus Cellulose. Septen unterteilen die Zellhyphen.

Die Einteilung der Pilze richtet sich nach den bei der Vermehrung gebildeten Strukturen und dabei ablaufenden Prozesse sowie nach der Anwesenheit von Septen. Eine Übersicht über die wichtigsten Pilze und Vertreter sei hier kurz gegeben:

Gruppe	Merkmale	Relevante Vertreter
Cellulosepilze	Hyphen ohne Septen	Falscher Mehltau der Weinrebe
Jochpilze	Hyphen ohne Septen	Brotschimmel
Schlauchpilze	Hyphen mit Septen Fruchtkörper	Mutterkorn bei Getreide Trüffel
Ständerpilze	Hyphen mit Septen Fruchtkörper	Steinpilz Champignon
Hefen	Einzelzellen	Bäckerhefe

Tab. 9.3 Übersicht Einteilung Pilze

Schlauchpilze

Sehr viele Schimmelpilze gehören zu den Schlauchpilzen. Diese können sehr nützlich sein, aber auch großen Schaden anrichten. So kann z. B. *Aspergillus* industriell zur Zitronensäureproduktion verwendet werden, während die freilebenden *Aspergillen* für Verderb und die Bildung von hoch-giftigen Aflatoxinen verantwortlich sind. Sie können auch den Menschen infizieren. *Penicillium*-Pilze helfen einerseits bei der Reifung von Käse und Wurst, andererseits sind sie als Produzenten von Penicillin (einem sehr wichtigen Antibiotikum) unentbehrlich.

Viele Schlauchpilze sind Schadpilze und lösen mit ihrer parasitären Lebensweise Pflanzen-krankheiten aus (Echter Mehltau des Getreides, Graufäule bei Früchten). Der

Mutterkornpilz bildet Mutterkorn auf Getreideähren, dessen Bestandteile (Mykotoxine) im menschlichen und tierischen Körper Ergotismus auslösen. Dies führt zu Halluzinationen, Krämpfen und Absterben von Gliedmaßen. Mutterkorn ist sehr gefährlich – auch wenn aus dem Mutterkorn sogar Arzneimittel hergestellt werden. In der letzten Zeit hat Mutterkorn durch ungereinigtes Getreide (wie es z. B. in sogenannter „Naturkost“ vorkommt) wieder mehr Bedeutung erlangt.

Schimmelpilze

Diese sind taxonomisch gesehen keine eigenständige Gruppe und sind nicht eng miteinander verwandt. Sie bilden weißliche oder gefärbte Überzüge auf Lebensmitteln und anderen Materialien und verursachen außerdem den Verderb von Lebensmitteln. Vor allem besiedeln sie feste und halbfeste Nahrungsquellen, in die die Hyphen wachsen. Die Vermehrung geschieht hier ungeschlechtlich. Viele Schimmelpilze produzieren Giftstoffe (Mykotoxine).

Hyphenpilze und Schimmelpilze leben aerob, haben also einen Atmungsstoffwechsel. Pilze, die Cellulose abbauen, müssen sogenannte Exoenzyme ausscheiden, um die widerstandsfähigen Cellulosemoleküle aufzubrechen. An Gebäuden verwerten Schimmelpilze neben Wasser an Decken und Wänden in Wohnungen auch organische Substanzen aus der Tapete oder dem Putz. Steine oder Glas befallende Schimmelpilze bilden organische Verbindungen im Staub aus der Luft.

Ständerpilze

Die am höchsten entwickelte Pilzgruppe stellen die Ständerpilze dar. Hutpilze gehören zum Beispiel dazu. Brand- und Rostpilze befallen oft Wild- und Kulturpflanzen und werden mit Fungiziden bekämpft. Problematisch ist, dass die Pilze gegen viele Fungizide mittlerweile Resistenzen gebildet haben. In den Ständerpilzen finden sich auch viele Speisepilze wie der Champignon oder der Steinpilz.

Hefen

Hefen sind einzellig und vermehren sich asexuell durch Sprossung. Sie können sich aber auch sexuell vermehren. Es gibt sowohl natürlich vorkommende Hefen („wilde Hefen“) als auch Kulturhefen, die zur Lebensmittelherstellung verwendet werden. Das wichtigste Beispiel ist *Saccharomyces cerevisiae*, die Bäckerhefe. Auch beim Bierbrauen werden Hefepilze eingesetzt. Personen oder Tiere mit geschwächtem Immunsystem können an Mykosen (=Pilzinfektionen) erkranken. Ein bekanntes Beispiel ist die Candidose (*Candida albicans*), die zu einem weißen Belag im Mund- und Rachenraum führt (Mundsoor). Mykosen werden mit Antimykotika behandelt.

Die meisten Hefen sind fakultativ anaerob, ihr Stoffwechsel wird von der Anwesenheit von Sauerstoff bestimmt. Steht Sauerstoff zur Verfügung, kann durch Atmung Zellenergie gewonnen werden; dafür wird Glukose in Brenztraubensäure umgewandelt, die in den Mitochondrien zu Kohlendioxid oxidiert wird. Ist kein Sauerstoff vorhanden, bedienen sich Hefen der alkoholischen Gärung und wandeln mit Gärungsenzymen fast die ganze Brenztraubensäure in Alkohol um, auch dabei entsteht viel CO₂. Im Vergleich zu den atmenden Hefen vermehren sich gärende Hefezellen kaum bis gar nicht. Für Wachstum brauchen sie mehr Nährstoffe. In Abwesenheit von Sauerstoff wird Glukose stärker verstoffwechselt (Pasteur-Effekt). Hefen sind immer bei zuckerreichen Früchten und Säften zu finden, da sie gut in Flüssigkeiten leben können. Im Vergleich dazu leben Hyphenpilze v. a. in feuchten, aber festen Substraten, in die sie mit den Hyphen eindringen können.

Hefen vermehren sich meist durch Sprossung oder Knospung: Ein kleiner Auswuchs (Spross) bildet und vergrößert sich, trennt sich bei Erreichen einer gewissen Größe von der Hefe und wächst eigenständig als Tochterzelle weiter. Der Zellkern teilt sich, wodurch DNA ebenfalls im Spross enthalten ist. Zurückbleibt eine Narbe, und hat eine Hefezelle zu viele Narben, stirbt sie ab. Geschieht die Teilung genau in Zellmitte, spricht man von Spalthefen. Manche Hefen bilden Pseudohyphen aus, die wie Hyphen aussehen, streng genommen aber keine sind.

Über 99% aller Pilzarten sind Hyphenpilze. Ihre Hyphen wachsen als Substratmyzel weit in Boden oder befallene Lebensmittel ein. Ein kleiner Teil (Luftmyzel) bleibt über dem

Nährboden. Durch Verschmelzen der Hyphen verwandelt sich das Myzel in ein verflochtenes Netz. Diese Pilze pflanzen sich vor allem über die Sporenbildung fort. Sporenbildung kann es dem Pilz ermöglichen, in neue Lebensräume zu gelangen, wenn die Nahrungsquellen am aktuellen Ort aufgebraucht sind. Pilzsporen sind widerstandsfähige Dauerformen oder Ruhestadien; sie können sogar Jahrzehnte überleben, sind allerdings nicht so hitzeresistent wie die Bakteriensporen. Die Sporenbildung kann dabei asexuell oder sexuell erfolgen, sichtbarer Schimmel ist das Resultat der asexuellen Sporenbildung. Verbreitet werden die Sporen über den Wind oder durch Tiere und Menschen.

9.4 PROTOZOEN

Auch Protozoen sind Einzeller, gehören aber zu den „höheren Organismen“. Der Begriff „Protozoen“ ist veraltet, wird aber in der Medizin nach wie vor verwendet. Der Begriff umfasst eine sehr unterschiedliche Gruppe an einzelligen, eukaryotischen Organismen. Sie haben keine Zellwand, sondern eine Zellhülle aus Lipiden und Proteinen, was ihnen eine Fortbewegung ermöglicht. Viele Protozoen leben parasitär auf Menschen und Tieren. Manche leben frei, also unabhängig von Wirtsorganismen. Auch bei Protozoen ist es durch Zystenbildung möglich, ungünstige Zeiten zu überdauern. Als Nahrung dienen ihnen in Wasser gelöste Substanzen oder auch Bakterien. Eingeteilt werden sie nach der Art der Fortbewegung in Amöben, Flagellaten, Ciliaten und Sporozoen.

Amöben

Amöben bilden sogenannte Scheinfüßchen (Pseudopodien), die sie auch für die Ernährung verwenden. Sie sind häufig im Boden zu finden.

Flagellaten

Flagellaten sind mit einer oder mehreren Geißeln ausgestattet, werden daher auch Geißeltierchen genannt. Sie dienen vielen Meerestieren als Nahrungsquelle.

Ciliaten

Ciliaten (Wimperntierchen) sind häufig am ganzen Körper mit kleinen Geißeln bedeckt, sie können sich damit schnell fortbewegen und Nahrung aufnehmen. Ein Beispiel ist das Pantoffeltierchen.

Sporozoen

Sporozoen (auch Apikomplexa) sind Parasiten. Sie bilden Sporozoiten für die Übertragung auf einen neuen Wirt. Ein Beispiel sind Toxoplasmae (Toxoplasmose-Erreger). Diese können Menschen und Tiere infizieren und bilden in den tierischen Zellen Dauerstadien – Zysten, die Fortpflanzungszellen enthalten. Die Übertragung geschieht durch den Verzehr von oder unvorsichtigen Umgang mit ungegartem Fleisch. Oozysten sind die Dauerstadien der Sporozoen. Im Fall von Toxoplasmen findet man diese Dauerstadien in Katzen.

Protozoen sind die Erreger von Infektionskrankheiten, die weltweit am meisten Todesfälle auslösen: Toxoplasmose, Malaria oder Leishmaniose sind Beispiele.

9.5 VIREN

Viren können sich nicht selbstständig vermehren, verfügen über keinen eigenen Stoffwechsel und sind nicht aus Zellen aufgebaut. Daher werden Viren nicht als Lebewesen gesehen.

Sie sind Parasiten, die Lebewesen zur Bildung neuer Virenpartikel nutzen. Sie benötigen dafür unbedingt lebende Zellen sowie wirtseigene Enzyme. Übertragen werden können sie z. B. durch Lebensmittel oder Wasser. Sie sind meist sehr wirtsspezifisch. Viren sind ungefähr 10-mal kleiner als Bakterien und können nur mit dem Elektronenmikroskop gesehen werden. Ihr genetisches Material besteht, je nach Virus, aus DNA, oder RNA. Dieses genetische Material liegt, je nach Virus, entweder einzelsträngig oder doppelsträngig vor. Ein wichtiges Merkmal zur Unterteilung der Viren ist das Vorliegen einer sog. Hülle:

- Unbehüllte Viren sind von einer Proteinkapsel umgeben (Capsid).

- Behüllte Viren verfügen über eine Membran, die von der Zellmembran des infizierten Wirtes stammt.

Eingeteilt werden Viren entsprechend ihres Aussehens. Es gibt stäbchenförmige Viren, umhüllte

stäbchenförmige Viren (z. B. Influenza-Virus), kubische Viren (z. B. Polio-, Hepatitis-A-, Rota- und Noro-Viren), unbehüllte kubische Viren (z. B. HIV) und zusammengesetzte Viren, die kubische und stäbchenförmige Strukturmerkmale aufweisen. Dies findet man oft bei Bakteriophagen, sprich Viren, die auf Bakterien spezialisiert sind. Unbehüllte Viren sind viel resistenter als behüllte. Die meisten Viren sind allerdings hitzeempfindlich und werden bei 70 °C innerhalb weniger Minuten inaktiv. Sie können sich nicht aktiv bewegen, gelangen also zufällig an zu infizierende Zellen.

Vermehrung

Die Vermehrung geschieht in mehreren Schritten. Zuerst heften sie sich an die Zelloberfläche (Adsorption); in dieser Adsorption liegt die hohe Wirtsspezifität vieler Viren begründet. Danach dringt das Virus ein, indem es in das Zytoplasma der Zelle gelangt (Ausnahme: Bakteriophagen). Als Folge setzt das Virus die DNA bzw. RNA zur Gänze frei, woraufhin die infizierte Zelle Virusbestandteile synthetisiert. Im nächsten Schritt werden die Viruspartikel im Zytosol zusammengesetzt. Am Schluss verlassen die neuen Viren die Zelle, was diese zerstört. Behüllte Viren erhalten hier die Membranhülle. Die Zellmembran enthält dann die Virusproteine, die für die Adsorption an neue Zellen benötigt wird. Die Vermehrung läuft in Stadien ab. In der Latenzphase reifen die Viren in der Zelle, die Zahl der intrazellulären Viren steigt. In der folgenden Anstiegsphase steigt die Anzahl der intrazellulären Viren weiter, aber es werden auch die Viren aus der Zelle freigesetzt. Die Latenzphase beschreibt die Zeit nach einer Virusinfektion, in der keine infektiösen Viren in den Körper freigesetzt werden. In diesem Stadium kann man die virale Infektion auch nicht nachweisen. Die Anzahl freigesetzter Viren pro Zelle wird Wurfgröße genannt. Bei alternativen Virusinfektionen werden nach der Infektion keine neuen Virenpartikel gebildet, sondern das eigene genetische Material vermehrt. Erst zu einem späteren Zeitpunkt werden die Partikel freigesetzt. So bleibt die Infektion oft lange unbemerkt, weil sie erst später ausbricht.

Diagnose und Behandlung

Diagnostiziert werden Viren mittels serologischer Nachweisverfahren, wobei Antikörper im Patientenblut festgestellt werden. Die Therapie ist oft schwierig und kann nicht wie bei Bakterien mit Antibiotika erfolgen. Die Viren vermehren sich in der Wirtszelle, die man mit der Behandlung auch nicht schädigen möchte. Es gibt außerdem sehr wenige Hemmstoffe gegen Viren. Eine mögliche Behandlung besteht in der Gabe sog. Interferone. Oft erfolgt die Therapie symptomatisch. Mehr Bedeutung kommt der Prophylaxe, vor allem in Form von Impfungen, zu. In den Körper werden meist abgetötete oder abgeschwächte Krankheitserreger injiziert, damit das Immunsystem Antikörper bildet, ohne tatsächlich infiziert worden zu sein (spezifische Abwehr). Wird der Körper tatsächlich mit einer Infektion konfrontiert, können die Viren mithilfe der gebildeten Antikörper ausgeschaltet werden.

9.6 PRIONEN

Ein Prion ist ein Partikel aus Protein, welches falsch gefaltet ist und daher nicht vom Körper abgebaut werden kann. Prione enthalten weder DNA, noch RNA. Diese falsch gefalteten Proteine können sich in unterschiedlichen Organen ablagern und führen somit zu einer Beeinträchtigung der Organfunktion. Die Proteine können entweder im Körper entstehen (erblich bedingt, bzw. oftmals ist die Ursache nicht bekannt), oder werden von außen zugeführt. Die Gruppe der Prionenerkrankungen ist sehr groß und ruft sehr unterschiedliche Krankheitsbilder hervor.

Ein Beispiel einer Prionenerkrankung ist die sog. BSE („Rinderwahn“). BSE ist eine Krankheit, die in den 1980er-Jahren in Großbritannien mehreren tausend Rindern das Leben kostete. BSE ist ein Beispiel einer Prionenerkrankung, bei der die Partikel von

außen (z. B. durch das Verfüttern von Tier-/Knochenmehl) zugeführt wird. BSE ist eine TSE (transmissible spongiform encephalopathy); übersetzt bedeutet dies „übertragbare schwammartige Gehirnerkrankung“. In den betroffenen Gehirnen laufen degenerative Prozesse ab, sog. Proteinablagerungen (sog. Amyloidablagerungen) sind zu beobachten. Weitere bekannte TSE sind die Creutzfeld-Jakob-Krankheit (Mensch) und Scrapie (Schaf, Ziege). Creutzfeld-Jakob beginnt mit Schlafstörungen und Verwirrtheit, es folgen Sehstörungen, Demenz sowie Störungen der Feinmotorik und Koordination. Betroffen sind meist ältere Menschen, da die Inkubationszeit (Zeit zwischen Ansteckung und Krankheitsausbruch) dieser Krankheiten meist mehrere Jahre (Jahrzehnte) andauert.

10 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.1 <https://einzellerwelt.jimdo.com/2013/07/10/gr%C3%B6ssenvergleich%20der-nano-und-mikrowelt/>, „Größenvergleich“ von Sabine Kastner unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.2 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/Celltypes.svg>, „Celltypes“ von NCBI, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 1.3 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8a/Prokaryote_DNA-en.svg, „Prokaryote DNA-en“ von Cwbn unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.4 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Biological_cell.svg, „Biological Cell“ von MesserWoland unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.5 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fc/Plant_cell_structure_svg-de.svg, „Plant_Cell_Structure“ von Muellercrtp, gemeinfrei verfügbar Schematische
- Abb. 1.6 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/65/Zellkern.png>, „Zellkern“ von Dirkb unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.7 Barbara Hamilton, Universität Wien
- Abb. 1.8 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Nucleus_ER_golgi.svg, „Nucleus_ER_golgi“ von Adam Rędzikowski unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.9 Barbara Hamilton, Universität Wien
- Abb. 1.10 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/Plasmolyse_Pflanzenzelle.svg, „Plasmolyse Pflanzenzelle“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 1.11 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animal_mitochondrion_diagram_de.svg, „Mitochondrion“ von Ladyofhats gemeinfrei verfügbar
- Abb. 1.12 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/26/Chloroplast.svg>, „Chloroplast“ von SuperManu unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.13 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e2/Peroxisome_de.svg, „Peroxisome_de“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 1.14 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4d/OSC_Microbio_03_04_Cytoskel.jpg, „OSC Microbio 03 04 Cytoskel“ von CNX OpenStax unter der CC-BY 4.0 Lizenz
- Abb. 1.15 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/Mikrotubula007_de.png, „Mikrotubula007 de“ von Qniemiec unter der CC-BY-SA 4.0 Lizenz
- Abb. 1.16 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Plasmodesmata_structure.svg, von Smartse unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 1.17 https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:SVG_tight_junctions#/media/File:Cellular_tight_junction_de.png, von Ladyofhats gemeinfrei verfügbar
- Abb. 1.18 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Desmosome_cell_junction_de.svg, von Ladyofhats gemeinfrei verfügbar
- Abb. 2.1 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Chromosom.svg>, „Chromosom“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 2.2 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Cell_cycle_diagram.svg, „Cell cycle diagram“ von Brat Ural unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 2.3 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e0/Cell_Cycle_2-2.svg, „Cell Cycle 2-2“ von Histidine unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 2.4 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Schemazeichnung_Mitose.svg, „Schemazeichnung Mitose“ von Matthias M. unter der CC-BY-SA 3.0 Lizenz
- Abb. 2.5 Barbara Hamilton, Universität Wien
- Abb. 2.6 Barbara Hamilton, Universität Wien
- Abb. 2.7a https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/Meiosis_Stages_-_Numerical_Version.svg, „Meiosis_Stages_-_Numerical_Version“ von Ali Zifan unter der CC-BY-SA 4.0 Lizenz
- Abb. 2.7b https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Meiosis_Stages_-_Numerical_Version.svg, „Meiosis_Stages_-_Numerical_Version“ von Ali Zifan unter der CC-BY-SA 4.0 Lizenz
- Abb. 2.8 https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Mitosis_Stages.svg#/media/Datei:Mitosis_Stages_-_Numerical_version.svg, „Mitosis_Stages_-_Numerical_Version“ von Ali Zifan unter der CC-BY-SA 4.0 Lizenz
- Abb. 2.9 Claus Vogl
- Abb. 2.10 Claus Vogl
- Abb. 2.11 Claus Vogl
- Abb. 2.12 Claus Vogl

- Abb. 3.1 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 3.2 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 4.1 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 4.2 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 4.3 Martin W. Reichel, Universität Wien
 Abb. 4.4 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 4.5 [https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADiagram_of_the_human_heart_\(cropped\).de.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File%3ADiagram_of_the_human_heart_(cropped).de.svg), "Diagram of the human heart (cropped)" von Jakov, unter der GNU Free Documentation License
 Abb. 4.6 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EKG_diagram_1.svg, von Krzysztof Blachnicki als gemeinfreies Werk
 Abb. 6.1 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 6.2 https://www.teachsam.de/psy/psy_wahrn/psy_wahrn_2_3_2_1.htm, "Gehirn" von Gert Egle unter der CC BY-SA 4.0 Lizenz
 Abb. 6.3 Influence of Early Acquaintance with Dikshitar's Nottuswaras on Cognitive Development, Communication and Social-Emotional Learning in Preschool Children - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/CROSS-SECTION-OF-SPINAL-CORD_fig6_327222314 [accessed 29 Dec, 2020]
 Abb. 7.1 Sarah Kainz, Universität Wien
 Abb. 7.2 <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4484833>, „KidneyStructures PioM“ von Piotr Michał Jaworski; unter der CC BY-SA 3.0 Lizenz

10 Tabellenverzeichnis

- Tab. 2.1 Kontrollpunkte des Zellzyklus
 Tab. 2.2 Mitose und Meiose im Vergleich
 Tab. 2.3 Vierfeldtafel F2
 Tab. 3.1 Übersicht über wichtige Hormone bei der Verdauung und Absorption
 Tab. 3.2 Wichtige Enzyme bei der Verdauung von Eiweiß im menschlichen Organismus
 Tab. 4.1 Ruhewerte des Menschen und unterschiedlicher Tiere
 Tab. 5.1 Antigene und Antikörper der menschlichen Blutgruppen
 Tab. 9.1 Arten der Gärung
 Tab. 9.2 Mechanismen von Bakterien zum Überstehen unwirtlicher Gegebenheiten
 Tab. 9.3 Übersicht Einteilung Pilze

Chemie

Aufnahmeverfahren 2026/27

26.02.2026

Impressum

Titel: Chemie - Aufnahmeverfahren 2026/2027

Urheber:

Titel: Grundlagen der Chemie - Vorbereitungsliteratur für das Aufnahmeverfahren

Autor:innen: Lothar Brecker, Wolfgang Kandoller, Michael Malarek, Martin Marker, Klaus Richter

Mitarbeiter:innen: Evelyn Fülöp, Angelika Menner, Günter Trettenhahn

Titel: Chemische, biochemische und physiologische Grundlagen der Pharmazie
und Ernährungswissenschaften - Vorbereitungsliteratur für das Aufnahmeverfahren

Autor:innen: Ao. Univ.-Prof. Mag. Dr. Helmut Spreitzer, Ass.-Prof. Dr. Petra Rust, Martin W. Reichel, Bakk.rer.nat. MA, Dipl. oec. troph. Dr. Georg Hoffmann, Privatdoz.

Erstellt im Zuge des Open Education Austria Projekts.

Mit der freundlichen Unterstützung des Center for Teaching and Learning der Universität Wien.

Herausgeberin:

Universität Wien

Universitätsring 1

1010 Wien

Lizenziert unter der CC BY-NC-SA 3.0 AT Lizenz

Bearbeitung und Ergänzung durch:

Vizerektorat für Lehre und klinische Veterinärmedizin mit dem Zentrum für Biologische Wissenschaften

Veterinärmedizinische Universität Wien

Veterinärplatz 1

1210 Wien

Herausgeberin:

Veterinärmedizinische Universität Wien

Veterinärplatz 1

1210 Wien



Lizenziert unter der CC BY-NC-SA 3.0 AT Lizenz

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Österreich zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/at/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

Inhalt

Einleitung	7
1 Grundlagen	8
1.1 GESETZE, REGELN, MODELLE UND THEORIEN	9
1.1.1 Gesetze und Regeln	9
1.1.2 Modelle	10
1.1.3 Hypothesen und Theorien	10
1.2 STÖCHIOMETRIE	10
2 Atombau und Periodensystem	12
2.1 Bausteine	12
2.1.1 Stabilität von Atomkernen und radioaktive Strahlung	13
2.2 ATOMBAU UND PERIODENSYSTEM	14
2.2.1 Rutherford und Bohr	14
2.2.2 Orbitale und Quantenzahlen	16
2.2.3 Das Periodensystem der Elemente nach Mendelejew (PSE)	18
2.2.4 Periodische Eigenschaften der <i>s</i> - und <i>p</i> -Blockelemente (Hauptgruppenelemente)	19
2.2.5 Ionisierungsenergie	20
2.2.6 Elektronegativität	20
2.2.7 Metall- und Nichtmetallcharakter	21
2.2.8 Übergangselemente	21
2.2.9 Innere Übergangselemente	22
3 Chemische Bindungen	23
3.1 DIE ATOMBINDUNG / KOVALENTE BINDUNG	23
3.2 MESOMERIE	24
3.3 HYBRIDISIERUNG	25
3.4 EINFACHBINDUNGEN	26
3.5 DOPPELBINDUNGEN	27
3.6 DREIFACHBINDUNGEN	28
3.7 ELEMENTARER KOHLENSTOFF	28
3.8 POLARE ATOMBINDUNGEN	29
3.8.1 Das Wassermolekül	29
3.8.2 Das Ammoniakmolekül	30
3.9 DIE IONENBINDUNG	30
3.9.1 Eigenschaften von Ionenbindungen	31
3.10 METALLBINDUNG	31
3.11 INTERMOLEKULARE WECHSELWIRKUNGEN	32
3.11.1 Van-der-Waals-Kräfte	32
3.11.2 Dipol-Dipol-Wechselwirkungen	32
3.11.3 Wechselwirkungen zwischen Dipolmolekül und unpolarem Molekül	32
3.11.4 Wechselwirkungen zwischen unpolaren Molekülen oder Atomen	33
3.11.5 Wasserstoffbrückenbindungen	33
4 Chemisches Gleichgewicht und das	34

Massenwirkungsgesetz	34
5 Protonen und Elektronenübertragungsreaktionen	36
5.1 SÄUREN UND BASEN	36
5.2 SÄURE-BASE-GLEICHGEWICHTE	36
5.2.1 Das Oxonium-Ion	36
5.2.2 Das Ionenprodukt des Wassers und der pH-Wert	37
5.2.3 Verwendung des pH-Wertes	38
5.2.4 Korrespondierende Säuren und Basen (abgekürzt korr. Säure/Base-Paare)	38
5.2.5 Berechnung von pH-Werten	40
5.2.6 Amphoterie	41
5.2.7 Neutralisationsreaktionen	41
5.2.8 Säure-Base-Theorie nach Lewis	42
5.2.9 pH-Werte von Säuren und Basen im Alltag (Tab.5.3)	42
6 Redoxreaktionen und Oxidationszahlen	43
6.1 REDOXREAKTIONEN	43
6.2 Oxidationszahlen	44
7 Funktionelle Gruppen und Trivialnamen	45
7.1 NOMENKLATUR ALIPHATISCHER UND AROMATISCHER KOHLENWASSERSTOFFE	45
7.2 FUNKTIONELLE GRUPPEN	47
8 Die wichtigsten Elemente der Organischen Chemie	51
8.1 EINLEITUNG	51
8.2 DER WASSERSTOFF	51
8.2.1 Allgemeines	51
8.2.2 Verwendung	52
8.3 DIE HALOGENE	52
8.3.1 Allgemeines	52
8.4 DIE CHEMIE DER HALOGENE	53
8.5 DIE 6. HAUPTGRUPPE: SAUERSTOFF UND SCHWEFEL	53
8.5.1 Allgemeines	53
8.5.2 Der Sauerstoff	53
8.5.3 Der Schwefel	57
8.6 DIE 5. HAUPTGRUPPE: STICKSTOFF UND PHOSPHOR	58
8.6.1 Der Stickstoff	58
8.6.2 Der Phosphor	59
8.7 DIE 4. HAUPTGRUPPE: KOHLENSTOFF UND SILICIUM	61
8.7.1 Kohlenstoff	61
8.7.2 Einige Kohlenstoffverbindungen	63
8.7.3 Das Silicium	63
8.8 DIE METALLE	64
9 Biomoleküle	66
9.1 KOHLENHYDRATE	66
9.1.1 Bildung von Kohlenhydraten	66
9.1.2 Einteilung und Nomenklatur der Kohlenhydrate	66

9.2 BIOMOLEKÜLE – LIPIDE.....	72
9.2.1 Fette.....	72
9.2.2 Membranbildende Lipide: Phospholipide und Steroide.....	74
9.3 PROTEINE.....	76
9.3.1 Struktur von Proteinen.....	76
9.3.2 Aufbau einer Aminosäure.....	77
9.3.3 Eigenschaften der Aminosäuren.....	79
9.3.4 Peptidbindung.....	79
9.3.5 Räumliche Struktur der Proteine.....	79
9.4 NUKLEINSÄUREN.....	81
9.4.1 Die Bestandteile der Nukleotidmonomere.....	82
9.4.2 Die Struktur der Polynukleotide DNA und RNA.....	84
10 Abbildungsverzeichnis.....	85
11 Tabellenverzeichnis.....	87

Einleitung

Sicher kennen Sie Werbeslogans, die Produkte mit Eigenschaften wie „ohne Chemie“ anpreisen. Diese Aussage suggeriert, dass „Chemie“ nichts anderes als industriell hergestellte, also künstliche und giftige Substanzen sei. Das schlechte Image ist nicht nur absurd, sondern auch grundfalsch.

Die Grundlagen der Chemie in der Veterinärmedizin liefern Basiswissen über den Aufbau, die Eigenschaften und die Umwandlung von chemischen Verbindungen. Diese Verbindungen sind Moleküle oder Ionen, welche aus Atomen bestehen und durch verschiedene Wechselwirkungen zusammengehalten werden. Wechselwirkungen folgen Gesetzmäßigkeiten, die auf physikalischen Eigenschaften von Materie beruhen, und werden durch die Architektur und Ladung der beteiligten Verbindungen bestimmt. Das Verständnis dieser Grundlagen ist unabdingbar, um die intra- und extrazellulären Prozesse im Organismus erklären zu können.

Die chemischen Reaktionen, die in lebenden Systemen ablaufen und die die Grundlage der physiologischen Prozesse darstellen, werden in der Biochemie, einem Spezialgebiet der organischen Chemie, behandelt. Nur durch Kenntnis der biochemischen Reaktionen, die physiologischen und pathologischen Zuständen zugrunde liegen, können gezielt wirksame Substanzen für die Medizin entwickelt werden.

Viele Bereiche der Veterinärmedizin wie die Immunologie, die Ernährungsphysiologie und die Pharmakologie sind ohne chemische Grundkenntnisse nicht verständlich. Außerdem werden in vielen weiteren Disziplinen wie Labordiagnostik, Anatomie/Histologie, aber auch in der Stallhygiene unterschiedliche chemische Verfahren eingesetzt.

In diesem Skript werden der Atombau, die strukturgebenden Eigenschaften von chemischen Verbindungen, die wesentlichen Reaktionen organischer Verbindungen und deren funktionellen Gruppen beschrieben, die die Basis für alle Biowissenschaften und die (Veterinär-)Medizin darstellen.

1 Grundlagen

Um die Geschehnisse der Natur oder eines Experiments beschreiben zu können, benötigt man Begriffe, welche aufgrund gemeinsamer, festgelegter Eigenschaften definiert wurden.

So definiert der Begriff Molekül ein Teilchen, das aus mindestens zwei Atomen besteht, welche über eine Bindung verknüpft sind.

Die Summenformel eines Moleküls gibt zwar die Anzahl und die Art der Atome, die das Molekül aufbauen, an, nicht jedoch die genaue Anordnung der Atome und deren Bindungen.

Erst eine Strukturformel erlaubt ein Verständnis über den tatsächlichen Aufbau des Moleküls.

Summenformel	Aussage	Strukturformel (Lewis-Formel)
CH ₄	atomare Zusammensetzung	$\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H} - \text{C} - \text{H} \\ \\ \text{H} \end{array}$

Ein weiterer Teil dieser Begriffe stellt sogenannte „Größen“ dar, deren Eigenschaften quantifizierbar sind. Deren Kenntnis bildet die Grundlage der „chemischen“ Fachsprache.

Möchte man etwas quantitativ (lat. quantitas = Größe, Anzahl) beschreiben, verwendet man Größen, wobei jede Größe durch eine Bedeutung, einen Wert (Einheit) und ein Formelzeichen gekennzeichnet ist. Dadurch können die Eigenschaften und Dimensionen von Objekten bestimmt werden.

Die Basiseinheiten, aus denen sich beinahe alle anderen Einheiten ableiten, sind im Internationalen Einheitensystem festgelegt.

Man unterscheidet weiter zwischen intensiven und extensiven Größen.

- Intensive Größen sind beschreibende Parameter, unabhängig von der Größe der Stoffportion (beispielsweise Temperatur und Dichte),
- extensive hingegen nehmen mit der Menge der Stoffportion zu oder ab (beispielsweise Masse, Stoffmenge, Volumen). Der Quotient aus zwei extensiven Größen ergibt erneut eine intensive Größe (Bsp.: Quotient aus Masse und Volumen ist die Dichte).

Eine andere Form der Unterteilung betrifft die Verwendung von absoluten und relativen Größen.

- Absolute Größen, wie kg und Pa, werden auf einen Nullpunkt bezogen.
- Ein typisches Beispiel für den Einsatz relativer Größen betrifft Atommassen. Bei der Notwendigkeit, Atommassen zu vergleichen, müsste mit sehr kleinen Zahlwerten gerechnet werden (so liegen die absoluten Atommassen im Bereich von 10^{-24} bis 10^{-21} g), was naturgemäß nicht nur unpraktisch, sondern auch wenig anschaulich ist. Daher entschied man sich dafür, als Bezugsgröße die relative Atommasse u (engl. unit = Einheit) einzuführen. Dabei entspricht der Wert 1 einem Zwölftel der absoluten Masse des Kohlenstoffisotops $^{12}_6\text{C}$.

Ein Heliumatom, dessen Atomkern aus 2 Protonen und 2 Neutronen besteht, hat somit 4 atomare Masseeinheiten (= 4 u).

In der physikalischen Chemie unterscheidet man je nachdem, ob der Zustand eines Systems oder ein Prozess beschrieben wird, zwischen:

- Zustandsgrößen, wie Temperatur, Dichte und Energie, oder
- Prozessgrößen, wie Arbeit und Wärme, die den Vorgang der Änderung charakterisieren.

Größe	Formelzeichen	Wichtige Einheiten	Beziehungen
Masse	m	Kilogramm [kg]	$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$
Stoffmenge	n	Mol [mol]	$1 \text{ mol} \approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ Teilchen}$
Molare Masse	M	Gramm pro Mol [g · mol ⁻¹]	$M = m/n$
Volumen	V	Liter Kubikmeter [l] [m ³]	$1 \text{ m}^3 = 1000 \text{ l}$
Dichte	ρ	Kilogramm pro Kubikmeter [kg · m ⁻³]	$\rho = m/V$
Druck	p	Pascal Bar [Pa] [bar]	$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ $1 \text{ bar} = 101325 \text{ Pa}$
Temperatur	T	Grad Kelvin Grad Celsius [°K] [°C]	$0 \text{ °C} = 273,15 \text{ K}$
Stoffmengen-konzentration	c	Mol pro Liter [mol · l ⁻¹]	$c = n/V$

Tab. 1.1 Übersicht der Basiseinheiten

1.1 GESETZE, REGELN, MODELLE UND THEORIEN

1.1.1 Gesetze und Regeln

Naturwissenschaftliche Gesetze führen unter gleichbleibenden Bedingungen immer zu den gleichen Ergebnissen. So besagt das „Gesetz von der Erhaltung der Masse“, dass bei chemischen Reaktionen die Summe der Massen der Ausgangsstoffe gleich der Massen der Endprodukte ist. Solche Gesetze gelten allerdings nur, wenn die sogenannten Gültigkeitsbedingungen genau eingehalten werden.

Beispielsweise gilt das „Gesetz von Boyle und Mariotte“, das besagt, dass das Produkt aus Druck und Volumen konstant ist, nur dann, wenn es sich um ein „ideales Gas“ handelt (wenn z. B. davon ausgegangen wird, dass die Gasteilchen keine Anziehungs- und Abstoßungskräfte aufeinander ausüben, selbst kein Volumen annehmen usw.) und die Temperatur konstant bleibt. Diese Gesetze benötigen Fachbegriffe und Größen und werden, wenn möglich, quantitativ als mathematische Formel dargestellt.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (R = \text{die universelle Gaskonstante})$$

Etwas weniger strikt sind Regeln, die ebenfalls zum Beschreiben von Zusammenhängen verwendet werden. Ein Beispiel wäre die RGT-Regel (Reaktions-Geschwindigkeits-Temperatur-Regel), welche besagt, dass sich die Reaktionsgeschwindigkeit verdoppelt bis vervierfacht, wenn die Temperatur um etwa 10K erhöht wird. Dies ist letztlich ein experimenteller Befund (für den es zwar theoretische Erklärungen geben mag, eine präzise quantitative Begründung daraus ist jedoch nicht ableitbar).

1.1.2 Modelle

Bei chemischen Reaktionen können beispielsweise das Auflösen und das Neubilden von Bindungen nicht beobachtet werden. Selbst durch den Einsatz modernster bildgebender Verfahren bleiben diese Vorgänge für den Menschen bislang unsichtbar.

Mithilfe von Modellen können diese Geschehnisse aber in vereinfachter Form dargestellt werden. Da allerdings kein Modell alle Eigenschaften des Originals enthält und nur in bestimmten Bereichen gültig ist, gibt es häufig mehrere Modelle für dasselbe Objekt. Je näher das Modell an das Original herankommt, desto genauer und besser können die Vorhersagen geschehen, gleichzeitig wird es aber umso komplizierter und schwieriger.

Im Folgenden werden für die Darstellung eines Moleküls fünf Modelle dargestellt. Je nachdem, welchen Zusammenhang man erklären möchte, wählt man das geeignete Modell aus.

- Die Summenformel, z. B. $C_6H_{12}O_6$ für Glukose oder $NaCl$ für Kochsalz gibt an, welche Elemente wie oft in einer Verbindung vorkommen.
- Die Lewis-Formel wird weiter unten erklärt.
- Weitere Modelle sind das Kugel-Stab-Modell und das Kalottenmodell. Ersteres gibt eine vereinfachte Struktur wieder, indem die räumlichen Anordnungen der Atome im Molekül dargestellt werden. Das Kalottenmodell bietet noch mehr Informationen, da auch der Raumbedarf des Moleküls und die Größenverhältnisse der Atome dargestellt werden.

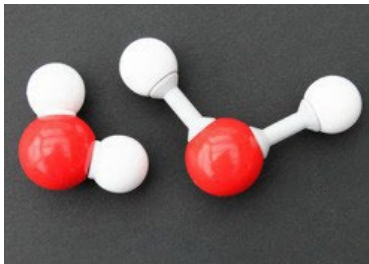


Abb. 1.1: Modelle von H_2O :

Kalottenmodell (links) und Kugel-Stab-Modell (rechts).

- Für größere Moleküle wie z. B. Proteine werden andere Modelle herangezogen, die (computergeneriert) die dreidimensionale Struktur und die Ladungsverhältnisse im Molekül darstellen.

1.1.3 Hypothesen und Theorien

Hypothesen umfassen Aussagen über Zusammenhänge, deren experimentelle Bestätigung noch ausständig ist.

Werden alle einen Teilbereich betreffende Aussagen, Definitionen, Gesetze und Modelle zu einem System vereint, spricht man von einer Theorie. Eine Theorie muss das Ergebnis eines Experiments korrekt vorhersagen. Sollte das nicht der Fall sein, gilt diese Theorie als falsifiziert.

1.2 STÖCHIOMETRIE

Die Stöchiometrie dient der Berechnung von Stoffmengen und Reaktionsgleichungen. Zur Vereinfachung wurde die Stoffmenge n als Größe eingeführt, um nicht umständlich mit den absoluten Massen von Atomen und Molekülen, welche in einem Bereich von $10^{-24}g$ bis $10^{-21}g$ liegen, rechnen zu müssen.

Die Einheit der Stoffmenge ist mol. Die Anzahl der Teilchen, die ein Mol eines Stoffes enthält, leitet sich von der Avogadro-Konstante N_A (manchmal auch als Loschmidtsche Zahl bezeichnet) ab:

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Somit wird die Stoffmenge, die aus $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen besteht, als ein mol bezeichnet. Die Folge ist, dass in gleichen Stoffmengen verschiedener Elemente auch immer die gleiche Anzahl an Teilchen enthalten ist.

Bei Angabe der Menge in mol muss immer definiert werden, um welche Teilchen es sich handelt: In 12 g Kohlenstoff sind ebenso wie in 32 g Schwefel $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen des jeweiligen Elements enthalten (die relative Atommasse von Kohlenstoff ist 12, von Schwefel 32; siehe Periodensystem).

Beispiel:

$n(\text{H}_2) = 1 \text{ mol}$ bedeutet 1 mol Wasserstoffmoleküle (nicht Wasserstoffatome!)

Allgemein gilt daher:

$$n(\text{Stoffmenge}) = \frac{m(\text{in Gramm})}{M(\text{molare Masse})}$$

Bei einer Verbindung (Molekül) kann die molare Masse (M) aus der Summe der relativen Atommassen aller Atome (siehe Periodensystem) einfach berechnet werden.

Beispiele:

- $n(\text{NaCl}) = 1 \text{ mol}$ bedeutet:

1 mol Natriumchlorid; 58,5 g dieses Salzes enthalten $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen NaCl

(rel. Atommassen (gerundet): Na (Natrium) = 23,0 u; Cl (Chlor) = 35,5 u)

- $n(\text{K}_2\text{SO}_4) = 1 \text{ mol}$ bedeutet:

1 mol Kaliumsulfat = 174 g enthalten $6 \cdot 10^{23}$ Teilchen K_2SO_4

(die relative Molekülmasse von Kaliumsulfat ergibt sich aus der Summe der rel. Atommassen (gerundet): K (Kalium) = 39 u; S (Schwefel) = 32 u; O (Sauerstoff) = 16 u;

somit: $2 \times 39 \text{ u} + 32 \text{ u} + 4 \times 16 \text{ u} = 174 \text{ u}$). Die Masse eines Mols dieses Salzes ist 174 g.

Stöchiometrische Berechnungen dienen der Berechnung chemischer Reaktionen:

Das Aufstellen einer Reaktionsgleichung beruht auf dem Gesetz der konstanten Proportionen (in einer Verbindung kommen Elemente immer im gleichen Massenverhältnis vor) sowie dem Massenerhaltungsgesetz (bei chemischen Reaktionen bleibt die Gesamtmasse der beteiligten Stoffe erhalten).

Frage:

Wieviel Gramm Natriumsulfat (Na_2SO_4) entsteht bei der Neutralisation von 9,8 g Schwefelsäure (H_2SO_4) mit NaOH (Natronlauge)?

Reaktionsgl.: $\text{H}_2\text{SO}_4 + 2 \text{NaOH} \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$

Gesucht: $m(\text{Na}_2\text{SO}_4)$

Berechnung:

- 1) $m(\text{H}_2\text{SO}_4) = 9,8 \text{ g}$
- 2) $M(\text{H}_2\text{SO}_4) = 98 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$;
 $M(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 142 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Berechnung:

$$m/M = n: 9,8 \text{ g} / 98 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 0,1 \text{ mol}$$
$$m(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 0,1 \text{ mol} \cdot 142 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1} = 14,2 \text{ g}.$$

Ergebnis:

Bei der vollständigen Umsetzung von 9,8 g Schwefelsäure mit Natronlauge werden 14,2 g Natriumsulfat gebildet.

2 Atombau und Periodensystem

2.1 Bausteine

Das kleinste, chemisch nicht weiter zerlegbare Elementarteilchen nennt man Atom. Atome bestehen aus einem positiv geladenen Atomkern, der sich wiederum aus den positiv geladenen Protonen und den neutralen Neutronen aufbaut, sowie der negativ geladenen Elektronenhülle.

Atome bestehen aus dem positiv geladenen Atomkern, der fast die gesamte Masse des Atoms ausmacht und einer negativ geladenen Elektronenhülle.

Die Kernbestandteile Protonen und Neutronen nennt man Nukleonen. Der Kern bestimmt die atomare Stabilität oder die Radioaktivität und hat nur einen sehr geringen Einfluss auf das chemische Verhalten. Für dieses ist im Wesentlichen die Atomhülle, sprich die Verteilung der Elektronen darin, verantwortlich.

Die Atomhülle wird aus den negativ geladenen Elektronen aufgebaut und bestimmt den Radius eines Atoms. Der Radius eines Atoms beträgt in etwa 10^{-10} m, im Vergleich dazu liegt der Durchmesser des Atomkerns bei etwa 10^{-15} m.

Protonen und Neutronen haben näherungsweise die relative Masse 1. Da die Masse der Nukleonen etwa 1836-mal größer ist als die eines Elektrons, bedeutet dies, dass sich die Masse eines Atoms de facto auf den Atomkern konzentriert.

Die Kernladungszahl Z eines Atoms gibt die Anzahl der Protonen im Kern an. Sie entspricht weiter der Ordnungszahl im Periodensystem und charakterisiert damit ein chemisches Element. Das bedeutet, dass man einen Stoff, der sich aus Atomen mit gleicher Kernladungszahl zusammensetzt, als Element bezeichnet.

Ein ungeladenes Atom hat immer die gleiche Anzahl Elektronen und Protonen. Aus der Summe der Protonen und Neutronen ergibt sich die Massenzahl A .

Kernladungszahl Z = Anzahl der Protonen
Massenzahl A = Kernladungszahl Z + Anzahl der Neutronen N

Bei der Darstellung eines Elements schreibt man die Massenzahl links oben vor das Elementsymbol, die Kernladungszahl links unten.

$^{12}_6\text{C}$ Kernladungszahl des Kohlenstoffs 6, Massenzahl des Isotops 12;
das bedeutet: sechs Protonen, sechs Neutronen im Kern

Obwohl alle Atome eines Elements immer dieselbe Anzahl an Protonen und somit die gleiche Kernladungszahl (Ordnungszahl) besitzen, kann die Neutronenzahl im Kern variieren. Folglich existieren Elemente mit gleichen Ordnungszahlen aber unterschiedlichen Massenzahlen (unterschiedliche Anzahl an Neutronen). Diese nennt man Isotope. Isotope unterscheiden sich in ihrer Atommasse, jedoch nur geringfügig in ihren chemischen Eigenschaften, da diese überwiegend von der Elektronenhülle bestimmt werden.

Beispiele für Wasserstoff(-isotope):

^1_1H (Protium) Kernladungszahl des Wasserstoffs ist 1, Massenzahl des Isotops 1;
das bedeutet: 1 Proton, 0 Neutronen im Kern

^2_1H (Deuterium) Kernladungszahl des Wasserstoffs ist 1, Massenzahl des Isotops 2;
das bedeutet: 1 Proton, 1 Neutron im Kern (dieses Isotop wird als Deuterium bezeichnet)

^3_1H (Tritium) Kernladungszahl des Wasserstoffs ist 1, Massenzahl des Isotops 3;
das bedeutet: 1 Proton, 2 Neutronen im Kern (dieses Isotop wird als Tritium bezeichnet)

Nimmt ein Atom Elektronen auf oder gibt Elektronen ab und ist folglich elektrisch geladen, spricht man von Ionen. Die Ladung ergibt sich aus der Summe der vorhandenen positiven Kernladung (Protonen) und den negativen Ladungen der Elektronen in der Hülle. Bei der Darstellung schreibt man die Ladungszahl rechts oben nach dem Elementsymbol, die Atomzahl rechts unten.

2.1.1 Stabilität von Atomkernen und radioaktive Strahlung

Für den Zusammenhalt des Atomkerns, d.h. der Nukleonen, ist die nur über kurze Distanzen wirkende Kernkraft von essentieller Bedeutung. Die Kernkraft muss stärker sein als die elektromagnetische Abstoßung der gleichgeladenen Protonen. Einen stabilisierenden Effekt auf den Atomkern üben die Neutronen aus. Das Verhältnis der Nukleonen bestimmt die Stabilität bzw. Instabilität, was einen radioaktiven Zerfall zur Folge hat. Es hat sich herausgestellt, dass Atomkerne mit geraden Protonen- und Neutronenzahlen stabiler sind als solche mit ungeraden.

Beim radioaktiven Zerfall wandeln sich instabile Atomkerne spontan unter Aussendung einer Strahlung in stabilere, energieärmere Kerne um.

Diese radioaktive Strahlung lässt sich in drei verschiedene Arten einteilen:

- (α) Alpha – Strahlung
- (β) Beta – Strahlung (γ)
- Gamma – Strahlung

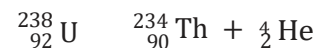
Diese drei Arten von radioaktiver Strahlung unterscheiden sich fundamental in einer Reihe von Eigenschaften:

- Ablenkung im elektrischen Feld,
- Reichweite,
- Fähigkeit, Atome und Moleküle zu ionisieren und Materie zu durchdringen.

α - Strahlung

Beim α -Zerfall werden Teilchen ausgesandt, die aus 2 Protonen und 2 Neutronen bestehen und daher einem Heliumkern entsprechen. Die α -Teilchen haben nur eine sehr geringe Reichweite (wenige Zentimeter in der Luft; Papier können sie nicht durchdringen) und können aufgrund ihrer positiven Ladung im elektromagnetischen Feld abgelenkt werden. Man zählt die α -Strahlen zu den Korpuskularstrahlen.

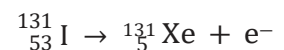
Ein Beispiel für einen α -Strahler ist der Zerfall des 238-Uranisotops:



β - Strahlung

Ebenfalls zu den Korpuskularstrahlen gehören die β -Strahlen, die Elektronen darstellen und mit einer Geschwindigkeit von $130\,000\text{ km/s}$ abgegeben werden. Dabei entsteht im Atomkern aus einem Neutron ein Proton. Sie besitzen eine größere Reichweite als α -Strahlen und können bereits 1 cm dickes Aluminiumblech durchdringen.

Ein Beispiel für einen β -Strahler ist der Zerfall des 131-Iodisotops:



Beim β^{+} -Zerfall werden Positronen emittiert. Im Atomkern hat dies zur Konsequenz, dass ein Proton in ein Neutron umgewandelt wird.

Positronenemittenten werden in der Diagnostik in PET-Scannern (= Positronen-Emissions-Tomographie) eingesetzt. Typische Radionuklide, die für die PET-Diagnostik eingesetzt werden, sind folgende Isotope: ${}^{68}\text{Ga}$, ${}^{18}\text{F}$, ${}^{11}\text{C}$.

γ - Strahlung

γ -Strahlen sind elektromagnetische Wellen hoher Energie und extrem kurzer Wellenlänge. Sie werden nicht im elektrischen oder magnetischen Feld abgelenkt und können Materie tief durchdringen. γ -Strahlung kann gleichzeitig im Zuge eines α - oder β -Zerfalls auftreten, vor allem dann, wenn daraus ein instabiler Atomkern entsteht.

Die beim radioaktiven Zerfall entstehenden Tochternuklide sind häufig selbst radioaktiv und zerfallen so lange weiter, bis ein stabiles Isotop entstanden ist. Man spricht daher von radioaktiven Zerfallsreihen. Die Geschwindigkeit eines radioaktiven Zerfalls folgt einem Gesetz 1. Ordnung. Dies ist ein Begriff aus der Kinetik und besagt für diesen Fall, dass prozentual pro Zeiteinheit immer dieselben Mengen an radioaktiven Atomkernen zerfallen, die Bildung des Zerfallsprodukts also proportional zur Konzentration des Ausgangsprodukts ist.

Halbwertszeit

Die Halbwertszeit gibt an, nach welcher Zeit die Anzahl der Radionuklide auf die Hälfte gesunken ist und stellt eine charakteristische Konstante dar. Die Halbwertszeit gehorcht rein statistischen Gesetzen. Dies bedeutet, dass sie weder durch chemische oder physikalische Methoden beeinflusst werden kann.

Diese Eigenschaft macht man sich im Rahmen der Radiokarbonmethode zur Altersbestimmung fossiler Funde zu Nutze. Diese Methode beruht auf der Tatsache, dass atmosphärischer Stickstoff durch kosmische Strahlung in einem geringen Anteil in das radioaktive Kohlenstoffisotop umgewandelt wird, welches eine Halbwertszeit von 5730 Jahren hat und von lebenden Organismen aufgenommen wird. Nach dem Absterben eines Organismus wird kein weiterer Kohlenstoff aufgenommen, sodass ab diesem Zeitpunkt der Anteil an $^{14}_6\text{C}$ sich alle 5730 Jahre halbiert. Aufgrund der Bestimmung des $^{14}_6\text{C}$ -Anteils in Fossilien lässt sich somit eine Altersbestimmung durchführen.

2.2 ATOMBAU UND PERIODENSYSTEM

2.2.1 Rutherford und Bohr

Eines der ersten Experimente, die eine nähere Vorstellung über den Atombau lieferten, war der Rutherfordsche Streuversuch.

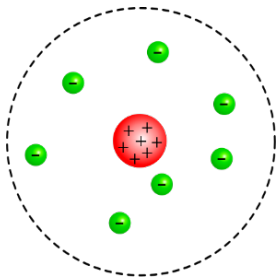


Abb. 2.1: Rutherfordsches Atommodell

Bei diesem Versuch wurde eine Goldfolie mit α -Teilchen beschossen. Ein um diese Goldfolie angebrachter Detektor registrierte die auftreffenden α -Teilchen. Auffallend bei diesem Experiment war, dass nahezu alle Teilchen die Goldfolie durchdrangen, ohne abgelenkt zu werden. Lediglich ein sehr kleiner Anteil (ca. 1:100000) wurde entweder reflektiert oder abgelenkt.

Aus dieser Beobachtung zog Rutherford den Schluss, dass dies nur möglich sein könne, wenn sich nahezu die gesamte Masse des positiven Atomkerns auf sehr kleinem Raum befindet. Dies war ein fundamentaler Erkenntnisgewinn über den Atomaufbau.

Er meinte allerdings auch, dass die Elektronen auf kreisförmigen bzw. elliptischen Bahnen um den Atomkern kreisen. Die dafür nötigen Kräfte, die elektrostatische Anziehungskraft und die Zentrifugalkraft, sollten dabei ein Gleichgewicht bilden.

Damit hätte er das Modell eines Sonnensystems mit Planeten, die die Sonne umkreisen, auf Atome übertragen. Diese Ansicht war allerdings nicht haltbar, da man sehr bald zeigen konnte, dass nach diesem Modell die kreisenden Elektronen ständig Energie in Form von Licht abstrahlen müssten und letztlich in kurzer Zeit in den Atomkern „fallen“ würden.

Nils Bohr, Schüler Rutherfords, stellte ein Atommodell auf, das dem Rutherfordschen im Grunde zwar ähnlich war, wobei er aber von den Gesetzen der klassischen Physik Abstand nahm.

Folgende Postulate wurden formuliert:

- Elektronen können den Atomkern auf stabilen konzentrischen Bahnen umkreisen, ohne Strahlung abzugeben und dadurch Energie zu verlieren.
- Die Anzahl der Bahnen (Elektronenschalen) ist begrenzt. Jede dieser Bahnen entspricht einem Energieniveau E der Elektronen. Je größer der Radius der Elektronenschale, desto höher das Energieniveau der darauf befindlichen Elektronen.
- Nur beim Übergang eines Elektrons von einer stationären Bahn auf eine andere wird Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung emittiert oder absorbiert.

Dies bedeutet, dass jede Elektronenschale einen bestimmten Energiezustand des Elektrons beschreibt. Die einzelnen stationären Zustände sind durch die Hauptquantenzahl n beschrieben, wofür nur ganze Zahlen ($n = 1, 2, 3, \dots$) eingesetzt werden dürfen. Jede Bahn besitzt somit einen Wert von nn und deshalb ein bestimmtes Energieniveau.

Die Hauptenergieniveaus (Elektronenschalen) werden außerdem mit den Buchstaben K, L, M, N usw. bezeichnet und können immer nur von einer gewissen Anzahl Elektronen besetzt werden, wobei s, p und d Bezeichnungen der Orbitale sind (s. u.).

Die hochgestellte Zahl gibt die maximale Anzahl an Elektronen in den betreffenden Orbitalen an. Dieses Schalenmodell wurde in weiterer Folge von Sommerfeld erweitert:

Neben den Hauptniveaus findet man bei höheren Atomen auch Unterniveaus, welche hinsichtlich ihrer Energie ähnlich, aber letztlich nicht ganz gleich sind. Sie werden als s -, p -, d - und f -Zustände beschrieben. Jene Unterniveaus sind durch die Nebenquantenzahl (Orbitalzahl) l gekennzeichnet, welche ebenfalls ganze Zahlen sind und immer von der Hauptquantenzahl abhängen. l kann nur Werte von $n - 1$ annehmen. Sie beschreibt letztlich die räumliche Verteilung der Ladungsdichte und damit die Gestalt des betreffenden Orbitals. Diese kann entweder kugelförmig (s -Orbital) oder hantelförmig (p -Orbital) sein oder eine noch komplexere Form (d - und f -Orbitale) einnehmen.

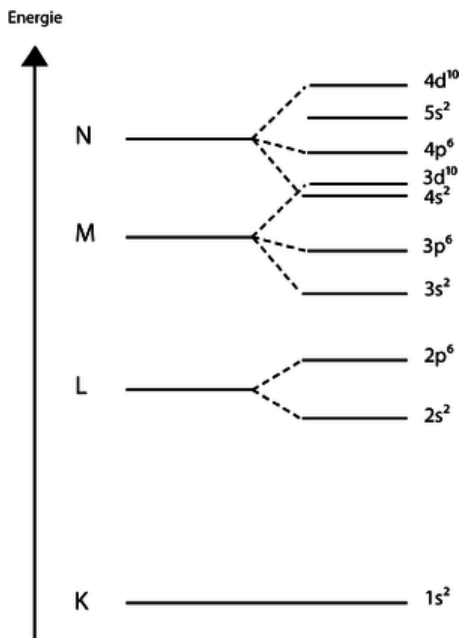


Abb. 2.2: Energieniveaus-Schema

Obwohl das Modell nach Bohr und Sommerfeld immer noch teilweise der klassischen Physik widerspricht, gilt es nach wie vor als eminent wichtiges Modell zur Beschreibung der Atome. Man erkannte, dass die Gesetze der klassischen Physik für Atome nicht vollständig gültig sind. Ein Meilenstein war die von Heisenberg entwickelte Unschärferelation. Er fand heraus, dass sich Aufenthaltsort (x) und Impuls (p) eines Elektrons nicht gleichzeitig exakt bestimmen lassen.

Somit können Elektronen nicht durch stabile Bahnkurven beschrieben werden, sondern es lassen sich nur Aufenthaltswahrscheinlichkeiten bestimmen. Dieser wahrscheinliche Aufenthaltsort kann als negative Ladungswolke veranschaulicht werden – ein Orbital ist somit ein Bereich hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit.

Im Vergleich zum Bohrschen Modell befinden sich die Elektronen also nicht in exakten Bahnen, sondern es werden beim modernen quantenmechanischen Modell nur die wahrscheinlichen Aufenthaltsräume bestimmt (man spricht auch von Ladungswolke).

2.2.2. Orbitale und Quantenzahlen

Orbitale

Mithilfe von Orbitalen kann der Raum, in dem sich der wahrscheinliche Aufenthaltsort von Elektronen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% befindet, dargestellt werden.

Die Kenntnis über die Atomorbitale ermöglichte erst ein Verständnis über die Atombindungen, den Bau und die Geometrie von Molekülen; und selbst viele makroskopische Eigenschaften sind nur durch die genaue Kenntnis der Orbitale möglich.

Orbitale werden durch vier Quantenzahlen beschrieben:

- **Hauptquantenzahl n**

Die Hauptquantenzahl ($n = 1, 2, 3, \dots$) beschreibt das Hauptenergieniveau und den durchschnittlichen Abstand zwischen Elektron und Atomkern.

Je kleiner n , desto näher befindet sich das Elektron beim Atomkern.

Je größer n , desto mehr Platz hat das Elektron zur Verfügung. Dadurch wird die Elektronendichte geringer, das Volumen der Elektronenwolke größer. Zustände gleicher Hauptquantenzahl bilden eine Schale.

- **Nebenquantenzahl l**

Die Nebenquantenzahl ($l = n - 1$) beschreibt das Unterniveau eines Elektrons und bestimmt die räumliche Verteilung seiner Ladungsdichte. Sie gibt somit Auskunft über die Form des Orbitals, welche zum Beispiel kugelförmig (s -Orbitale) oder hantelförmig (p -Orbitale) sein kann.

Zustände gleicher Nebenquantenzahl bilden eine Unterschale (s -, p -, d - oder f -Orbitale). s -Orbitale besitzen eine Nebenquantenzahl von $l = 0, 1, 2, \dots (n - 1)$. Ein Elektron mit der Nebenquantenzahl 0 ist also ein Elektron eines s -Orbitals.

- **Magnetquantenzahl m**

Die Magnetquantenzahl ($m = -l, -l + 1, \dots, 0, \dots, +l - 1, +l$) beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Orbital und seiner Orientierung im Raum und somit das Verhalten eines Elektrons im Magnetfeld. Sie ist besonders wichtig bei p - und d -Orbitalen (siehe Abb. 2.3 b, Die Magnetquantenzahl beschreibt, in welcher der drei p -Hanteln sich ein p -Elektron mit großer Wahrscheinlichkeit befindet).

- **Spinquantenzahl s**

Die Spinquantenzahl ($s = +\frac{1}{2}$ und $s = -\frac{1}{2}$) gibt die Richtung des Elektronenspins an,

welcher ein Magnetisches Feld ausbildet, das sich entweder parallel oder antiparallel zu einem äußeren Magnetfeld einstellen kann.

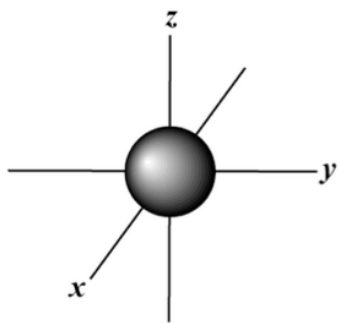


Abb. 2.3 a: Kugelförmiges s-Orbital

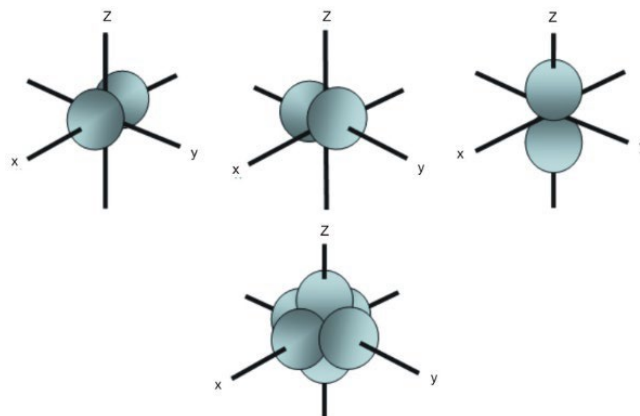


Abb. 2.3 b: Die drei hantelförmigen p-Orbitale

Durch die Kombination der verschiedenen Quantenzahlen kann der Elektronenzustand eines Atoms dargestellt werden. Das Ziel der Verteilung der Elektronen in den Atomorbitalen ist immer, einen energetisch stabilen, sprich einen möglichst niedrigen, Energiezustand zu erreichen.

Die Energie nimmt mit steigender Hauptquantenzahl bzw. steigendem Abstand zwischen den Elektronen und dem positiv geladenen Atomkern zu. Deshalb werden zuerst die Orbitale mit dem niedrigsten Energieniveau besetzt. In weiterer Folge werden entsprechend dem Aufbauprinzip der energetischen Reihenfolge (Bild) die weiteren Energieniveaus besetzt.

Wichtige Prinzipien bezüglich der Besetzung von Atomorbitalen sind das Pauli-Prinzip und die Hundsche Regel.

- Nach Pauli darf jedes Orbital nur mit zwei Elektronen unterschiedlichen Spins (s) besetzt werden. Es dürfen zwei Elektronen nur in drei Quantenzahlen (n , l und m) übereinstimmen. Sollte dies der Fall sein, dann müssen sie sich zumindest im Spin unterscheiden.
- Die Hundsche Regel verlangt, dass Orbitale gleicher Energie zunächst jeweils mit nur einem Elektron besetzt werden. Erst anschließend darf das Orbital mit einem zweiten Elektron mit entgegengesetztem Spin besetzt werden. Durch diese Regeln kommt man zur Elektronenkonfiguration von Atomen und Ionen. Zur Beschreibung dieser Elektronenkonfiguration eines Atoms wird die Elektronenzahl eines Orbitals als Index rechts oben an das Orbitalsymbol geschrieben. Vorgestellt steht die Hauptquantenzahl, um das Energieniveau zu beschreiben.

Beispiel: $1s^2$, $2s^2$ und $2p^2$ bedeutet, dass in den K - und L -Schalen die beiden s -Orbitale mit je zwei Elektronen und zwei der drei p -Orbitale der L -Schale mit je einem Elektron besetzt sind. Diese Elektronenkonfiguration findet sich bei Atomen des Elements Kohlenstoff, welches im elementaren Zustand sechs Elektronen aufweist. Abb. 2.4 zeigt eine andere Darstellung der Elektronen des Kohlenstoffatoms, die die unterschiedlichen Energieniveaus der Elektronen berücksichtigt.

Für die chemischen Eigenschaften eines Atoms sind hauptsächlich die äußeren, meist unvollständig besetzten Orbitale von größter Bedeutung. Sie werden Valenzelektronen genannt und sind wichtig für die Bildung einer Atombindung.

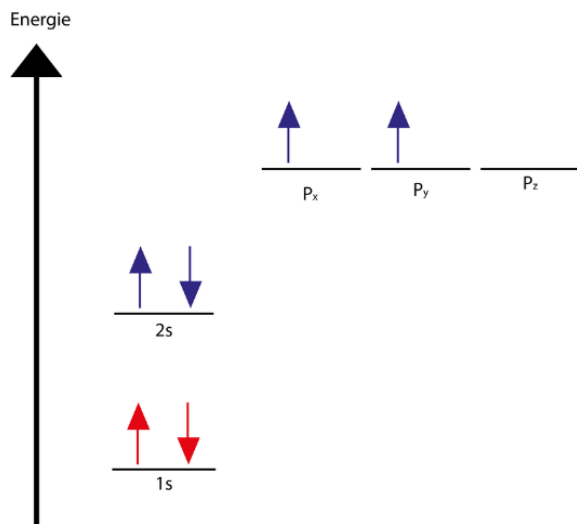


Abb. 2.4: Aus der Darstellung geht die Elektronenbesetzung im C-Atom gemäß dem Pauli-Prinzip und der Hundschen Regel klar hervor. Jeder Pfeil steht für ein Elektron.

2.2.3 Das Periodensystem der Elemente nach Mendelejew (PSE)

Das Periodensystem soll den Aufbau der Elemente und deren Eigenschaften in einen sinnvollen Zusammenhang darstellen. Dabei werden die Elemente gemäß steigender Protonenzahl (Ordnungszahl = Kernladungszahl) in horizontal gelegene Perioden und vertikal angeordnete Gruppen eingeteilt.

Alle Atome gleicher Kernladung (gleiche Anzahl an Protonen) bilden ein Element und stehen somit an selber Stelle im PSE. Die Perioden entsprechen der Zahl der Elektronenschalen.

Die Hauptquantenzahl der Valenzschale (äußerste Schale) entspricht der jeweiligen Periodenzahl und gibt somit die Zahl der besetzten Schalen nach Bohr an.

Innerhalb der 18 Gruppen, welche senkrecht angeordnet sind, werden die Elemente nach ihren Gruppennummern geordnet. Die Gruppennummer entspricht der Anzahl der Valenzelektronen (Außenelektronen) eines Elements, welche hauptsächlich für die chemischen Eigenschaften verantwortlich sind. Daher haben Elemente einer Gruppe ähnliche Eigenschaften.

Man spricht von Haupt- und Nebengruppen und sie werden mit römischen Ziffern gekennzeichnet. Für die Hauptgruppen findet man auch Trivialnamen:

- Alkalimetalle für die 1. HG,
- Erdalkalimetalle (2. HG),
- Borgruppe (3. HG),
- Kohlenstoffgruppe (Tetrele, Tattogene; 4. HG),
- Stickstoffgruppe (Pentetele, Pnikogene; 5. HG),
- Chalkogene (Erzbildner; 6. HG),
- Halogene (7. HG) und
- Edelgase (8. HG).

Die Hauptgruppenelemente sind auf 8 Hauptgruppen aufgeteilt. Es kommen Metalle, Halbmetalle und Nichtmetalle vor. Entsprechend ihrer Elektronenkonfiguration (Verteilung der Elektronen auf die Orbitale) enthalten die Hauptgruppenelemente des *s* - bzw. *p* -Blocks ausschließlich *s* - bzw. *p* -Elektronen als Valenzelektronen.

Periodensystem der Elemente

Periode

↓

1

I

II

III

IV

V

VI

VII

Legende

Ordnungszahl

Atommasse in u

Kein stabiles Isotop

Elektronen negativ nach Pauli

Bei 20°C ...

Hf fest

Hg flüssig

He gasförmig

Metalle

Halbmetalle

Nichtmetalle

Dichte in g/cm³ (bei Gasen in g/l)

Elementname

Gruppe

13 14 15 16 17 18

1 H 1,01 Wasserstoff	2 He 4,00 Helium																
3 Li 6,94 Lithium	4 Be 9,01 Beryllium																
5 Na 22,99 Natrium	6 Mg 24,31 Magnesium																
7 K 39,10 Kalium	8 Ca 40,08 Calcium	9 Sc 44,96 Scandium	10 Ti 47,87 Titan	11 V 50,94 Vanadium	12 Cr 52,00 Chrom	13 Mn 54,94 Mangan	14 Fe 55,85 Eisen	15 Co 58,93 Cobalt	16 Ni 58,69 Nickel	17 Cu 63,55 Kupfer	18 Zn 65,38 Zink	19 Ga 69,72 Gallium	20 Ge 72,63 Germanium	21 As 74,92 Arsen	22 Se 78,97 Selen	23 Br 79,90 Brom	24 Kr 83,80 Krypton
25 Rb 85,47 Rubidium	26 Sr 87,62 Strontium	27 Y 88,91 Yttrium	28 Zr 91,22 Zirkonium	29 Nb 92,91 Niob	30 Mo 95,94 Molybdän	31 Tc 98 Technetium	32 Ru 101,07 Ruthenium	33 Rh 101,07 Rhodium	34 Pd 106,42 Palladium	35 Ag 107,87 Silber	36 Cd 112,41 Cadmium	37 In 114,82 Indium	38 Sn 118,71 Zinn	39 Sb 121,76 Antimon	40 Te 127,60 Tellur	41 I 126,90 Iod	42 Xe 131,29 Xenon
43 Cs 132,91 Cäsium	44 Ba 137,33 Barium	45 La 138,91 Lanthan	46 Hf 178,49 Hafnium	47 Ta 180,95 Tantal	48 W 183,84 Wolfram	49 Re 186,21 Rhenium	50 Os 190,23 Osmium	51 Ir 192,22 Iridium	52 Pt 195,08 Platin	53 Au 196,97 Gold	54 Hg 200,59 Quecksilber	55 Tl 204,38 Thallium	56 Pb 207,2 Blei	57 Bi 208,98 Bismut	58 Po 209 Polonium	59 At 210 Astat	60 Rn 222 Radon
51 Fr 223 Francium	52 Ra 226 Radium	53 Ac 227 Actinium	54 Rf 261 Rutherfordium	55 Db 262 Dubnium	56 Sg 266 Seaborgium	57 Bh 264 Bohrium	58 Hs 277 Hassium	59 Mt 268 Meitnerium	60 Ds 271 Darmstadtium	61 Rg 272 Roentgenium	62 Cn 285 Copernicium	63 Nh 286 Nihonium	64 Fl 289 Flerovium	65 Lv 293 Livermorium	66 Ts 294 Tennessium	67 Og 294 Oganesson	
Lanthanoide		58 Ce 140,12 Cer	59 Pr 140,91 Praseodym	60 Nd 144,24 Neodym	61 Pm ~145 Promethium	62 Sm 150,36 Samarium	63 Eu 151,96 Europium	64 Gd 157,25 Gadolinium	65 Tb 158,93 Terbium	66 Dy 162,50 Dysprosium	67 Ho 164,93 Holmium	68 Er 167,26 Erbium	69 Tm 168,93 Thulium	70 Yb 173,05 Ytterbium	71 Lu 174,97 Lutetium		
Actinoide		90 Th 232,04 Thorium	91 Pa 231,04 Protactinium	92 U 238,03 Uran	93 Np ~237 Neptunium	94 Pu ~244 Plutonium	95 Am ~243 Americium	96 Cm ~247 Curium	97 Bk ~247 Berkelium	98 Cf ~251 Californium	99 Es ~252 Einsteinium	100 Fm ~257 Fermium	101 Md ~258 Mendelevium	102 No ~259 Nobelium	103 Lr ~262 Lawrencium		

Abb. 2.5: Das Periodensystem der Elemente

Zwischen den beiden Hauptgruppen findet man die Nebengruppen, auch *d*-Block genannt. Die Elemente, auch Übergangselemente genannt, enthalten Valenzelektronen in *d*-Orbitalen. Alle Nebengruppenelemente sind Metalle.

Zusätzlich gibt es auch noch die inneren Übergangselemente, die in den Gruppen der Lanthanoide und Actinoide zusammengefasst sind. Die Eigenschaften innerhalb der Nebengruppen ändern sich wesentlich schwächer als bei den Hauptgruppenelementen.

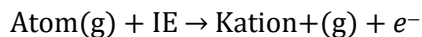
2.2.4 Periodische Eigenschaften der *s*- und *p*-Blockelemente (Hauptgruppenelemente)

Ein Beispiel dafür wäre der Atomradius der Hauptgruppenelemente: Dieser nimmt innerhalb einer Periode ab, weil die Kernladung zunimmt, die Zahl der Elektronenschalen aber gleichbleibt. Die Elektronen werden durch eine höhere Kernladung stärker angezogen und die Atome schrumpfen bzw. die Radien werden kleiner. Innerhalb einer Gruppe nimmt der Radius von oben nach unten zu, da es jeweils zum Aufbau einer neuen Elektronenschale kommt.

Durch Aufnahme oder Abgabe von Elektronen entstehen aus Atomen Ionen. Dadurch verändert sich der Radius. So ist der Ionenradius von Kationen (positiv geladene Ionen) kleiner als der entsprechende Atomradius, da sich die Zahl der Elektronen verringert und der Kern diese stärker anziehen kann. Bei Anionen (negativ geladene Ionen) steigt die Zahl der Elektronen, die Anziehungskraft des Kerns sinkt, somit steigt der Ionenradius im Vergleich zum Atomradius. Allgemein nehmen die Ionenradien innerhalb einer Gruppe von oben nach unten zu.

2.2.5 Ionisierungsenergie

Ionisierung bedeutet die Entfernung eines Elektrons aus der Hülle eines Atoms im Gaszustand. Die Energie, die dafür nötig ist, bezeichnet man als 1. Ionisierungsenergie (IE).



Die Ionisierungsenergie ist eine charakteristische periodische Eigenschaft und ist abhängig von dem Energiegehalt des jeweiligen Elektrons bzw. seinem Abstand zum Atomkern. Je höher der Energiegehalt (d. h. je größer der Abstand zw. Atomkern und Elektron ist), desto geringer ist die Ionisierungsenergie. Im Allgemeinen nimmt die Ionisierungsenergie mit steigender Kernladung zu und mit zunehmendem Atomradius ab.

Das bedeutet, dass die Ionisierungsenergie innerhalb einer Periode von links nach rechts tendenziell zunimmt (Kernladung steigt, Atomradius nimmt ab). Innerhalb einer Gruppe nimmt die IE mit steigender Ordnungszahl von oben nach unten tendenziell ab. Die Kernladung wird durch die Zahl der Schalen zunehmend abgeschirmt, wodurch die äußeren Elektronen tendenziell leichter abgegeben werden.

Metalle besitzen deshalb eine relativ niedrige, Nichtmetalle eine relativ hohe Ionisierungsenergie.

Edelgase (8. HG) besitzen die höchste Ionisierungsenergie. Sie beschreiben einen energetisch sehr stabilen Zustand. Elemente der 1. HG (Alkalimetalle) besitzen die niedrigste Ionisierungsenergie.

Durch Abgabe eines Elektrons erreichen sie die angestrebte stabile Edelgaskonfiguration (volle äußere Elektronenschale).

2.2.6 Elektronegativität

Ein chemischer Bindungstyp ist die kovalente Bindung (siehe unten). Bei einer kovalenten Bindung zwischen zwei gleichen Atomen erfolgt eine symmetrische Aufteilung des bindenden Elektronenpaares. Kommt es allerdings zu einer Bindung zwischen zwei unterschiedlichen Atomen, so wird das Bindungselektronenpaar unterschiedlich stark, entsprechend der effektiven Kernladung, von den jeweiligen Partnern angezogen. Das Elektronenpaar verschiebt sich dann zu dem Atom mit der größeren Kernladung. In Folge trägt dieses dadurch eine negative Partialladung.

Die Elektronegativität ist somit ein Maß für jene Fähigkeit eines Atoms, innerhalb einer kovalenten Bindung das bindende Elektronenpaar anzuziehen. Sie ist vom Anteil der positiven Kernladung abhängig und nimmt innerhalb einer Periode des PSE von links nach rechts mit steigender Protonenzahl (steigende Kernladung) zu und innerhalb einer Gruppe von oben nach unten mit steigendem Atomradius und damit zunehmender Abschirmung des Kerns ab.

Die Elektronegativität ist ein Maß für die Fähigkeit eines Atoms, ein bindendes Elektronenpaar an sich zu ziehen.

Die höchste EN besitzt Fluor (EN=4,0), die niedrigste besitzt Caesium (EN=0,7).

Die Elektronegativitätsdifferenz zwischen zwei Bindungspartnern bestimmt daher auch die Bindungspolarität und damit die Höhe des Ionenanteils einer Bindung.

2.2.7 Metall- und Nichtmetallcharakter

Gemäß ihrer elektrischen Leitfähigkeit wurden die Elemente in Metalle, Halbmetalle und Nichtmetalle eingeteilt.

- **Metalle** sind gute elektrische Leiter. Ihre Leitfähigkeit nimmt mit ansteigender Temperatur ab. Sie weisen eine niedrige Ionisierungsenergie und deshalb eine hohe Tendenz zur Bildung von Kationen auf. Ihre Oxide reagieren in Wasser basisch. Auch alle Elemente der Nebengruppen sind Metalle.
- **Nichtmetalle** werden auch Isolatoren genannt und leiten folglich keinen elektrischen Strom. Sie besitzen eine tendenziell hohe Elektronegativität und bilden häufig Anionen und Moleküle aus. Ihre Oxide reagieren sauer.
- **Halbmetalle** wie Bor, Silicium, Germanium, Arsen und Tellur sind nur schwache elektrische Leiter. Ihre Leitfähigkeit nimmt allerdings mit steigender Temperatur zu. Entsprechend ihrer Namensgebung bilden sie den Übergang zwischen metallisch und nichtmetallisch.

Innerhalb einer Periode nimmt der Metallcharakter von links nach rechts ab, in der Gruppe von oben nach unten hin zu (umgekehrt gilt es für die Nichtmetalle).

Diese Eigenschaften können jedoch nicht immer streng getrennt werden. So kommen Phosphor und auch Zinn in mehreren Formen vor.

Die Reaktivität gegenüber Wasser steigt mit dem Metallcharakter.

2.2.8 Übergangselemente

Besitzen Atome Energieniveaus mit gleicher Hauptquantenzahl n , so besetzen die Elektronen die Orbitale immer in folgender Reihenfolge: s, p, d, f

Bei wachsendem Kernabstand wird durch die steigende Anzahl an besetzten inneren Orbitalen die Kernabschirmung immer größer und damit der Energieunterschied zwischen den höheren Energieniveaus immer geringer. Das kann sogar dazu führen, dass ein s -Orbital mit höherer Hauptquantenzahl energetisch niedriger liegt als ein d - oder f -Orbital niedrigerer Hauptquantenzahl. Die Besetzung erfolgt immer in energetischer Reihenfolge.

Bei den Übergangsmetallen (Nebengruppenelemente, d -Blockelemente) sind sowohl die äußerste als auch die zweitäußerste Schale nicht voll besetzt. Die dazukommenden Elektronen werden in die d -Orbitale der zweitäußersten Schale eingebaut. Das chemische Verhalten wird daher nicht nur von den s -Elektronen der äußersten Schale, sondern auch von den d -Elektronen bestimmt.

Besonders stabil sind halb- oder vollständig besetzte d -Schalen.

Der Unterschied zwischen Eigenschaften innerhalb der d -Blockelemente ist naturgemäß wesentlich geringer als bei den s - und p -Blockelementen. Auch die Ionisierungsenergien sind vergleichsweise niedrig. Da die Valenzelektronen sehr leicht abgegeben werden, sind alle d -Blockelemente Metalle. Durch die $3d$ -Elektronen werden die $4s$ -Elektronen stärker gegen den Atomkern abgeschirmt, weswegen diese als erste abgegeben werden. Das führt zu der häufig resultierenden Zweiwertigkeit (Cu^{2+} , Mn^{2+} , ...). Bei den dd -Blockelementen variieren auch häufig die Oxidationsstufen.

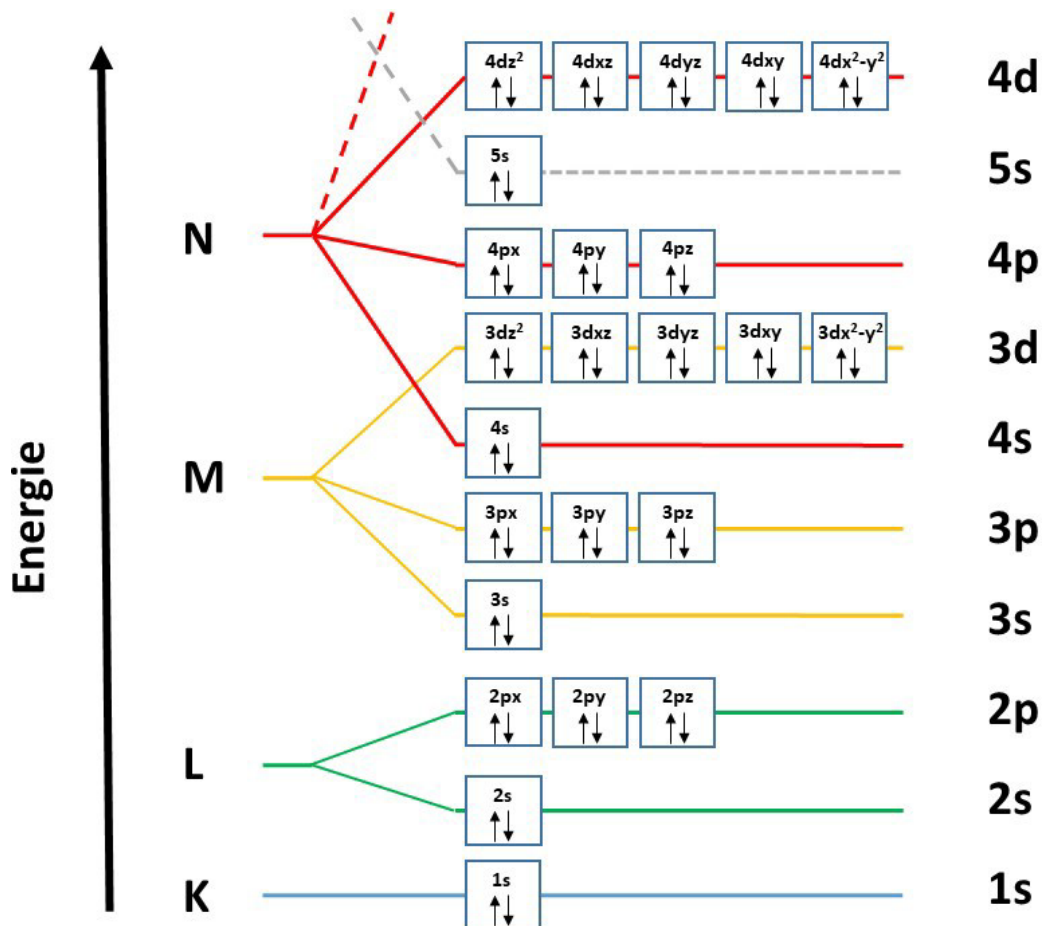


Abb. 2.6: Energieschema der Elektronen der ersten vier Perioden

2.2.9 Innere Übergangselemente

In der 6. und 7. Periode des PSE findet man die Lanthanoide und Actinoide. Man bezeichnet sie auch als *f*-Block-Elemente, weil in diesen Reihen die *f*-Schalen aufgefüllt werden. Zu den Lanthanoiden gehören neben Lanthan je nach Zählweise 13 bis 14 weitere Elemente. Bei den Lanthanoiden spricht man auch von den Metallen der seltenen Erden. In Analogie zählt man zu den Actinoiden das Element Actinium und die 14 folgenden Elemente. Alle Actinoide sind radioaktiv.

3 Chemische Bindungen

Fast alle Elemente kommen in der Natur in Form chemischer Verbindungen vor. Nur wenige, wie beispielsweise die Edelgase, liegen ungebunden vor.

Um die chemisch-physikalischen Eigenschaften von Verbindungen verstehen zu können, bedarf es der Untersuchung der jeweiligen Bindung, da deren Art erst Auskunft über die Struktur und damit auch über die Eigenschaften eines Stoffes ermöglicht.

Die verschiedenen Bindungsarten sind:

- Ionenbindung
- Atombindung (polar/unpolar)
- Metallbindung
- Bindung in Komplexen
- Intermolekulare Wechselwirkungen (Wasserstoffbrückenbindung/Van-der-Waals-Kräfte)

3.1 DIE ATOMBINDUNG / KOVALENTE BINDUNG

Die Atombindung wird hauptsächlich zwischen Elementen mit ähnlicher Elektronegativität ausgebildet. Im Gegensatz zur Ionenbindung werden die Atome unter einem ganz bestimmten Bindungswinkel und Abstand miteinander verbunden. Sie ist somit eine gerichtete Bindung.

In kovalenten Bindungen teilen sich die Bindungspartner Valenzelektronen, um eine stabile Edelgaskonfiguration zu erreichen.

Es war bereits bekannt, dass die Elektronenkonfiguration der Edelgase, deren äußerste Elektronenschale mit allen 8 Elektronen besetzt ist, sehr stabil und energiearm ist und somit immer angestrebt wird. Nach der Theorie von Lewis können alle Elemente diesen Zustand erreichen, indem sie die Elektronen der äußeren, nicht vollständig besetzten Schale gemeinsam nützen. Aus dem Elektronenpaar, welches somit zwei Atomen gemeinsam gehört, ergibt sich die kovalente Bindung, auch Elektronenpaarbindung oder (veraltet) Atombindung genannt.

Ausgenommen von Wasserstoff, welcher maximal zwei Elektronen aufnehmen kann und somit die Konfiguration von Helium ($1s^2$) anstrebt, wollen alle anderen Atome 8 Außenelektronen, ein Oktett (ns^2np^6) (Oktettregel), erreichen.

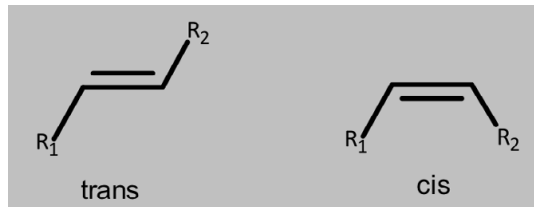
Wie viele Bindungen ein Atom eingehen kann, ist immer von der Anzahl seiner Valenzelektronen und der Oktettregel abhängig.

Durch Einsetzen eines Bindestriches (Valenzstrich) für das gemeinsame, bindende Elektronenpaar zwischen den Atomen kann das Molekül formelmäßig dargestellt werden. Die Molekülformel kann entweder mit den Elementsymbolen dargestellt werden (Abb. 3.2), oder bei organischen Verbindungen in einer reduzierten Form, in der die Elementsymbole für Kohlenstoff und Wasserstoff weggelassen werden (Abb. 3.1, siehe auch 7.1). Elektronenpaare, welche nicht der Bindung zwischen den Atomen dienen, bezeichnet man als freie Elektronenpaare.

Elektronenpaare, die nicht an der Bindung teilnehmen, werden freie Elektronenpaare genannt.

Atome können auch über mehr als ein Elektronenpaar miteinander verbunden sein, man spricht dann von Doppel- bzw. Dreifachbindungen.

Je nach räumlicher Anordnung unterscheidet man cis- oder transkonfigurierte Doppelbindungen:



$R_{1/2}$ steht bei Kohlenstoffverbindungen für weitere Molekülreste

Abb. 3.1:

trans: R_1 und R_2 befinden sich gegenüberliegend

cis: R_1 und R_2 sind auf der gleichen Seite

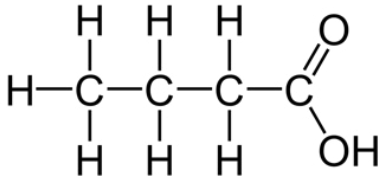


Abb. 3.2: Buttersäure
(Summenformel: $C_4H_8O_2$)

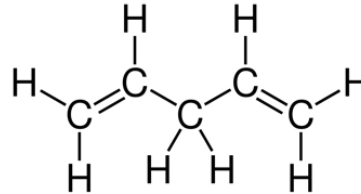


Abb. 3.3: Pentadien (Summenformel: C_5H_8)
mit zwei Doppelbindungen

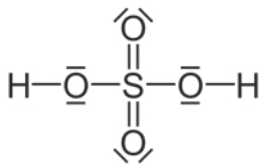


Abb. 3.4: Schwefelsäure (Summenformel: H_2SO_4)
einschließlich der Außenelektronen

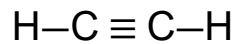


Abb. 3.5: Ethin (Acetylen; Summenformel: C_2H_2)
mit einer Dreifachbindung

3.2 MESOMERIE

Kann ein Molekül nur durch mehrere Lewis-Formeln korrekt dargestellt werden, da die wahre Elektronenverteilung zwischen den einzelnen Darstellungen liegt, spricht man von Mesomerie. Sie wird durch einen Resonanzpfeil (Doppelpfeil) gekennzeichnet. Das bedeutet, dass sich Elektronen nicht nur zwischen zwei Atomen bewegen, sondern auch noch anderen Atomen zugeordnet werden können. Wenn es sich um bindende Elektronen handelt, wird dieser Sachverhalt durch ein „Umkappen“ des Valenzstrichs verdeutlicht.

Die einzelnen mit Doppelpfeil verbundene Formeln nennt man mesomere Grenzstrukturen. Entscheidend ist, dass es sich dabei nicht um eine Hin- und Rückreaktion handelt, sondern die tatsächliche Form des Moleküls nur durch eine Überlagerung aller mesomeren Grenzstrukturen vermittelt wird.

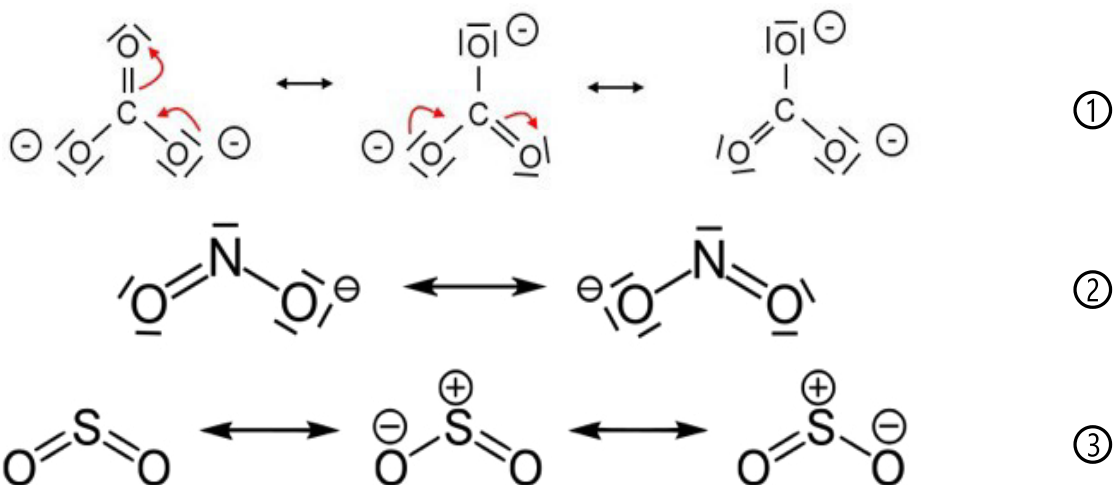


Abb. 3.6: Mesomere Grenzstrukturen:

① des Carbonatanions (CO_3^{2-}), ② des Nitritanions (NO_2^-) und ③ von Schwefeldioxid (SO_2).

3.3 HYBRIDISIERUNG

Der Vorgang der Hybridisierung ist ein rein mathematisches Verfahren zur erleichterten Darstellung und besitzt keine physikalische Realität.

Die Elektronenkonfiguration von Kohlenstoff im Grundzustand $1s^2 2s^2 2p^2$ bedeutet, dass die einfach besetzten p -Orbitale zur Überlappung mit einem Wasserstoff zur Verfügung stehen. Allerdings würde das bei einem CH_4 -Molekül zu einem Bindungswinkel von 90° führen, da die beiden $2p$ -Orbitale senkrecht angeordnet sind. Der wahre Bindungswinkel liegt aber bei 109° . Erst in diesem Winkel ist die Wechselwirkung zwischen den H-Atomen am geringsten, somit energieärmer und erstrebenswert.

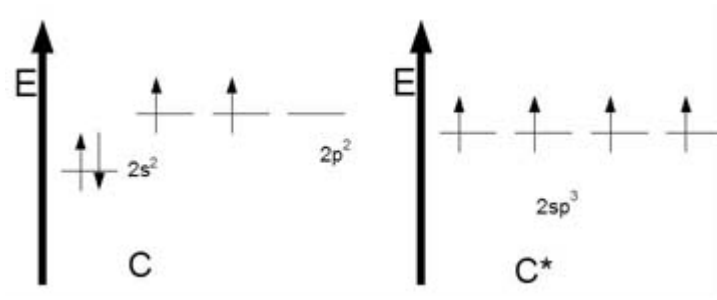


Abb. 3.7: Der Hybridisierungsvorgang.

Damit das Kohlenstoffatom vier Bindungen ausbilden kann, muss es energetisch angeregt (Valenzzustand) werden, indem ein Elektron aus dem $2s$ -Orbital in das höher liegende, leere $2p$ -Orbital angehoben wird. Die dafür nötige Energie (Promotionsenergie) kommt aus der Molekülbildung.

Es entstehen aus dem $2s$ - und den drei $2p$ -Orbitalen vier neue, äquivalente sp^3 -hybridisierte Orbitale, welche nach den Ecken eines Tetraeders ausgerichtet sind. Die Winkel betragen jeweils $109,5^\circ$ (Abb. 3.8).

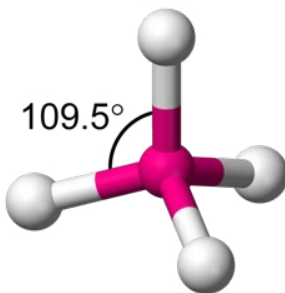


Abb. 3.8: sp^3 -hybridisiertes C-Atom im Methan; die Winkel betragen jeweils $109,5^\circ$.

Bei Überlappung eines $1s$ -Orbitals (Wasserstoff) mit einem sp^3 -Hybridorbital kommt es zur s - sp^3 - σ (sigma)- Bindung. Die daraus resultierende Form des Methanmoleküls stimmt nun auch mit den experimentellen Daten überein.

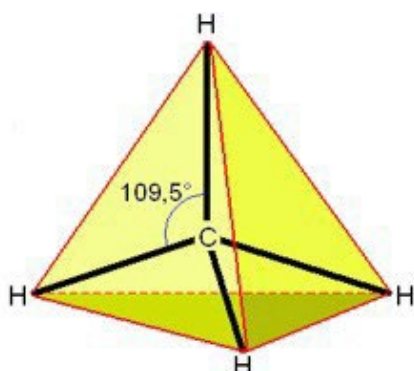
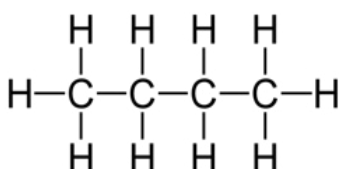


Abb. 3.9: Tetraedrische Struktur von Methan

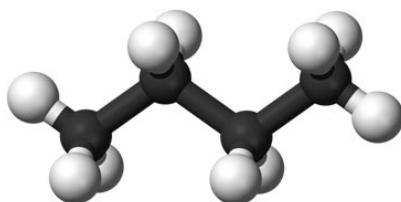
3.4 EINFACHBINDUNGEN

Werden mehrere sp^3 -hybridisierte Kohlenstoffatome über Einfachbindungen miteinander verknüpft, spricht man von Alkanen. Es kommt zu einer $sp^3-sp^3-\sigma$ -Bindung. Diese Bindung ist freidrehbar, die C-C-Bindungen bilden immer einen Tetraederwinkel von $109,5^\circ$ (siehe oben).

A



B



C



Abb. 3.10: Butan (C_4H_{10}) in drei verschiedenen Darstellungen; A: Fischer-Projektion, B: Kugel-Stäbchen-Modell und C: Skelettformel (siehe 7.1). Ersichtlich sind die Tetraederwinkel der C-Atome nur in B und C.

Ebenfalls sp^3 -hybridisiert sind das Sauerstoffatom in Molekülen wie Wasser (H_2O) oder Stickstoff in Ammoniak (NH_3). Dabei sind die sogenannten freien Elektronenpaare in die Ecken des Tetraeders gerichtet. Am Beispiel von NH_3 ist erkenntlich, dass die Bindungswinkel dann eine leichte Abweichung von der idealen Tetraederform aufweisen. Das liegt an den Orbitalen der freien Elektronenpaare von Sauerstoff und Stickstoff in diesen Verbindungen. Sie drängen die bindenden Elektronenorbitale zusammen (3.11).

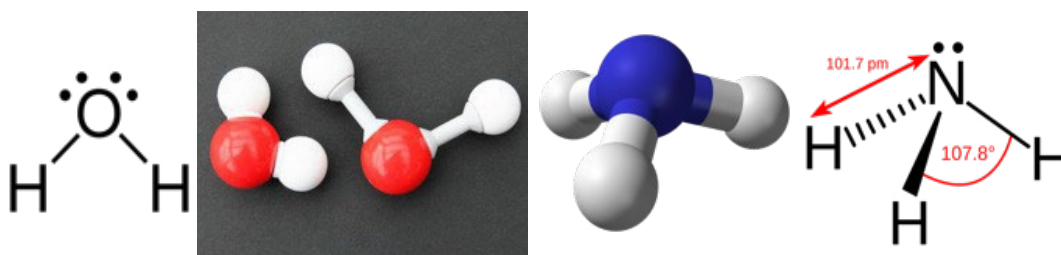


Abb. 3.11: Strukturen von H_2O und NH_3 als Elektronenformel- und Stäbchen-Kugel-Modell-Darstellung

3.5 DOPPELBINDUNGEN

Neben der sp^3 -Hybridisierung gibt es auch Hybridisierungen, bei denen nur Teile der Orbitale beteiligt sind. Bei der sp^2 -Hybridisierung sind ein s - und nur zwei p -Orbitale beteiligt, die dann drei gleichwertige sp^2 -Hybridorbitale ausbilden, welche in einer Ebene mit einem Winkel von je 120° dazwischenliegen. Das dritte nicht an der Hybridisierung beteiligte p -Orbital steht senkrecht dazu (in der folgenden Abb. Das p_z -Orbital).

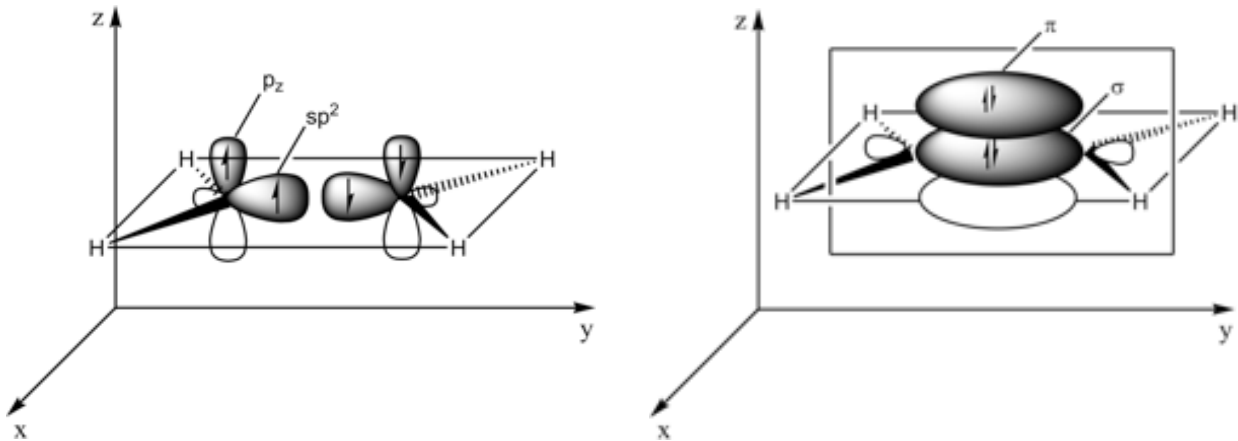


Abb. 3.12: Doppelbindungen

Es steht somit neben den drei sp^2 -hybridisierten Orbitalen auch ein p_z -Orbital zur Bindung zur Verfügung. Kommt es zur sp^2 - sp^2 - σ -Bindung und einer p - p - π -Bindung zwischen zwei Kohlenstoffatomen, spricht man von einer Doppelbindung.

Im Gegensatz zur σ -Bindung, welche aufgrund der rotationssymmetrischen Überlappung frei drehbar ist, besitzt die π -Bindung eine Knotenebene und die π -Elektronenwolke verteilt sich ober- und unterhalb der Bindungsachse, wodurch dieser Bindungstyp nicht mehr frei drehbar ist. Die Geometrie einer Doppelbindung ist planar trigonal (Abb. 3.13).

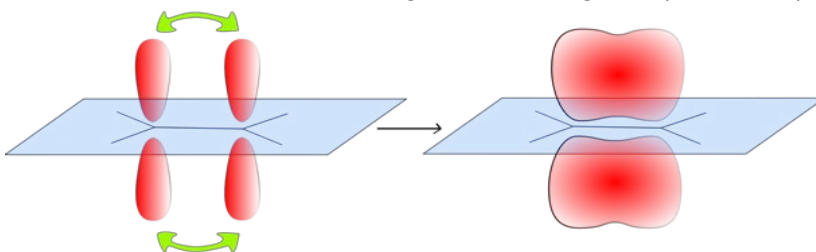


Abb. 3.13: Doppelbindungen

Sind in einem Molekül mehrere Doppelbindungen durch jeweils eine Einfachbindung getrennt, dann spricht man von konjugierten Doppelbindungen (Abb. 3.14). Wenn sich zwischen sp^2 -hybridisierten C-Atomen mindestens ein sp^3 -hybridisiertes C-Atom befindet, spricht man von isolierten Doppelbindungen. In dem Fall liegen nämlich mind. zwei Einfachbindungen zwischen den Doppelbindungen. Es ist aber auch möglich, dass Doppelbindungen direkt benachbart auftreten, dann bezeichnet man sie als Kumulene (Abb. 3.15).

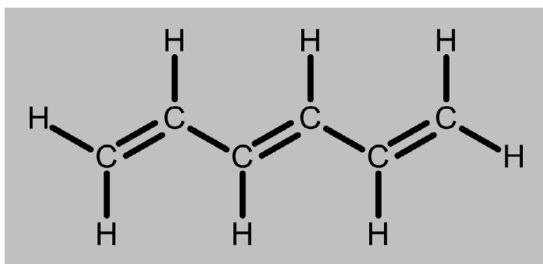


Abb. 3.14: Hexatrien
(konjugierte Doppelbindungen)

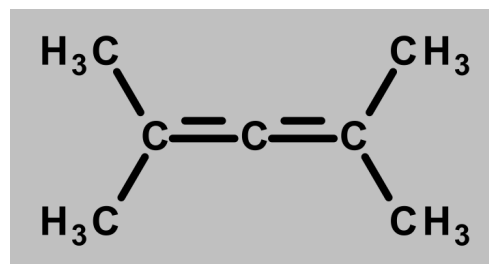


Abb. 3.15: 2,4-Dimethyl-2,3-Pentadien
(kumulierte Doppelbindungen)

3.6 DREIFACHBINDUNGEN

Sind die Kohlenstoffatome nur sp -hybridisiert, stehen sogar zwei freie p_z -Orbitale zur Überlappung zur Verfügung. Zwischen den beiden sp -Hybridorbitalen liegt ein Winkel von 180° vor, die beiden nicht hybridisierten p -Orbitale stehen flächensymmetrisch mit 90° zu einander.

Bei der ebenfalls nicht frei drehbaren Dreifachbindung kommt es folglich zu einer $sp-sp-\sigma$ -Bindung und zwei $p-p-\pi$ -Bindungen. Die Geometrie ist linear.



Abb. 3.16: Lineare Struktur von Ethin (Trivialname Acetylen)

3.7 ELEMENTARER KOHLENSTOFF

Beim Diamant liegen alle Kohlenstoffatome sp^3 -hybridisiert vor, so dass jedes Atom von vier weiteren Atomen in tetraedrischer Form umgeben ist, jede $sp^3-sp^3-\sigma$ -Bindung ist gleich lang und die Bindungsenergie jeweils gleich groß ist. Folglich ergibt sich das regelmäßig aufgebaute und daher überaus stabile Diamantgitter.

Jedes Atom ist stabil und kann einer Bindung zugeordnet werden. Dies ist der Grund für die massive Härte des Diamanten und dessen schlechte Leitfähigkeit.

Das Graphitgitter besteht aus sp^2 -hybridisierten Atomen, weshalb es aus Ebenen (Schichten) aufgebaut ist. Jede Ebene besteht aus miteinander verknüpften Sechsecken, die durch die $sp^2-sp^2-\sigma$ -Bindungen zustandekommen.

Die Elektronen der p -Orbitale gehören nicht einzelnen Bindungen oder Atomen an, sondern liegen als delokalisierte Elektronenwolke zwischen den Graphitschichten. Das erklärt die elektrische Leitfähigkeit sowie die schwarze, metallisch-glänzende Farbe von Graphit (Abb. 3.17).

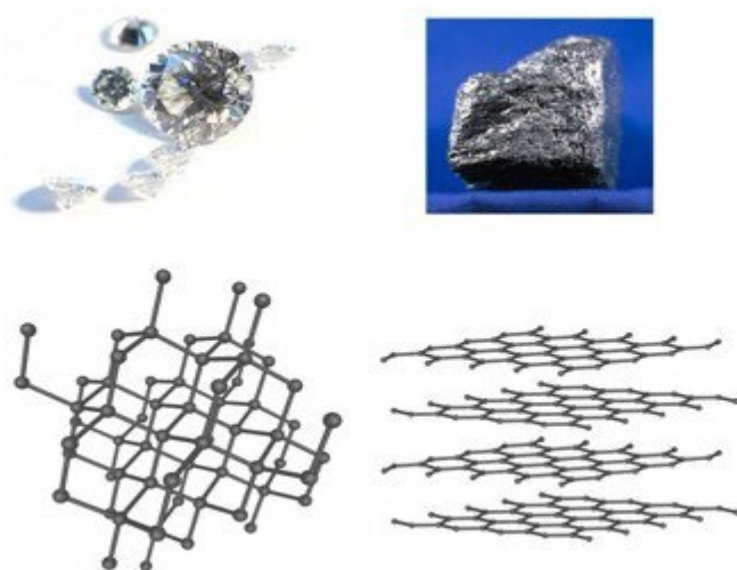


Abb. 3.17: Diamant und Graphit

Als Fullereene bezeichnet man hohle, geschlossene Moleküle aus Kohlenstoffatomen, die sich in Fünf- und Sechsecken anordnen. Sie stellen eine weitere Modifikation des chemischen Elements Kohlenstoff dar (Abb. 3.18 a).

Kohlenstoffnanoröhren, sogenannte Nanotubes, sind mikroskopisch kleine, röhrenförmige Gebilde (molekulare Nanoröhren) aus Kohlenstoff. Ihre Wände bestehen nur aus Kohlenstoff, wobei die Kohlenstoffatome eine wabenartige Struktur mit Sechsecken und jeweils drei Bindungspartnern einnehmen (vorgegeben durch die sp^2 -Hybridisierung, Abb. 3.18 b). Der Durchmesser der Röhren liegt meist im Bereich von 1 bis 50 nm, es wurden aber auch Röhren mit nur 0,4 nm Durchmesser hergestellt.

Längen von bis zu einem halben Meter für einzelne Röhren und bis zu 20 cm für Röhrenbündel wurden bereits erreicht.

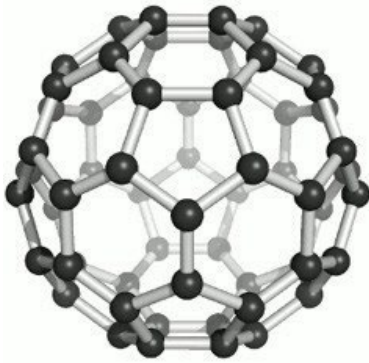


Abb. 3.18 a: Fulleren

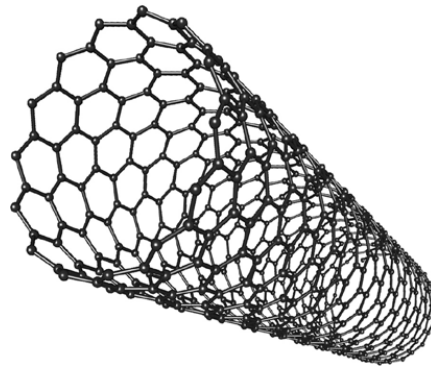


Abb. 3.18 b: Nanotube

3.8 POLARE ATOMBINDUNGEN

Die ideale kovalente Bindung kann nur zwischen Atomen gleicher Elemente bzw. identen Atomgruppen entstehen, da dadurch die Aufteilung der Elektronen gleichmäßig erfolgt und sich keine Polarität ergibt. Ist ein Molekül von verschiedenen Atomen aufgebaut und haben die Bindungspartner unterschiedliche Elektronegativität, kommt es zur Verschiebung der gemeinsamen Elektronenpaare hin zum elektronegativeren Partner. Man spricht nun von einer polaren Atombindung und es entstehen Partialladungen.

Der elektropositivere Bindungspartner trägt eine mit $\delta+$ gekennzeichnete positive Partialladung, der elektronegativer eine mit $\delta-$ gekennzeichnete negative Partialladung. Je größer die Elektronegativitätsdifferenz der Bindungspartner, desto polarer ist eine Atombindung.

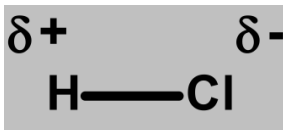


Abb. 3.19: Polarisierung der HCl-Bindung

Innerhalb einer Gruppe des Periodensystems nimmt die Elektronegativität von oben nach unten hin ab und somit auch die Polarität homologer Verbindungen.

Das Chlorwasserstoffmolekül ist über eine σ -Bindung zwischen zwei Atomen mit einer hohen Elektronegativitätsdifferenz verbunden. Die Elektronendichte verschiebt sich daher sehr stark zum elektronegativeren Chloratom, welches daraufhin eine negative Partialladung erhält. Es entsteht ein permanenter Dipol.

Beim Tetrachlormethan sind die vier Chloratome symmetrisch um das Kohlenstoffatom angeordnet und es kommt daher zu keiner Ladungsverschiebung, da alle vier Chloratome gleich stark an den Elektronen des Kohlenstoffs ziehen. Hier liegt kein Dipol vor, da die Ladungsschwerpunkte auf einen Punkt zusammenfallen.

3.8.1 Das Wassermolekül

Beim Wassermolekül überlappen die beiden sp^3 -hybridisierten Sauerstofforbitale mit je einem $1s$ -Orbital des Wasserstoffs. Die übrigen zwei sp^3 -Hybridorbitale werden von je einem freien Elektronenpaar des Sauerstoffatoms eingenommen. Die freien Elektronenpaare beanspruchen einen größeren Raum als die bindenden Elektronenpaare, da sie sich stärker abstoßen. Dadurch kommt es zur Verschiebung von der idealen Tetraederform und der Bindungswinkel zwischen den bindenden Paaren wird kleiner (105° ; siehe Abschnitt 3.4). Diese gewinkelte Form ist auch der Grund für die Ausbildung eines Dipols.

3.8.2 Das Ammoniakmolekül

Im Ammoniakmolekül können die drei sp^3 -hybridisierten Orbitale des Stickstoffs mit je einem 1s-Orbital des Wasserstoffs überlappen. Das freie Elektronenpaar des Stickstoffatoms besetzt das letzte freie sp^3 -Hybridorbital. Wieder kommt es zur Verschiebung der Bindungswinkel, da das freie Elektronenpaar mehr Platz einnimmt. Der Bindungswinkel beträgt nun 107° .

3.9 DIE IONENBINDUNG

Ionen entstehen durch Elektronenaufnahme (Bildung von Anionen) bzw. -abgabe (Bildung von Kationen). Elemente, die ein Elektron aufnehmen oder abgeben, werden als Ionen bezeichnet. Anionen haben Elektronen aufgenommen und sind negativ geladen. Kationen sind Ionen, die ein Elektron abgegeben haben und damit positiv geladen sind.

- Elemente der I. und II. Hauptgruppe des Periodensystems bilden vorzugsweise **Kationen**, da sie nur eine geringe Ionisierungsenergie benötigen, um Edelgaskonfiguration zu erreichen.
- Elemente der VI. und VII. Hauptgruppe bilden vorwiegend **Anionen**, um 8 Valenzelektronen und somit Edelgaskonfiguration zu erlangen.

Durch Aufnahme bzw. Abgabe von Elektronen ändert sich die Elektronenhülle und damit der Teilchenradius und das Volumen. Anionen sind immer größer als ihre neutralen Atome, Kationen immer kleiner.

Die Ionenbindung findet zwischen Metallen mit niedriger Ionisierungsenergie und Nichtmetallen mit hoher Elektronenaffinität statt. Es kommt zur ungerichteten Anziehung zwischen positiven und negativen Ionen und dabei zur vollständigen Übertragung der Elektronen. Die elektrostatischen Anziehungskräfte wirken in alle Richtungen und führen zur Ausbildung von dreidimensionalen stabilen Ionenkristallen.

Die Koordinationszahl eines Ionengitters gibt an, wie viele Ionen eines entgegengesetzt geladenen Typs ein Ion umgeben. Bei NaCl (Kochsalz) beträgt diese Zahl 6, das bedeutet, dass jedes Natriumion von sechs Chlorionen umgeben ist und jedes Chlorion von sechs Natriumionen (Abb. 3.20). Die Gitterstruktur wird durch die Anordnung der Ionen nach Ladung und Größe bestimmt. Bezieht man die Größenverhältnisse von Anionen und Kationen sowie deren Abstände zueinander mit ein, kommt man von dem vereinfacht dargestellten Gittermodell zum Packungsmodell.

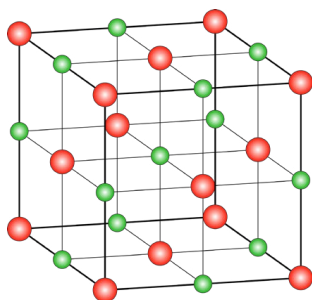


Abb. 3.20: Kristallgitter von NaCl mit Na^+ (rot) und Cl^- (grün).

Ionenverbindungen sind nach außen immer neutral. Jedes zweifach geladene Kation muss mit einem zweifach geladenen Anion oder mit zwei einfach geladenen Anionen verbunden werden, damit die Summe neutral bleibt. Salze wie NaCl oder AgBr nennt man AB-Verbindungen, MgCl_2 oder CuCl_2 nennt man AB_2 -Verbindungen.

3.9.1 Eigenschaften von Ionenbindungen

Alle Substanzen, die aus Ionen bestehen, bezeichnet man als Salze oder salzartige Stoffe. Da ihre Ionen bei Normaltemperatur fest an die Gitterplätze gebunden und nicht frei beweglich sind, leiten sie den elektrischen Strom nicht. Ionen zeigen allerdings eine Eigenschwingung um ihre Gitterplätze. Wird sehr viel Energie zugeführt, kann die Eigenschwingung so groß werden, dass sie die Bindungskräfte überwindet. Die Ionen sind dann beweglich und können den elektrischen Strom leiten. Das passiert in einer Schmelze und ebenso, wenn sie in Wasser gelöst sind.

Anhand des sogenannten Coulombschen Gesetzes kann gezeigt werden, dass die Stabilität des Gitters mit Zunahme der Ladungsgröße und Verringerung des Abstandes zwischen den Ladungsschwerpunkten steigt. Auch ziehen kleine Ionen mit hoher Ladungsdichte einander stärker an als vergleichsweise solche mit großem Radius und niedriger Ladungszahl.

Mit der Zunahme der Gitterenergie steigt auch die Schmelztemperatur eines Salzes. Ionengitter sind überaus stabil, was zu dem spröden und harten Charakter von Salzen führt. Bei zu großer Beanspruchung brechen Salze entlang bestimmter Gitterebenen.

Beim Lösen von Salzen in Wasser treten die randständigen Ionen mit den Dipol-Wassermolekülen in Wechselwirkung, und es bildet sich in der Folge eine Hydrathülle aus (= Hydratation). Es kommt zur Abschwächung der Gitterkräfte. Die hydratisierten Ionen verlassen den Gitterverband und sind in der wässrigen Phase nun frei beweglich.

Je nach Radius und Ladung besitzen die Ionen unterschiedlich große Hydrathüllen. Beim Vorgang der Hydratation wird Energie frei (exotherme Reaktion, siehe Abschnitt 4) und heißt Hydratationswärme oder Hydratationsenthalpie ΔH_H . Sie wird mit einem negativen Vorzeichen versehen, weil sie bei der Reaktion frei wird. Gleichzeitig muss zur Überwindung der Gitterenergie ein Wärmebetrag aufgewendet werden. Dieser Wärmebetrag hat ein positives Vorzeichen, weil er für die Reaktion benötigt wird. Die Summe der Hydratationsenthalpie und der Gitterenergie ist die Lösungsenthalpie. Die wird mit Delta (Δ) H_L angegeben (Δ steht für Differenz). Die Wärmemenge ΔH_L kann ein positives oder ein negatives Vorzeichen haben. Die resultierende Differenz wird bei der Reaktion an die Lösung weitergeleitet. Das Auflösen einer Ionenverbindung in Wasser kann daher sowohl exotherm als auch endotherm sein. Der Lösungsvorgang ist exotherm, wenn die Summe der Hydratationsenthalpien größer als die Gitterenergien ist. Die Salze werden unter Abgabe von einer Lösungswärme aufgelöst. Die Lösung erwärmt sich (negatives Δ). Ist der Lösungsvorgang endotherm, muss Energie von außen zugeführt werden oder es wird der Lösung Energie entzogen; die Lösung kühlt ab (positives Δ).

Die Löslichkeit von Salzen hängt hauptsächlich von der Gitterenergie ab. Salze mit hoher Gitterenergie sind schwerer löslich als solche mit niedriger Gitterenergie. Ist die Gitterenergie zu groß, können die Verbindungen auch unter Erwärmen nicht in Wasser gelöst werden.

Die chemischen Bindungsarten sind nicht strikt voneinander getrennt. Für die Trennung zwischen kovalenter Bindung und Ionenbindung wurde eine Elektronegativitätsdifferenz von 1,7 festgelegt.

Elektronegativitätsdifferenz		Art der Bindung
$\Delta EN = 0$	H—H	unpolare Atombindung
$\Delta EN < 1,7$	$\delta^+ \text{H} - \text{Br} \delta^-$	polare Atombindung
$\Delta EN > 1,7$	$\text{Na}^+ \text{Cl}^-$	Ionenbindung

Tab. 3.1 Zusammenhang Art der Bindung und Elektronegativitätsdifferenz

3.10 METALLBINDUNG

Die Eigenschaften von Metallen sind gute Leitfähigkeit von elektrischem Strom und Wärme, gute

Verformbarkeit und typischer metallischer Glanz.

Die chemischen Bindungen in Metallen können mit dem Elektronengasmodell gut dargestellt werden. Bei diesem Modell wird angenommen, dass die Valenzelektronen die Atome verlassen haben und sich um die Atomrümpfe gasartig anordnen. Die Atomrümpfe sind positiv geladen und bilden die Gitterstruktur der Metalle. Sie werden von dem negativ geladenen, delokalisierten Elektronengas umgeben und dadurch zusammengehalten (Abb. 3.21). Man spricht also von einer Metallbindung, wenn es zu Wechselwirkungen zwischen den positiv geladenen Metallionen (Atomrümpfe) und den delokalisierten Elektronen kommt. Dabei bildet sich ein Metallgitter. Die gute Leitfähigkeit liegt an den frei beweglichen Elektronen.

Bei zunehmender Temperatur nimmt die Leitfähigkeit von Metallen ab, da die Gitterschwingungen größer werden und damit der Elektronenfluss durch die zunehmende gegenseitige Abstoßung behindert wird.

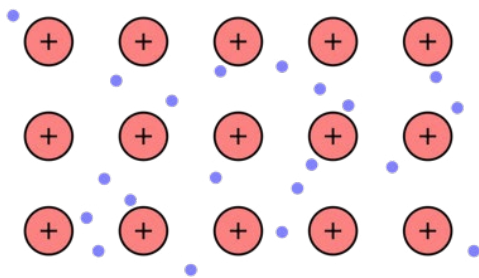


Abb. 3.21: Metallbindung

3.11 INTERMOLEKULARE WECHSELWIRKUNGEN

Auch wenn Moleküle nach außen hin neutral sind, kann es zu Wechselwirkungen zwischen ihnen kommen. Diese Wechselwirkungen sind allerdings deutlich schwächer als andere chemische Bindungen.

3.11.1 Van-der-Waals-Kräfte

Van-der-Waals-Kräfte beschreiben die Anziehungskräfte zwischen Molekülen oder Edelgasatomen, wobei es drei Stärken bzw. Abstufungen gibt:

- Die stärkste Van-der-Waal-Kraft ist die Dipol-Dipol-Wechselwirkung,
- gefolgt von den Wechselwirkungen zwischen einem Dipol und einem unpolaren Molekül.
- Die schwächste ist die Wechselwirkung zwischen unpolaren Molekülen bzw. Atomen.

In der Literatur werden die Van-der-Waals-Kräfte manchmal enger gefasst.

3.11.2 Dipol-Dipol-Wechselwirkungen

Verbindungen wie Wasser bestehen aus polaren Molekülen. Sie besitzen einen permanenten Dipol und richten ihre Partialladungen entsprechend der elektrostatischen Anziehungskraft nacheinander aus.

Damit verbunden ist eine Energieminimierung. Somit muss bei Änderung des Aggregatzustandes diese Van-der-Waal-Energie aufgebraucht oder abgegeben werden.

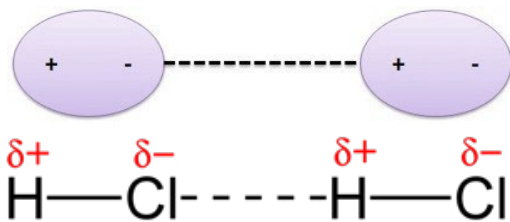


Abb. 3.22: Dipol-Dipol-Wechselwirkung von H-Cl

3.11.3 Wechselwirkungen zwischen Dipolmolekül und unpolarem Molekül

Der permanente Dipol induziert im unpolaren Molekül einen Dipol, indem es zu kurzzeitigen Verschiebungen der Elektronen kommt (=induzierter Dipol).

3.11.4 Wechselwirkungen zwischen unpolaren Molekülen oder Atomen

Aufgrund einer kurzzeitigen unsymmetrischen Ladungsverteilung kann ein temporärer Dipol induziert werden, und somit ziehen sich sogar unpolare Moleküle an. Dieser Dipol kann in einem dynamischen Prozess auch benachbarte Dipole induzieren.

3.11.5 Wasserstoffbrückenbindungen

Wasserstoffbrückenbindungen können nur von Elementen mit einer sehr starken Elektronegativität gebildet werden (N, O, F). Dabei besteht die Möglichkeit einer inter- oder intramolekularen Wasserstoffbrückenbildung. Beim Wassermolekül kommt es zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoffatomen benachbarter Moleküle zur Ausbildung von Wasserstoffbrücken. Zunächst ziehen die stark elektronegativen Sauerstoffatome die Elektronen der O-H-Bindung an. Am Sauerstoff kommt es folglich zu einer negativen (δ^-), am Wasserstoff zu einer positiven Partialladung (δ^+ , Abb. 3.22).

Wasserstoffatome mit positiver Partialladung bilden nun Brücken mit den freien Elektronenpaaren am Sauerstoff der benachbarten Wassermoleküle. Es kommt zur Bildung großer Molekülverbände (Abb. 3.23). Auch wenn Wasserstoffbrücken eine geringe Bindungsenergie haben, beeinflussen sie beispielsweise die Siedetemperatur stark.

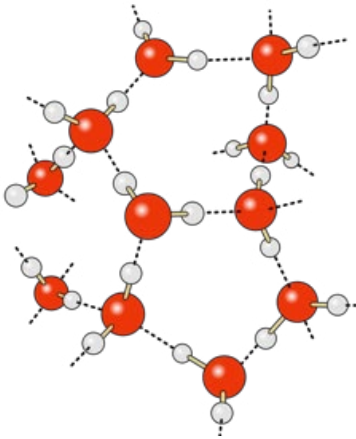


Abb. 3.23: Wasserstoffbrückenbindungen

4 Chemisches Gleichgewicht und das Massenwirkungsgesetz

In jedem Stoff steckt eine bestimmte innere Energie. Bei Stoffumwandlungen (chemische Reaktion) ändert sich diese innere Energie. Diese kann als Wärme aufgenommen oder abgegeben werden. Man unterscheidet dabei endotherme Reaktionen (Wärme wird aufgenommen) und exotherme Reaktionen (Wärme wird abgegeben).

Die Thermochemie, eine Teildisziplin der Thermodynamik, befasst sich mit den Energiebeträgen, die bei chemischen Prozessen in Form von Wärme (Enthalpiebetrag = ΔH) umgesetzt werden. Eine thermochemische Gleichung besteht aus einer Reaktionsgleichung und der Angabe der zugehörigen Enthalpieänderung. Diese wird durch Messung von Wärmemengen (kalorimetrische Messungen) bestimmt. Die umgesetzte Wärmemenge ist jedoch nicht allein ausschlaggebend, um erklären zu können, ob eine Reaktion spontan abläuft, oder nicht. Zwar können chemische Reaktionen generell schneller bei höherer Temperatur ablaufen, aber auch endotherme Reaktionen, bei denen Wärme für den chemischen Prozess benötigt wird, können freiwillig ablaufen. Neben der übertragenen Wärmemenge ist auch der nach einer Reaktion eingenommene Zustand ausschlaggebend. Wenn das Reaktionsprodukt z. B. mehr Mikrozustände einnehmen kann (siehe Resonanzstrukturen oder mesomere Grenzstrukturen), liegt es in einem energetisch günstigeren Zustand vor. Diese Mikrozustände können zur besseren Verständlichkeit mit einem System in Unordnung verglichen werden. Man spricht auch von Entropie. Je mehr Mikrozustände, desto größer die „Unordnung“ und desto stabiler die Verbindung. Beide Energiebeträge, Δ Enthalpie und Δ Entropie zusammen, bestimmen über die Freiwilligkeit einer chemischen Reaktion. Die chemischen Reaktionen laufen solange in eine Richtung, bis kein Energieumsatz (als Wärme oder als Entropiezunahme) mehr passiert. Nun ist die Reaktion im Gleichgewicht.

Gleichgewichtsreaktionen

Wenn wir uns nun mit chemischen Reaktionen befassen, so haben wir es mit Gleichgewichtsreaktionen zu tun. Das bedeutet, dass die Gesamtreaktion von außen betrachtet ruhend erscheint (kein Umsatz der Ausgangsstoffe oder der Produkte – auch können keine Energieänderungen wahrgenommen werden). Es findet jedoch neben der Hin- auch eine Rückreaktion statt, und es stellt sich ein dynamischer Gleichgewichtszustand ein.

Allgemein kann man die Reaktionsgleichung wie folgt aufschreiben:



Es gilt hierbei:

- A und B sind die Ausgangsstoffe (Edukte)
- C und D die Produkte
- a, b, c, d zeigen an, wie oft dieser Stoff in der Reaktionsgleichung vorkommt.

Gleichgewichtsreaktionen werden durch zwei Pfeile, die die Hin- und Rückreaktion verdeutlichen, gekennzeichnet.

Beispiel: Ammoniaksynthese (hier gibt es nur ein Produkt)



Im Gleichgewicht verläuft die Hinreaktion genauso schnell, wie die Rückreaktion und die Konzentrationen aller beteiligten Substanzen ändern sich dann natürlich nicht mehr.

Massenwirkungsgesetz

Im Gleichgewicht stehen die Konzentrationen der Edukte zu den Konzentrationen der Produkte in einem konstanten Verhältnis. In Abhängigkeit der aufgestellten Reaktionsgleichung werden die Konzentrationsverhältnisse durch die Darstellung im Massenwirkungsgesetz (MWG) beschrieben. Da sich das Verhältnis der Konzentrationen im Gleichgewicht nicht mehr verändert, wird es mit dem Buchstaben K = Gleichgewichtskonstante beschrieben. Die Gleichgewichtskonstanten können empirisch erhoben werden, wenn die Konzentrationen der Edukte und der Produkte gemessen werden können. Da das Gleichgewicht chemischer Reaktionen von der Temperatur und dem Druck abhängen, müssen diese für K definiert werden.

Das Massenwirkungsgesetz ist hier für eine allgemeine Reaktion als Formel dargestellt, wobei c für die Stoffmengenkonzentration steht; die Einheit wird in mol/l angegeben. Die Stoffmengenkonzentrationen können entweder in der Form $c(\dots)$ oder, wie allgemein üblich, in eckigen Klammern $[\dots]$ angegeben werden. Die hochgestellten Zahlen geben an, wie oft dieser Stoff in der Reaktionsgleichung vorkommt:

$$K = \frac{c(\text{C})^c \times c(\text{D})^d}{c(\text{A})^a \times c(\text{B})^b} = \frac{[\text{C}]^c \times [\text{D}]^d}{[\text{A}]^a \times [\text{B}]^b}$$

Für obige Reaktionsgleichung lautet dann das MWG wie folgt:

$$K = \frac{[\text{NH}_3]^2}{[\text{N}_2] \times [\text{H}_2]^3}$$

Allgemein gibt man beim MWG die Produkte im Zähler und die Edukte im Nenner an. Wenn die Reaktionsgleichung umgekehrt aufgeschrieben wird, kehrt sich auch die Darstellung im MWG um. Wenn also K einen großen Zahlenwert hat, so liegt das Gleichgewicht auf der rechten Seite der Reaktionsgleichung (der Produktseite). Wenn die Gleichgewichtskonstante K klein ist, liegt das Gleichgewicht umgekehrt auf der Seite der Edukte. K wird auch als die Reaktions- oder Gleichgewichtskonstante bezeichnet.

Es gilt:

Die Gleichgewichtskonstante K ist temperatur- und druckabhängig, aber unabhängig von den anwesenden Stoffmengen, oder von der An- oder Abwesenheit eines Katalysators.

Sofern man K kennt, kann man z. B. mit dem MWG errechnen, welche Konzentrationen für die Reaktionspartner resultieren, wenn die Konzentrationen eines Reaktionsteilnehmers verändert wird.

5 Protonen und Elektronenübertragungsreaktionen

5.1 SÄUREN UND BASEN

S. Arrhenius definierte erstmals die Begriffe Säure und Base:

- Säuren sind nach seiner Definition Wasserstoffverbindungen und geben in wässriger Lösung H^+ -Ionen (Protonen – also Wasserstoffatome ohne ihre Elektronen) ab. Die Freisetzung von Protonen aus einem Molekül ist eine Dissoziationsreaktion.
- Basen besitzen Hydroxylgruppen und geben beim Lösen in Wasser hydratisierte Ionen (Hydroxid-Ionen) ab.

Mit seiner Beschreibung konnten jedoch die basischen Eigenschaften von Substanzen wie Ammoniak (NH_3) in nicht-wässrigen Systemen nicht ausreichend erklärt werden.

Mit neueren Erkenntnissen kam die Einführung der Brönsted-Lowry-Theorie. Diese nahm das Donator-Akzeptor-Prinzip an und die Begriffe „Säure“ und „Base“ wurden neu definiert. Nicht mehr die Art einer Verbindung, sondern ihre Funktion – nämlich die Fähigkeit zur Abgabe oder Aufnahme von Protonen – ist für diese Definition ausschlaggebend.

Säuren besitzen die Fähigkeit zur Protonen-Abgabe (Protonen-Donator).
Basen besitzen die Fähigkeit zur Protonen-Aufnahme (Protonen-Akzeptor).

Eine Säure-Basen-Reaktion ist somit die Übertragung von Protonen (H^+) zwischen den Reaktionspartnern, man spricht auch von Protolyse.

Säuren und Basen können sowohl aus neutralen Molekülen (Neutralsäuren und -basen), als auch aus Ionen (Anionensäuren und -basen, Kationensäuren und -basen) Protonen freisetzen oder aufnehmen.

Die theoretische Fähigkeit zur Abgabe oder Aufnahme von Protonen wird bei der Schreibweise von Summenformeln anorganischer Verbindungen berücksichtigt: Links stehende Wasserstoffatome zeigen an, dass es sich um eine Säure (HCl , H_2SO_4 , etc.) handelt. Basen sind häufig an der rechts stehenden Hydroxylfunktion zu erkennen (NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Auch die Namensgebung trägt ihrer Funktion Rechnung (Salzsäure, Schwefelsäure, bzw. Natriumhydroxid und Kalziumhydroxid). Achtung: Bei organischen Verbindungen (Kohlenstoffverbindungen) gilt diese Übereinkunft nicht!

5.2 SÄURE-BASE-GLEICHGEWICHTE

5.2.1 Das Oxonium-Ion

Bei einer Säure-Base-Reaktion in Wasser entsteht bei der Abgabe eines Protons durch eine Säure spontan ein Hydroxonium-Ion (H_3O^+); synonyme Bezeichnungen dafür sind Hydronium-Ion bzw. Oxonium-Ion.

Das passiert, weil freie Protonen in wässrigen Lösungen nicht existent sein können. Durch den sehr kleinen Atomradius und das hohe Ionenpotential lagern sich Protonen stets an Teilchen mit einem freien Elektronenpaar, wie dem Wassermolekül, an.

Auch das Oxonium-Ion liegt nicht völlig frei vor, sondern bildet mit drei weiteren Wassermolekülen Wasserstoffbrücken aus. Es entsteht ein H_9O_4^+ -Ion.

5.2.2 Das Ionenprodukt des Wassers und der pH-Wert

Das Auftreten von Ionen kann durch Messung der Leitfähigkeit festgestellt werden. Auch reines Wasser leitet schwach den elektrischen Strom. Die dafür nötigen frei vorliegenden Ionen werden bei der sogenannten Eigendissoziation von Wasser gebildet. Diese Reaktion wird Autoprotolyse genannt.



Bei der Autoprotolyse entstehen aus zwei Wassermolekülen jeweils ein Oxonium-Ion und ein Hydroxyl-Ion (auch Hydroxid-Ion genannt). Der Umfang dieser Protolysereaktion steigt mit Erhöhung der Temperatur an. Die höhere Leitfähigkeit von Wasser bei höherer Temperatur zeigt somit an, dass mehr Wasser in seine Ionen dissoziiert ist.

Protolysereaktionen und die Autoprotolyse sind Gleichgewichtsreaktionen. Auch für diese Reaktion kann daher empirisch eine Gleichgewichtskonstante mithilfe des Massenwirkungsgesetzes ermittelt werden (siehe Abschnitt 4). Da Gleichgewichtskonstanten von der Temperatur und dem Druck abhängen, werden die Säure-Basen-Reaktionen in wässrigen Lösungen im Weiteren unter Standardbedingungen betrachtet (21 °C, 1 bar Druck).

Durch die Wirkung von Säuren und Basen werden nun die Konzentrationen der im Wasser durch die Autoprotolyse entstandenen Reaktionspartner beeinflusst. Betrachtet man die Vorgänge in reinem Wasser, so kennt man die Konzentration des Edukts: 1 L bei Standardbedingungen enthält 55,55 mol Wasser. Da im Verhältnis zur Menge der H_2O Moleküle nur sehr sehr wenige Moleküle in Oxonium- und Hydroxid-Ionen umgewandelt wurden, ändert sich die Konzentration des Wassers de facto kaum. Sie wird daher vereinfachend als konstant angesehen. Da die absolute Menge an Wassermolekülen in Wasser nicht änderbar ist (weder kann man Wasser konzentrieren noch kann man es verdünnen), ergibt sich für die Konzentration des Wassers eine Konstante. Damit ergibt sich für $[\text{H}_2\text{O}]$ ein konstanter Wert, der sich aus der Molmasse errechnet (55,55 mol/L).

Die Menge der Ionen, die durch Autoprotolyse entstanden sind, wird über die Leitfähigkeit des Wassers bestimmt und daraus die Gleichgewichtskonstante K errechnet. Sie wird mit der Konzentration des Wassers zu einer Konstante K_w zusammengefasst. K_w gibt das Ionenprodukt des Wassers an. Da die Gleichgewichtskonstante von der Temperatur abhängig ist, muss diese stets auf die jeweilige Temperatur bezogen angegeben werden.

Bei Standardbedingungen (Temperatur = 21 °C) liegt dieses bei $K_w = 10^{-14} \text{ mol}^2/\text{l}^2$.

Zur Vereinfachung wird die negative logarithmische Größe $\text{p}K_w$ verwendet (zur Basis 10).

Der pH-Wert ist der negative dekadische Logarithmus der H_3O^+ -Ionen Konzentration.

Der $\text{p}K_w$ Wert von Wasser bei 21° liegt bei 14.

Es gilt:

$$\begin{aligned}\text{pH} + \text{pOH} &= \text{p}K_w = 14 \\ \text{pH} &= \text{p}K_w - \text{pOH}\end{aligned}$$

Da in reinem Wasser die Konzentration von Oxonium- und Hydroxid-Ionen stets gleich hoch sein muss (aus zwei Wassermolekülen entstehen je ein Oxonium- und ein Hydroxid-Ion), kann pOH mit pH gleichgesetzt werden. Der obige Term kann somit nach pH aufgelöst werden:

$$\begin{aligned}\text{pH} &= \text{pOH} \\ \text{pH} + \text{pH} &= 2\text{pH} = 14 \\ \text{pH} &= 7\end{aligned}$$

In reinem Wasser beträgt der pH-Wert unter Standardbedingungen 7. Dies bedeutet, dass die Oxonium-Ionen dann eine Konzentration von 10^{-7} mol/l ($0,1 \text{ } \mu\text{mol/l}$) haben.

Steigt die Temperatur, nimmt das Ionenprodukt des Wassers und damit die Menge an dissoziierten Ionen zu. Wenn nun der pH-Wert gemessen wird, erhält man nur Auskunft über die Menge an Oxonium-Ionen. Diese gaukelt eine scheinbare Alkalisierung bzw. Ansäuerung des Wassers mit Änderung der Temperatur vor; z. B.: bei 0 °C beträgt der pK_w 14,89, d.h. der pH-Wert ist 7,45; bei 100 °C beträgt der pK_w 12,13, d.h. der gemessene pH-Wert ist 6,07. Dieser entspricht jedoch bei reinem Wasser auch dem pOH-Wert.

5.2.3 Verwendung des pH-Wertes

Durch Zusatz einer Säure wird die Konzentration an H_3O^+ -Ionen erhöht, der pH-Wert sinkt. Durch Zugabe einer Base steigt die Konzentration an OH^- -Ionen, wodurch der pH-Wert steigt.

Die folgende Tabelle zeigt den pH-Wert und die Konzentrationen von Säuren und Basen (eine wässrige Lösung von HCl bezeichnet man als Salzsäure, eine wässrige Lösung von NaOH als Natronlauge). Konzentrationen (alles bei Standardbedingungen gemessen) (Tab.5.1):

$pH = -\lg c(H_3O^+)$		(H_3O^+) in $mol \cdot l^{-1}$
0	1 molare HCl	$c(H_3O^+) = 10^0$
1	0,1 molare HCl	$c(H_3O^+) = 10^{-1}$
2	0,01 molare HCl	$c(H_3O^+) = 10^{-2}$
3	0,001 molare HCl	$c(H_3O^+) = 10^{-3}$
7	Neutralpunkt, reines Wasser	$c(H_3O^+) = 10^{-7}$
12	0,01 molare NaOH	$c(H_3O^+) = 10^{-12}$
13	0,1 molare NaOH	$c(H_3O^+) = 10^{-13}$
14	1 molare NaOH	$c(H_3O^+) = 10^{-14}$

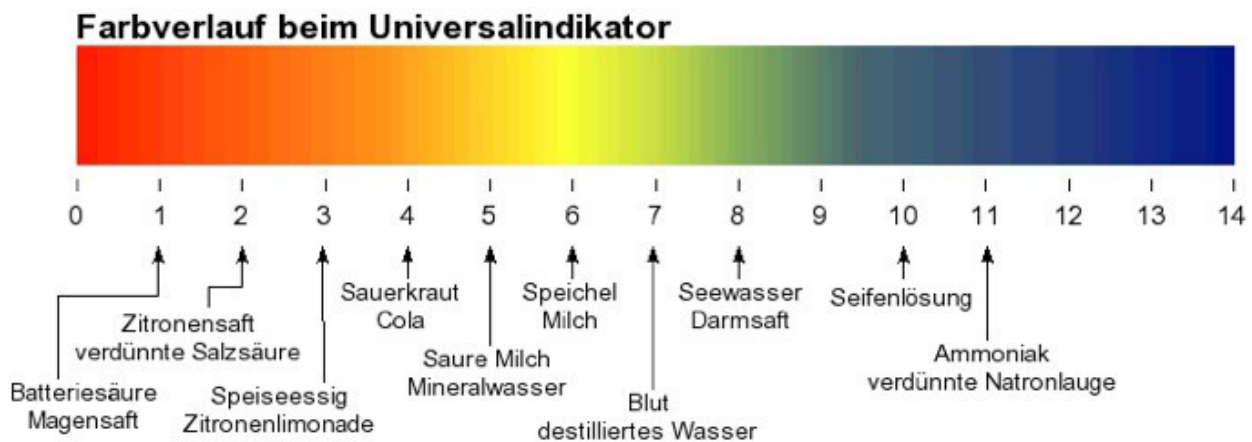
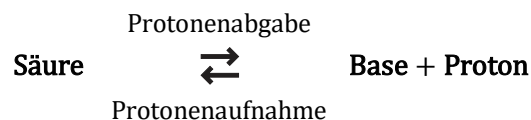


Abb. 5.1: Typische pH-Werte und Universalindikator

5.2.4 Korrespondierende Säuren und Basen (abgekürzt korr. Säure/Base-Paare)

Die Abgabe von Protonen einer Säure (HA) funktioniert nur, wenn eine Base (B) als Akzeptor für die Protonen zur Verfügung steht, wobei diese Protonen-Übertragung immer eine reversible Reaktion darstellt. Das bedeutet, dass aus der H^+ -abgebenden Säure automatisch eine Base wird, die ein Proton wieder aufnehmen kann, bzw. aus der H^+ -aufnehmenden Base eine Säure wird, die dieses Proton wieder abgeben kann. Man spricht dabei von einem korrespondierenden Säure-Basen-Paar.



In wässrigen Lösungen dient Wasser als Reaktionspartner sowohl für Säuren als auch Basen. Dabei nimmt Wasser je nach Stärke der Säure (siehe unten) Protonen auf und wirkt so als Base, oder gibt Protonen ab, wenn die Base stärker ist (siehe unten). In diesem Fall wirkt Wasser als Säure. Diese Verbindungen, die wie Wasser beide Funktionen (Base oder Säure) übernehmen können, nennt man Ampholyte. In jedem Fall stellt sich ein Gleichgewicht mit Wasser als Reaktionspartner ein. Ob das Gleichgewicht auf Seiten der Edukte oder der Produkte liegt, hängt von der Stärke der Säuren oder Basen im Vergleich zu Wasser ab (siehe unten).

Vereinfachte Darstellung:



Im folgenden Beispiel sind zwei Wasserstoffverbindungen dargestellt: CH_3COOH (Essigsäure) und NH_3 (Ammoniak) in Wasser. Im Vergleich zu Wasser ist Essigsäure eine stärkere Säure und gibt daher ein Proton ab. Dabei bildet sich ein Oxonium-Ion und der Säurerest, die Base Acetat, entsteht. Bei Ammoniak ist das Wasser die stärkere Säure und gibt ein Proton ab. Es bildet sich eine Säure (das Ammonium-Ion) und der Säurerest vom Wasser, ein Hydroxidion, entsteht. Um herauszufinden, ob ein Stoff tatsächlich Protonen auf Wasser überträgt oder aus dem Wasser Protonen akzeptieren kann, muss man die Säure- bzw Basenstärke kennen.



Die Säurestärke ist ein Maß für die Bereitwilligkeit einer Substanz, Protonen abzugeben.

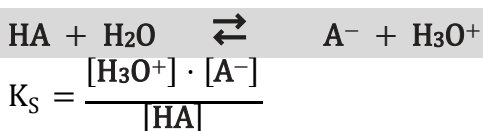
Je stärker die Säure, desto größer das Bestreben, Protonen abzuspalten, sobald ein geeigneter Partner, der als Base (in aller Regel Wasser) fungieren kann, vorhanden ist.

Je stärker die Säure, desto weiter liegt das Gleichgewicht auf der Seite der Produkte.

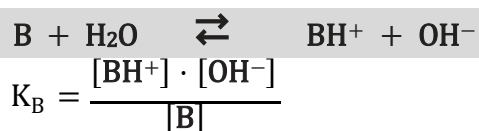
Ist beispielsweise B eine stärkere Base als A^- , liegt das Gleichgewicht auf der rechten Seite.

Der K_S -Wert einer Säure, gibt die Stärke der Säure an. Der K_B -Wert einer Base, gibt die Stärke der Base an.

Reaktion einer Säure mit Wasser:



Reaktion einer Base mit Wasser:



Achtung: Die Konzentration von Wasser ist als Konstante in K_S bzw K_B bereits miteinbezogen (siehe oben).

Je stärker die Säure, desto größer ist der K_S -Wert. Liegt der K_S -Wert über 1, so reagiert eine Säure mit Wasser zu 50%. Das bedeutet, dass die Produkte überwiegen; also H_3O^+ - und A^- -Ionen den größeren Anteil im Gemisch ausmachen.

Wie oben ersichtlich, leiten sich die Säurekonstanten aus dem MWG ab. Diese Konstanten müssen experimentell bestimmt werden. Die Säurekonstanten sind die Gleichgewichtskonstanten, in die die Konzentration des Wassers eingerechnet wurde (wie schon bei der Ableitung des Ionenproduktes des Wassers beschrieben wurde, siehe oben).

Obwohl hier die Annahme, dass die Konzentration des Wassers konstant ist, eigentlich nicht mehr ganz korrekt ist (denn ein beträchtlicher Teil der Wassermoleküle kann ja als Protonenakzeptor oder -donator fungieren), kann dies der Einfachheit halber ignoriert werden, wenn mit verdünnten wässrigen Lösungen gearbeitet wird. So kann mithilfe der Säurekonstante errechnet werden, welchen pH-Wert (Konzentration an Oxonium-Ionen) eine Lösung aufweist, die eine bestimmte Konzentration an Säure/Base enthält. Ebenso gilt, dass man bei Rechnungen mit der Säure- bzw. Basenkonstante den neg. dekadischen Logarithmus verwendet:

$$pK_S = -\log(K_S) \quad pK_B = -\log(K_B)$$

Weiter gilt konsequenterweise, dass der K_S -Wert einer Säure und der K_B -Wert ihrer konjugierten Base in Wasser voneinander abhängig sind:

$$pK_S + pK_B = pK_W = 14$$

Daraus folgt auch, dass jedes korrespondierende Säure-Base-Paar einen pK_S - und einen pK_B -Wert besitzt, wobei eine starke Säure immer mit einer schwachen Base, eine starke Base mit einer schwachen Säure korrespondiert.

Sehr starke Säuren mit einem K_S -Wert über 100 reagieren nahezu vollständig mit Wasser. Das bedeutet, dass alle vorliegenden Säuren ihre Protonen abgegeben haben, welche nun als Oxonium-Ionen vorliegen. Dies gilt ebenso für sehr starke Basen. Sie entziehen dem Wasser Protonen in dem Ausmaß ihrer Konzentration. Aus der Konzentration der starken Säure/Base kann somit direkt auf den pH-Wert/pOH-Wert geschlossen werden.

Dies funktioniert sehr gut, solange die Konzentration der Säure/Base nicht sehr nah an die Konzentration von Wasser herankommt (generell bis etwa 1 mol/L). Bei sehr hohen Konzentrationen an Säuren oder Basen ist die Protonenabgabe oder Aufnahme vermindert. Hier tragen die Abstoßungskräfte der Ionen bei und die Tatsache, dass die Konzentration von Wasser (und damit die maximal mögliche Konzentration an Oxonium- oder Hydroxid-Ionen) limitiert ist. Man spricht von einem nivellierenden Effekt des Wassers. Daher rechnet man in solchen Fällen besser mit den sogenannten „Aktivitäten“.

Besitzt eine Säure mehrere Protonen, spricht man von mehrwertigen oder mehrbasigen Säuren. Die Protonen werden dabei schrittweise in aufeinanderfolgenden Protolysereaktionen auf eine Base übertragen. Das erste Proton wird immer am leichtesten übertragen. Das bedeutet, dass die Säurestärke der ersten Deprotonierungsstufe am höchsten ist. Beispiele dafür sind Schwefelsäure (H_2SO_4), Kohlensäure (H_2CO_3) und Phosphorsäure (H_3PO_4). H_3PO_4 ist eine dreibasige Säure. Aus H_3PO_4 entsteht nach Abgabe eines Protons zunächst Dihydrogenphosphat ($H_2PO_4^-$), dann Hydrogenphosphat (HPO_4^{2-}) und schließlich Phosphat (PO_4^{3-}).

5.2.5 Berechnung von pH-Werten

1. ...von wässrigen Lösungen starker Säuren:

Starke Säuren reagieren vollständig mit Wasser, sie liegen demnach vollständig protolysiert (oder deprotoniert) vor.

Die Konzentration der Ionen H_3O^+ entspricht der Gesamtkonzentration der Säure (C_S).

Ein Beispiel zur Berechnung anhand der starken Säure HCl:

HCl ist mit einer Konzentration von $C_S = 0,01 \text{ mol/L}$ gegeben. Die Konzentration der H_3O^+ -Ionen beträgt somit ebenfalls $0,01 \text{ mol/L}$. Der pH-Wert ist gleich dem negativen dekadischen Logarithmus der Gesamtkonzentration an H_3O^+ -Ionen.

$$pH = -\log(c(H_3O^+)) = 0,01 \frac{\text{mol}}{\text{l}} = 10^{-2} \text{ mol/l} \quad \text{also: } pH = -\log(c(H_3O^+)) = 2$$

2. ...von wässrigen Lösungen starker Basen:

Analog geht man bei der Berechnung des pH-Wertes starker Basen vor. Sie reagieren ebenfalls

vollständig mit Wasser. Es gilt, dass der pOH-Wert der Gesamtkonzentration der Base (C_B) bzw. der Konzentration der OH^- -Ionen entspricht.

Um den pH-Wert zu erhalten, benötigt man das Ionenprodukt von Wasser ($\text{pH} + \text{pOH} = \text{pK}_W = 14$). Daraus ergibt sich: $\text{pH} = 14 - \text{pOH}$.

3. ...von wässrigen Lösungen schwacher Säuren:

Schwache Säuren reagieren nicht vollständig mit Wasser, sie liegen nur teilweise protolysiert vor. Das Gleichgewicht der Reaktion mit Wasser befindet sich eher auf der linken Seite

($\text{HA} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_3\text{O}^+ + \text{A}^-$). Die Konzentration der H_3O^+ -Ionen entspricht also nicht der Gesamtkonzentration der Säure. Zur Berechnung des pH-Wertes muss das Protolysegleichgewicht betrachtet und die Säurenkonstante berücksichtigt werden:

$$K_S = \frac{c(\text{H}_3\text{O}^+) \cdot c(\text{A}^-)}{c(\text{HA}) \cdot c(\text{H}_2\text{O})}$$

Da aus je einem Teil Säure HA ein Oxonium-Ion H_3O^+ und ein Säurerest A^- entsteht, gilt:

$c(\text{H}_3\text{O}^+) = c(\text{A}^-)$. Bei schwachen Säuren ist $K_S < 1$ und darum die Menge der Produkte kleiner als die Menge der Edukte. Zur Vereinfachung der Gleichung wird darum die noch verbleibende Menge an undissoziierter Säure der Gesamtkonzentration (C_S) der schwachen Säure gleichgesetzt. Der daraus resultierende Fehler schlägt sich kaum in der Berechnung nieder, weil $c(\text{HA}) \gg c\text{A}^-$. Diese Vereinfachung erleichtert das Rechnen wesentlich.

Durch Einsetzen in die Formel folgt:

$$K_S = c^2(\text{H}_3\text{O}^+)/C_S \quad \text{bzw.} \quad c(\text{H}_3\text{O}^+) = \sqrt{K_S \cdot C_S} \quad \text{also:} \quad \text{pH} = 1/2 \cdot (\text{pK}_S - \log C_S)$$

Es lässt sich aus der oben genannten Formel bei bekanntem pH und der Konzentration einer schwachen Säure auch der pK_S berechnen:

$$\text{pK}_S = 2 \cdot \text{pH} + \log C_S$$

4. ...von wässrigen Lösungen schwacher Basen:

Die Berechnung des pOH-Wertes von schwachen Basen funktioniert auf dieselbe Weise wie bei schwachen Säuren:

$$\text{pOH} = 1/2 \cdot (\text{pK}_B - \log C_B) \quad \text{also:} \quad \text{pH} = 14 - \text{pOH}$$

5.2.6 Amphoterie

Verbindungen, die sowohl Protonen aufnehmen als auch abgeben können, bezeichnet man als Ampholyte oder amphotere Verbindungen. Sie können deshalb einen sauren und basischen Charakter besitzen. Bestimmt wird der Charakter vom jeweiligen Reaktionspartner. Das heißt, gegenüber starken Säuren zeigen sie basisches Verhalten, gegenüber starken Basen hingegen fungieren sie als Protonendonatoren.

Tab. 5.2 Übersicht Beispiele Ampholyt mit korrespondierender Base/Säure

korrespond. Base	Ampholyt	korrespond. Säure
OH^-	H_2O	H_3O^+
NH_2^-	NH_3	NH_4^+
CO_3^{2-}	HCO_3^-	H_2CO_3
PO_4^{3-}	HPO_4^{2-}	H_2PO_4^-

5.2.7 Neutralisationsreaktionen

Reagiert eine Säure mit einer Base spricht man von einer Neutralisation. Die Säurewirkung wird durch die Base aufgehoben und umgekehrt. Dabei entsteht eine wässrige Salzlösung.

Die Neutralisationsreaktion ist eine exotherme Reaktion, d.h. es wird stets Wärme (Neutralisationsenthalpie) frei. Aus der folgenden Gleichung erkennt man, dass an der Neutralisation einer Säure und einer Base die H_3O^+ - und OH^- -Ionen beteiligt sind, die Säurerest-Anionen und Base-Kationen bleiben gelöst in Wasser zurück. Aus der Reaktion von Salzsäure und Natronlauge entsteht das Salz Natriumchlorid, gelöst in Wasser. Obwohl auch dies eine Gleichgewichtsreaktion ist, liegt das Gleichgewicht so weit auf der Seite der Produkte, dass in Wasser keine Rückreaktion stattfinden kann. Beim Versuch, Kochsalz in Wasser zu lösen, wird sich nicht spontan Salzsäure und Natronlauge zurückbilden.



5.2.8 Säure-Base-Theorie nach Lewis

Nach Brönsted ist die Säure-Base-Reaktion die Übertragung eines Protons von einer Säure auf eine Base. Gemäß dieser Definition müssen alle Säuren einen Wasserstoff enthalten, den sie als H^+ abgeben können und alle Basen ein freies Elektronenpaar besitzen, um ein Proton (H^+) aufnehmen zu können.

Allerdings gibt es zahlreiche Verbindungen wie BF_3 , AlCl_3 oder SiF_4 , die offensichtlich keinen Wasserstoff tragen, aber dennoch in Wasser sauer reagieren. Deshalb wurden die Begriffe Säure-Base von Lewis neu definiert.

Lewis-Säuren besitzen eine unvollständig besetzte äußere Elektronenschale und können ein freies Elektronenpaar eines anderen Teilchens zur Bildung einer Bindung aufnehmen. Sie sind Elektronenpaar-Akzeptoren und haben einen elektrophilen (elektronensuchenden) Charakter.

Typische Vertreter sind: AlCl_3 , FeCl_3 , BF_3

Lewis-Basen stellen ein freies Elektronenpaar zur Bildung einer Atombindung zur Verfügung. Sie sind Elektronenpaar-Donatoren und haben einen nukleophilen (kernsuchenden) Charakter.

Die Definition einer Lewis-Base stimmt mit der nach Brönsted überein. Ein typischer Vertreter einer Lewis-Base ist das neutrale NH_3 sowie alle Anionen. Bei einer Säure-Base-Reaktion nach Lewis kommt es zur Ausbildung einer kovalenten Bindung zwischen einem Elektrophil und einem Nukleophil. Das dafür nötige Elektronenpaar stammt immer von der Base. Mit dem Säure-Basen-Begriff nach Lewis lassen sich sehr viele Reaktionsmechanismen in der organischen Chemie erklären.

5.2.9 pH-Werte von Säuren und Basen im Alltag (Tab.5.3)

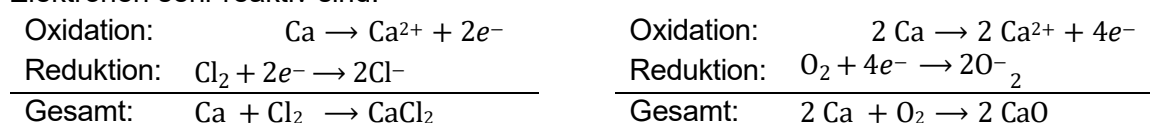
pH-Wert	Flüssigkeit	pH-Wert	Flüssigkeit
0	3,6%ige Salzsäure (1M)	7	Reines Wasser
2	Magensaft	7,4	Blut
2	Zitronensaft	8,2	Meerwasser
3	Essig	10	Waschmittellauge
3	Cola	12,6	Baukalklösung
4	Wein	14	4%ige Natronlauge (1M)
4,5	Saure Milch		
5	Bier		
5,5	Hautoberfläche		
6	Mineralwasser		
6,4	Speichel		

6 Redoxreaktionen und Oxidationszahlen

6.1 REDOXREAKTIONEN

Redoxreaktionen sind chemische Reaktionen, bei denen immer ein Oxidationsvorgang und ein Reduktionsvorgang gleichzeitig ablaufen. Ursprünglich beschrieb Antoine L. De Lavoisier die bei Verbrennungsprozessen stattfindende Oxidation als Aufnahme von Sauerstoff, den umgekehrten Vorgang, die Sauerstoffabgabe, als Reduktion. Da es jedoch auch verbrennungsprozessähnliche Reaktionen ohne Mitwirkung von Sauerstoff gibt, mussten die Begriffe Reduktion und Oxidation erweitert werden.

Bei dem Vergleich von Reaktionen von Metallen mit Sauerstoff oder mit Halogenen fiel auf, dass die Metalle Elektronen abgeben und die Reaktionspartner diese aufnehmen. Die Abgabe der Elektronen führte zur Oxidation des Metalls. Sauerstoff bzw. das Halogen nehmen die Elektronen auf und werden in einem zweiten Schritt reduziert. Die Reaktionen laufen immer gleichzeitig ab, da freie Elektronen sehr reaktiv sind.



Der Begriff Redoxreaktion wurde als **Elektronenübertragungsreaktion** neu definiert.

Man spricht auch von Donator-Akzeptor-Reaktionen, ähnlich wie bei Säure-Base-Reaktionen, wobei im Gegensatz zu Protonen hier Elektronen übertragen werden. Das bedeutet, dass man unter Oxidation die Abgabe von Elektronen und unter Reduktion die Aufnahme von Elektronen versteht. Betrachtet man die Redoxreaktion von Chlor und Calcium, wird das Calcium durch Chlor oxidiert.

Bei einer Redoxreaktion nimmt ein Atom oder Molekül Elektronen auf.
Bei einer Oxidationsreaktion werden Elektronen abgegeben.
Beide Reaktionen können nur gekoppelt als Donator-Akzeptor-Reaktion ablaufen.

Man bezeichnet Chlor daher als Oxidationsmittel oder auch Elektronenakzeptor. Calcium reduziert Chlor und wird als Reduktionsmittel oder Elektronendonator bezeichnet.

Während einer Redoxreaktion bilden sich folglich immer zwei korrespondierende Redoxpaare, die im Gleichgewicht miteinander stehen.

Oxidationsmittel oxidieren ihre Reaktionspartner und werden selbst reduziert. Reduktionsmittel reduzieren andere und werden dabei selbst oxidiert.

6.2 Oxidationszahlen

Zur Beschreibung von Redoxreaktionen verwendet man formal die Oxidationszahlen. Sie werden als arabische Ziffern mit vorgesetztem Vorzeichen über die Elementsymbole geschrieben und ändern sich entsprechend einer Oxidation oder Reduktion.

Zur Bestimmung der Oxidationszahlen stellt man die sogenannte Lewis-Formel einer Verbindung auf und ordnet gedanklich jedem Element nach gewissen Regeln die Außenelektronen zu:

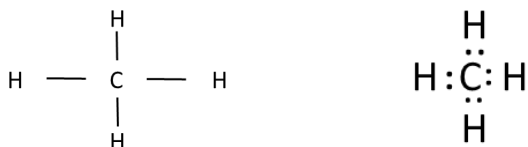


Abb. 6.1: Valenzstrichformel (links) und Lewis-Formel (rechts) von Methan

- Zwischen zwei Atomen unterschiedlicher Elektronegativität werden die Elektronen der Bindung dem elektronegativeren Atom zugeordnet.
- Handelt es sich um zwei gleiche Bindungspartner, werden die Elektronen auf beide Partner aufgeteilt. Freie Elektronenpaare bleiben bei dem entsprechenden Atom.

Die Oxidationszahl (OZ) ergibt sich aus der Anzahl der Außenelektronen eines Elements minus der Anzahl der zugeordneten Elektronen. Die höchst mögliche OZ ergibt sich aus der Gruppennummer eines Elements im PSE. Ausnahmen sind Fluor und Sauerstoff.

Beispiel Wasser: $\text{H}-\text{O}-\text{H}$

$$\begin{aligned}\text{H: } & 1 - 0 = 1 \\ \text{O: } & 6 - 8 = -2\end{aligned}$$

Beispiel Kohlenstoffdioxid: $\text{O}=\text{C}=\text{O}$

$$\begin{aligned}\text{C: } & 4 - 0 = +4 \\ \text{O: } & 6 - 8 = -2\end{aligned}$$

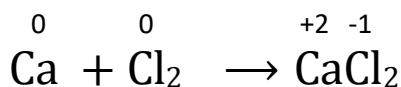
Negative OZ erhalten ein negatives Vorzeichen.

Einige Regeln erleichtern das Ermitteln der OZ:

- Atome in Elementarsubstanzen haben immer eine OZ von 0 (O_2 , H_2 , P_4 , C, Na, Mg, Zn).
- Bei einfach geladenen Ionen entspricht die OZ der Ladung des Ions ($\text{Mg}^{2+} \rightarrow +2$, $\text{Al}^{3+} \rightarrow +3$, $\text{S}^{2-} \rightarrow -2$, $\text{Cl}^- \rightarrow -1$, $\text{Fe}^{2+} \rightarrow +2$, $\text{Fe}^{3+} \rightarrow +3$).
- Fluor hat in Verbindungen immer die OZ -1 .
- Wasserstoff hat in organischen Verbindungen immer die OZ $+1$.
- Sauerstoff hat in Verbindungen immer die OZ -2 (Ausnahme Peroxide: -1).
- Die Summe aller OZ eines Teilchens (Molekül oder Ion) entspricht dessen Ladung.

Bei neutralen Molekülen ist diese Summe naturgemäß 0.

Bei der Oxidation kommt es zur Erhöhung der OZ des Elements, bei der Reduktion zur Erniedrigung der OZ. Die Oxidationszahlen können in Reaktionsgleichungen über den Elementsymbolen dargestellt werden:



7 Funktionelle Gruppen und Trivialnamen

Die IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) regelt die genaue Namensgebung von Verbindungen. Häufig aber werden Trivialnamen verwendet, entweder aus historischen Gründen oder aber der Einfachheit halber.

7.1 NOMENKLATUR ALIPHATISCHER UND AROMATISCHER KOHLENWASSERSTOFFE

Kohlenwasserstoffe sind unpolare organische Verbindungen. Sie bestehen nur aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen, welche über Atombindungen miteinander verknüpft sind.

Aliphatische Kohlenwasserstoffe können kettenförmige, verzweigte oder unverzweigte Strukturen einnehmen, oder auch ringförmig sein. Diese können sowohl gesättigt als auch ungesättigt sein, also nur Einfachbindungen oder auch zumindest eine Mehrfachbindung enthalten. Aromate, die in einer ringförmigen Verbindung konjugierte Doppelbindungen aufweisen, gehören jedoch nicht zu den aliphatischen Verbindungen.

Bei den gesättigten Kohlenwasserstoffen sind die Kohlenstoffatome ausschließlich über Einfachbindungen miteinander verknüpft. Der Name der jeweiligen Verbindung ergibt sich aus dem Stamm eines Zahlenwortes, gemäß der Anzahl der Kohlenstoffatome, und der Endung „-an“. Diese Bezeichnung gibt an, dass keine Mehrfachbindung im Molekül enthalten ist. Man nennt die gesättigten aliphatischen Kohlenwasserstoffe im Allgemeinen Alkane (Tab. 7.1 Übersicht Alkane).

n	Name	n	Name	n	Name
1	Methan	5	Pentan	9	Nonan
2	Ethan	6	Hexan	10	Decan
3	Propan	7	Heptan	11	Undecan
4	Butan	8	Octan	12	Dodecan

n = Anzahl der Kohlenstoffe in der Kette

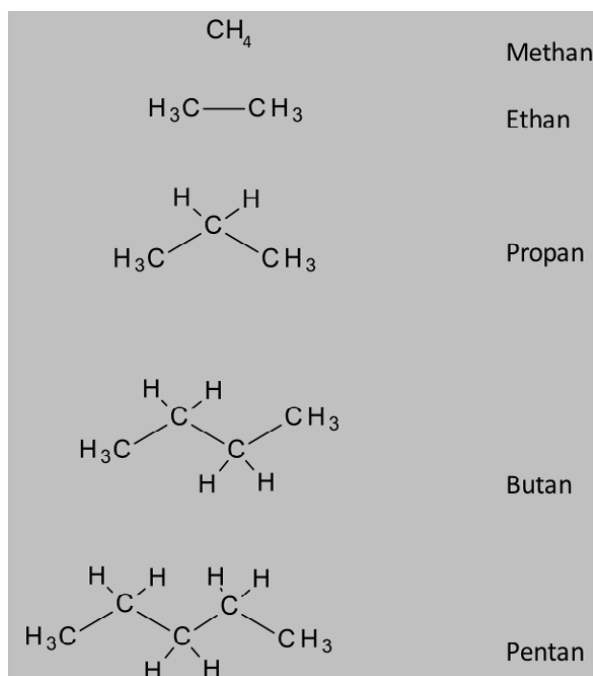


Abb. 7.1: Valenzstrichformel von Alkanen

Bei der vereinfachten Darstellung von Molekülen in Form sogenannter Skelettformeln handelt es sich um eine abstrahierende Schreibweise, bei der C- und H-Atome nicht ausgeschrieben, sondern impliziert (vorausgesetzt) werden (siehe auch unter 3.1). Endständige Methylgruppen (-CH₃) werden entweder weggelassen oder ausgeschrieben (siehe Butan in Abb. 7.2 im Vergleich zur Abb. 3.10). Beide Versionen sind gleichermaßen richtig.

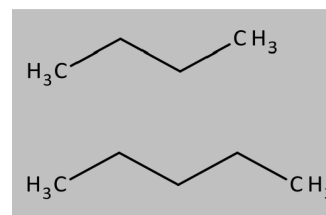


Abb. 7.2: Skelettformel von Butan und Pentan

Bei den ungesättigten Kohlenwasserstoffen sind mindestens zwei Kohlenstoffe durch Mehrfachbindungen miteinander verknüpft. Bei den Alkenen sind sie durch eine Doppelbindung verbunden, welche durch die Endung „-en“ gekennzeichnet wird.



Im Falle der Alkine sind sie durch eine Dreifachbindung verbunden. Sie tragen die Endung „-in“.



Aromatische Kohlenwasserstoffe sind ringförmige, ungesättigte organische Verbindungen. Alle Atome des Rings sind sp²-hybridisiert und liegen in einer Ebene. Die p-Orbitale stehen senkrecht zu dieser Ebene und sind von je einem Elektron besetzt. Sie überlappen ober- und unterhalb der Ebene und führen dadurch zu einem gemeinsamen π-System, in dem die Elektronen über den Ring verteilt delokalisiert sind. Ein wichtiger Grundkörper der Aromate bildet der Benzen-Ring (Benzol, andere Grundkörper sind weiter unten bei den Heteroaromaten dargestellt).

Die übliche Darstellung von Benzen erfolgt durch die beiden mesomeren Grenzstrukturen (Mitte rechts als Skelettstrukturen). Daraus folgt, dass das „reale“ Benzen genaugenommen weder der linken noch der rechten Darstellung entspricht, sondern einer Überlagerung beider. Dies bedeutet, dass alle C-C-Bindungen gleich lang sind und alle Bindungswinkel des Ringes 120° betragen und die „reale“ Struktur am besten wie folgt ganz rechts wiedergegeben wird:

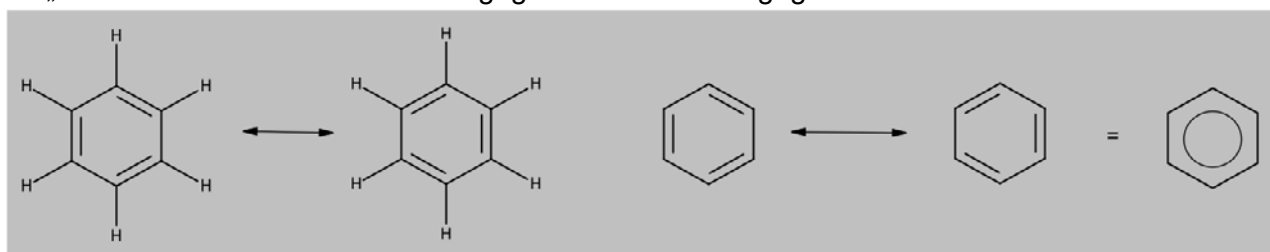
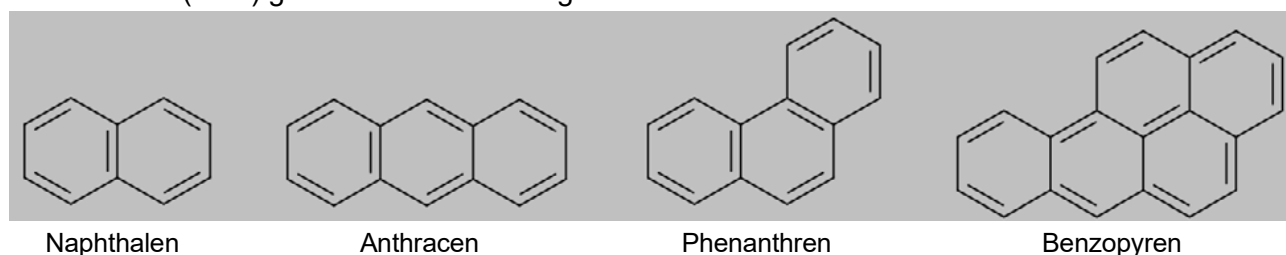


Abb. 7.3: Darstellungsweisen des Benzens

Unter kondensierten Benzenen versteht man Systeme, die aus mehreren, an einer Seite miteinander verbunden Benzenringen aufgebaut sind. Sie werden auch polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) genannt und besitzen größtenteils Trivialnamen.



Naphthalen

Anthracen

Phenanthren

Benzopyren

Abb. 7.4: Beispiele für polycyclische Aromate

Heteroaromaten sind aromatischen Verbindungen, welche an Stelle eines oder mehrerer Kohlenstoffatome Stickstoff-, Sauerstoff- oder Schwefelatome (Heteroatome) besitzen.

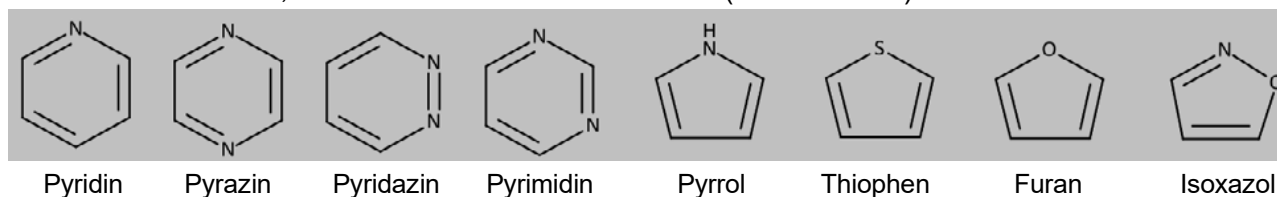


Abb. 7.5: Beispiele für Heteroaromate

7.2 FUNKTIONELLE GRUPPEN

Organische Verbindungen besitzen Atome oder Atomgruppen in Form von funktionellen Gruppen. Diese sind größtenteils für die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Verbindungen verantwortlich.

Beispiele für funktionelle Gruppen:

Name	Struktur	Stoffklasse	Name	Struktur	Stoffklasse
Halogen		Halogenalkane	Aldehyd-Gruppe		Aldehyde
Amino-Gruppe		Amine	Keto-Gruppe		Ketone
Hydroxy-Gruppe		Alkohole	Carboxy-Gruppe		Carbonsäure
Ether-Gruppe		Ether			

Abb. 7.6: Beispiele für in Biomolekülen oft zu findende funktionelle Gruppen

Halogenalkane entstehen aus Alkanen durch den Austausch eines oder mehrerer Wasserstoffatome gegen Halogenatome; X = F, Cl, Br, I

An den Kohlenstoffatomen, die die funktionellen Gruppen tragen, können noch organische Reste gebunden sein. Diese werden als Alkylreste bezeichnet, wenn sie keine aromatischen Strukturen aufweisen. Bei Vorhandensein eines aromatischen Restes spricht man von Arylresten.

Amine sind organische Verbindungen, die sich von Ammoniak (NH₃) ableiten. Ihre Wasserstoffatome werden teilweise bis völlig gegen organische Reste ausgetauscht. Man unterteilt die Amine in drei Gruppen: in primäre, sekundäre und tertiäre Amine; wobei die primären Amine einen, sekundäre zwei und tertiäre Amine drei organische Reste tragen. Sie können auch Teil eines Ringes sein. Im Folgenden sieht man drei offenkettige und zwei cyclische Amine (sek./prim./tert. Amin, tert./sek. Amin) sowie ein aromatisches Amin (= Anilin):

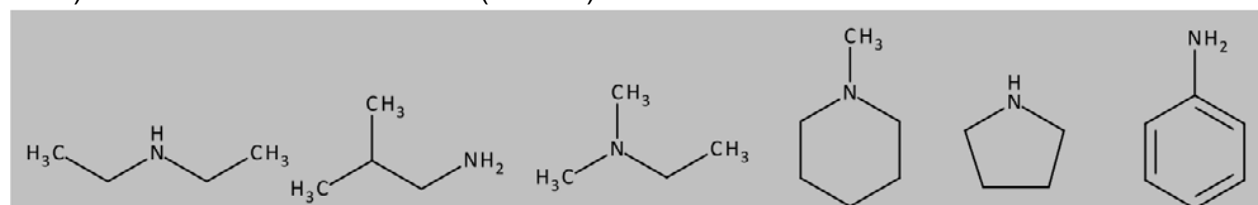


Abb. 7.7: Amine

Alkohole tragen als namensgebende Einheit eine Hydroxy-Gruppe. Je nach Anzahl der Hydroxy-Gruppen (an unterschiedlichen C-Atomen) spricht man von ein-, zwei-, dreiwertigen etc. Alkoholen. Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal von Alkoholen liegt im Substitutionsgrad des C-Atoms, das die OH-Gruppe trägt, mit Alkylgruppen. Je nach Anzahl der verknüpften organischen Reste spricht man jeweils von einem primären, sekundären oder tertiären Alkohol. Im Folgenden einige exemplarische Beispiele, abgeleitet von Butanol:

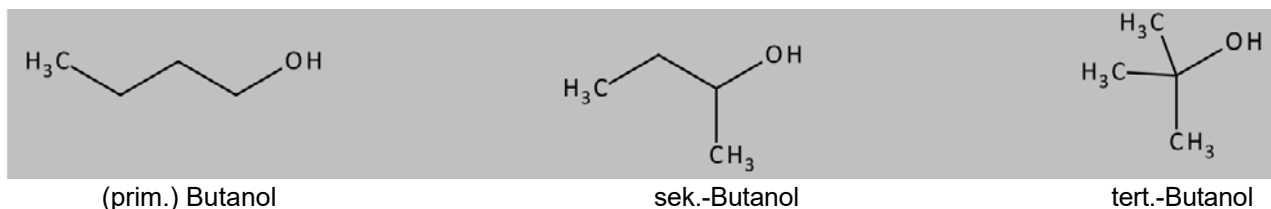


Abb. 7.8: Nomenklatur von Alkoholen

Phenole besitzen einen Benzenring, an den mindestens eine OH-Gruppe gebunden ist. Zu dieser Stoffklasse gehören auch mehrfach substituierte Hydroxybenzene, wie die zweiwertigen und dreiwertigen Phenole:

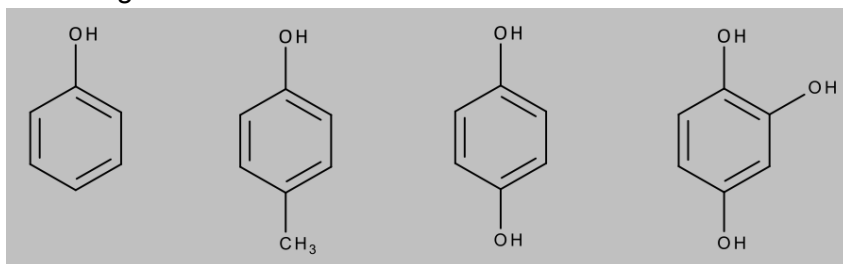


Abb. 7.9: Beispiele für Benzole

Bei Ether-Verbindungen sind zwei organische Reste über ein Sauerstoffatom miteinander verbunden. Sind die organischen Reste gleich, spricht man von symmetrischen Ethern; sind sie ungleich, von unsymmetrischen Ethern. Das Sauerstoffatom kann auch Bestandteil eines Rings sein; man bezeichnet es dann als cyclischen Ether. Aromatische Ether bezeichnet man auch als Phenoether; exemplarische Beispiele:

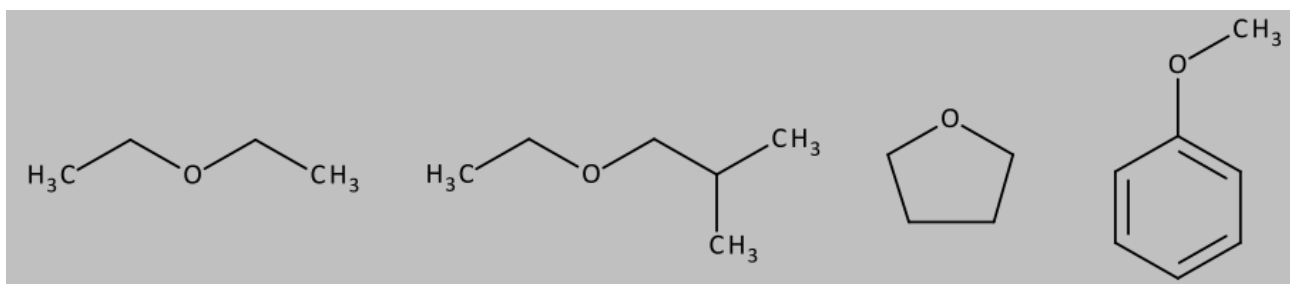


Abb. 7.10: Beispiele für Ether

Zu den Carbonylverbindungen gehören zwei Gruppen: die Aldehyde und die Ketone. Aldehyde sind organische Verbindungen mit einer Aldehydgruppe (-CHO) als funktioneller Gruppe und einem organischen Rest, der entweder aliphatisch oder aromatisch sein kann. Ebenfalls zu den Carbonylverbindungen zählen die Ketone. Bei dieser Stoffklasse wurde das Wasserstoffatom der Aldehyd-Gruppe durch einen weiteren organischen Rest ersetzt.

Beispiele für Aldehyde und Ketone:

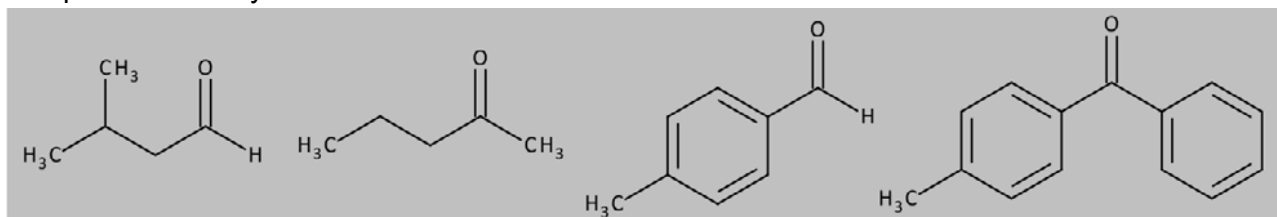


Abb. 7.11: Beispiele für Aldehyde und Ketone

Carbonsäuren sind organische Verbindungen und besitzen mindestens eine Carboxygruppe im Molekül. Man unterscheidet zwischen Monocarbonsäuren und mehrwertigen Di- und Tricarbonsäuren. Die gesättigten aliphatischen unverzweigten Monocarbonsäuren ergeben die homologe Reihe der Alkansäuren.

Trägt ein Molekül eine Carboxygruppe, wird diese Substanz als Carbonsäure bezeichnet.

Bekanntestes Beispiel für eine aromatische Carbonsäure ist die Benzoesäure:

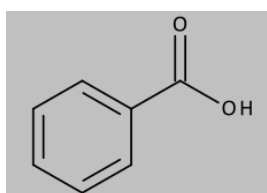


Abb. 7.12: Benzoesäure

Bei gesättigten Verbindungen ergibt sich der Name aus dem Alkan, einschließlich des Kohlenstoffatoms der Carboxygruppe, und der Endung „-säure“. Viele Carbonsäuren tragen aufgrund ihrer häufigen Verwendung auch Trivialnamen (s. Tab. 7.2):

Anzahl C-Atome	Chemische Bezeichnung	Trivialname
1	Methansäure	Ameisensäure
2	Ethansäure	Essigsäure
3	Propansäure	Propionsäure
4	Butansäure	Buttersäure
5	Pentansäure	Valeriansäure
6	Hexansäure	Capronsäure
7	Heptansäure	Önanthsäure
8	Octansäure	Caprylsäure
9	Nonansäure	Pelargonsäure
10	Decansäure	Caprinsäure

Typische Carbonsäurenderivate erhält man durch Ersatz der OH-Gruppe;
im Folgenden exemplarische Beispiele:

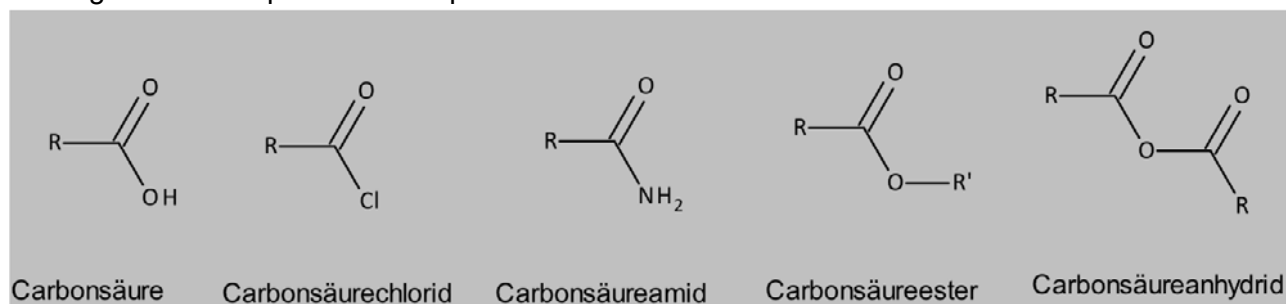


Abb. 7.13: Carbonsäurenderivate

8 Die wichtigsten Elemente der Organischen Chemie

8.1 EINLEITUNG

Etwa 90 Elemente kommen natürlich auf der Erde vor und bilden so die Grundlage sämtlicher chemischer Verbindungen. Von diesen wiederum bilden nur einige wenige Elemente den überwiegenden Anteil unserer Erdoberfläche und Atmosphäre, also den uns zugänglichen Teil der Erde. Von diesen wiederum sind nur einige in größeren Mengen in Biomolekülen zu finden. In diesem Kapitel werden die wichtigsten vorgestellt, wobei für die Funktionalität von Organismen auch andere Elemente, zum Beispiel „Spurenelemente“, vorhanden sein müssen.

8.2 DER WASSERSTOFF

8.2.1 Allgemeines

Das chemische Symbol für das Element Wasserstoff ist H (gr. hydrargenium = Wasserbildner; lat. hydrogenium). Die Ordnungszahl Z ist 1 und sein Atomgewicht beträgt 1,01 atomare Masseneinheiten (u). Damit ist Wasserstoff das leichteste aller Elemente. Insgesamt gibt es drei Isotope.

Im Fall von Wasserstoff wurden sie ausnahmsweise mit einem eigenen Namen versehen:

- ^1H (Protium, bestehend aus einem Elektron e^- und einem Proton p^+),
- ^2H (D für Deuterium, schwerer Wasserstoff, ein zusätzliches Neutron n) und
- ^3H (T für Tritium, superschwerer Wasserstoff, zusätzlich zwei Neutronen n).

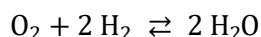
Der Wasserstoff steht zwar im Periodensystem in der ersten Gruppe, nimmt aber unter allen Elementen eine Sonderstellung ein.

Der Tritiumkern ist nicht stabil und wandelt sich durch einen radioaktiven β -Zerfall in ^3He um.

Der Atomkern besitzt ein Proton und die Elektronenhülle (das 1s-Orbital) ist mit einem Elektron besetzt. Nimmt der Wasserstoff ein Elektron auf, nimmt er die Edelgaskonfiguration des He ein, bei der Abgabe eines Elektrons bleibt ein isoliertes Proton als H^+ -Ion übrig. Dieses kann allerdings nicht frei existieren, sondern lagert sich z. B. an Lösungsmittelmoleküle wie H_2O an. Im Vergleich zu den anderen s^1 -Elementen, also den Alkalimetallen bzw. der 1. Hauptgruppe im Periodensystem, besitzt Wasserstoff eine doppelt so große Ionisierungsenergie und ist ein Nichtmetall. Er kann eine kovalente Bindung eingehen.

Wasserstoff bildet mit Abstand den größten Anteil der Gesamtmasse unseres Kosmos und ist somit das häufigste Element im Weltall.

Elementar kommt er als H_2 -Molekül vor, bei dem zwei Atome Wasserstoff durch eine kovalente Einfachbindung verbunden sind. H_2 ist ein Gas, das aufgrund seiner geringen Molekularmasse von nur $2,02 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ eine extrem geringe Dichte hat. Es ist wesentlich leichter als Luft und kann daher verwendet werden, um Ballons und Luftschiffen Auftrieb zu verleihen. Das birgt allerdings ein enormes Gefahrenpotential, da Wasserstoff im Gemisch mit Sauerstoff explosionsartig zu Wasser reagiert.



Diese sogenannte Knallgasreaktion kann bei etwa 400°C gezündet werden und setzt mit $-242 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ sehr viel Energie frei. 1937 führte diese Reaktion zur Explosion und dem katastrophalen Absturz des Luftschiffs Hindenburg. Heutzutage wird zur Erzeugung von Auftrieb nur das ungefährliche Helium verwendet.

Auf der Erde kommt Wasserstoff vor allem gebunden vor und ist viel seltener als im Weltall. Der größte Anteil von Wasserstoff ist in Wasser (H_2O) bzw. in Form von OH^- -Ionen in Mineralien gebunden. Aber auch Erdgas (z. B. Methan CH_4) und Erdöl enthalten Wasserstoff. Aufgrund der geringen Elektronegativität und der geringen Affinität, Elektronen aufzunehmen, hat Wasserstoff in den meisten Verbindungen die Oxidationszahl +1 (z. B. in Wasser H_2O und Ammoniak NH_3). Mit stark elektropositiven Metallen bildet Wasserstoff Metallhydride und hat dort die Oxidationszahl -1.

8.2.2 Verwendung

Wasserstoff hat viele Anwendungen in der Industrie und ist von großer wirtschaftlicher Bedeutung z. B. für die Ammoniaksynthese, für Raffinerieprozesse und für die Methanolsynthese. Weitere Anwendungsgebiete sind unter anderem die Verwendung bei Hydrierungen (z. B. Fetthärtung) und als Verbrennungsgas, mit welchem besonders hohe Temperaturen erreicht werden können (z. B. beim Schweißen).

Aufgrund seiner hohen Energiedichte ist der Wasserstoff ein bedeutender Energieträger. Wasserstoff kann mit Sauerstoff verbrannt oder in sogenannten Brennstoffzellen zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet werden. In beiden Fällen ist das Reaktionsprodukt Wasser. Damit wird bei der Energieerzeugung kein klimaschädliches Treibhausgas freigesetzt, was ein großer Vorteil gegenüber fossilen Energieträgern wie Erdöl oder Kohle ist, bei deren Verbrennung das Treibhausgas CO_2 freigesetzt wird. Dies gilt allerdings nur, wenn der Wasserstoff über erneuerbare Primärenergiequellen erzeugt wurde.

8.3 DIE HALOGENE

8.3.1 Allgemeines

Die Elemente der 7. Hauptgruppe (Gruppe 17 des Periodensystems) nennt man die Halogene (gr. hals = Salz; gennáo = erzeugen; daher = Salzbildner). Dazu gehören Fluor (F), Chlor (Cl), Brom (Br), Iod (I) und das radioaktive Astat (At) – das seltenste natürliche Element auf der Erde. Sie können daher durch die Aufnahme eines weiteren Elektrons die Edelgaskonfiguration erreichen. Die Eigenschaften innerhalb der Gruppe sind sehr ähnlich.

Alle Halogene weisen eine starke Elektronegativität auf und sind gute Oxidationsmittel, wobei Fluor das elektronegativste Element im Periodensystem und damit auch das stärkste Oxidationsmittel ist.

Die Halogene sind sehr reaktionsfreudig und nehmen leicht ein Elektron auf, wobei sie einfach negativ geladene Anionen bilden. Diese Ionen werden Halogenid-Ionen (Fluorid, Chlorid, etc.) genannt. Während Fluor nicht oxidiert werden kann, können Chlor, Brom und Iod in Verbindung mit einem elektronegativeren Element wie z. B. dem Sauerstoff auch noch die Oxidationsstufen +1, +3, +5 und +7 erreichen. Ein Beispiel ist das Perchlorat-Ion ClO_4^- , bei dem Chlor die Oxidationsstufe +7 hat.

Die Elektronegativität der Elemente nimmt innerhalb der Gruppe mit steigender Ordnungszahl ab (siehe auch 2.2.6). Aus diesem Grund haben die schweren Elemente innerhalb einer Gruppe oft metallischen Charakter, während die leichteren Elemente derselben Gruppe Nichtmetalle sind. Im Fall der Halogene sind sämtliche Elemente vom Fluor bis zum Iod Nichtmetalle, während das radioaktive Astat bereits metallischen Charakter besitzt.

Die nichtmetallischen Halogene bilden zweiatomige Moleküle, bei denen die beiden Atome durch eine kovalente Einfachbindung verbunden sind. Bei Normalbedingungen, also Raumtemperatur und Atmosphärendruck, sind F_2 und Cl_2 Gase, Br_2 ist eine Flüssigkeit und I_2 ist ein Feststoff. Die Schmelz- und Siedepunkte nehmen also mit zunehmender Molekülmasse zu, was ebenfalls ein

allgemein gültiges Prinzip für ansonsten gleichartige Moleküle ist. Die Halogene bilden viele wichtige Verbindungen und spielen sowohl in der industriellen Anwendung als auch für das Leben eine wichtige Rolle.

8.4 DIE CHEMIE DER HALOGENE

Alle Halogene kommen in Form von Halogenid-Ionen im Meerwasser vor, wobei hier das Chlorid das mit Abstand häufigste Anion ist. An Stellen, wo das Meerwasser in flachen Abschnitten und heißen Perioden eingedampft ist, entstanden große Salzlagerstätten, an denen die gelösten Salze schließlich auskristallisiert sind. Diese Salzlagerstätten sind wichtige Quellen für die Halogen-gewinnung.

Chlor ist für die chemische Industrie von zentraler Bedeutung, da bis zu 70% aller Chemieprodukte unter seiner Mitverwendung hergestellt werden. Aber auch das Steinsalz selbst wird in großen Mengen verwendet. Gereinigt ist es als Speisesalz für die Zubereitung von Nahrungsmitteln unentbehrlich, in weniger reinem Zustand wird es etwa als Streusalz verwendet, um die Eisbildung auf Straßen zu unterdrücken. Die Wirkung des Streusalzes beruht auf der molaren Schmelzpunkt-erniedrigung. Das heißt, die Salzlösung besitzt einen niedrigeren Schmelzpunkt als das Lösungsmittel (H_2O). In einer gesättigten Salz-Wassereis-Mischung setzt der Schmelzprozess bereits bei $-21,1\text{ }^\circ\text{C}$ ein. Die Verwendung von Streusalz hat aber auch Nachteile für die Umwelt. So gelangt das Streusalz mit dem Schmelzwasser in den Boden bzw. in die Gewässer und kann dort bei überhöhten Konzentrationen Flora und Fauna empfindlich schädigen.

Mit Wasserstoff bilden die Halogene die Halogenwasserstoffe HX (X =Halogene): ätzende, gasförmige Verbindungen, die in Wasser Säuren bilden.

8.5 DIE 6. HAUPTGRUPPE: SAUERSTOFF UND SCHWEFEL

8.5.1 Allgemeines

Die 6. Hauptgruppe (Gruppe 16) bilden die sogenannten Chalkogene (gr. chalkós = Kupfer, Bronze; gr. gennáo = erzeugen; daher = Erzbildner). Diese Bezeichnung leitet sich aus dem Umstand ab, dass Sauerstoff und Schwefel am Aufbau vieler natürlicher Erze beteiligt sind. Dazu gehören Sauerstoff (O), Schwefel (S), Selen (Se), Tellur (Te) und das seltene und radioaktive Polonium (Po). Die Unterschiede bei den chemischen und physikalischen Eigenschaften innerhalb dieser Gruppe sind signifikanter als bei der Gruppe der Halogene. Vor allem der Sauerstoff – nach dem Fluor das elektronegativste Element – unterscheidet sich chemisch deutlich von den schwereren Chalkogenen. Die ersten beiden Elemente zählen zu den Nichtmetallen, Selen und Tellur werden aufgrund ihrer Eigenschaften zu den Halbmetallen gezählt und das radioaktive Polonium ist ein Metall. Chalkogene können bis zu 2 Elektronen aufnehmen und damit die Edelgaskonfiguration erreichen. Besonders die schwereren Chalkogene können aber auch bis zur Oxidationsstufe +6 oxidiert werden.

Die Chemie der beiden wichtigsten Chalkogene, Sauerstoff und Schwefel, wird im Folgenden ausführlicher dargestellt.

8.5.2 Der Sauerstoff

Sauerstoff kommt elementar in zwei Modifikationen vor, nämlich als zweiatomiges Molekül O_2 und als dreiatomiges Molekül O_3 (dem Ozon). Elementarer Sauerstoff in Form von O_2 ist zu ca. 21 Vol.% Bestandteil der Luft. Sauerstoff spielt in gebundener Form in vielen Verbindungen eine wichtige Rolle, sowohl in der Organik als auch in der Anorganik.

So ist Sauerstoff ein Hauptbestandteil der meisten Mineralien: in Oxiden wie z. B. Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3 = Hämatit) oder Siliciumdioxid (SiO_2 = Quarz) oder in Oxo-Anionen wie z. B. Carbonaten

(CO_3^{2-}), Silicaten (SiO_4^{4-}) und Phosphaten (PO_4^{3-}). Als Dihydrogenoxid (H_2O = Wasser) ist Sauerstoff Hauptbestandteil der Hydrosphäre.

Durch sein ubiquitäres Vorkommen ist Sauerstoff mit ca. 49 Massenprozent deshalb mit Abstand das häufigste Element auf der Erdoberfläche.

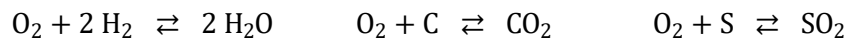
Unter normalen Bedingungen ist Sauerstoff als Molekül O_2 gasförmig, farb-, geruch- und geschmacklos.

Im Molekül O_2 sind die beiden Sauerstoffatome durch eine Doppelbindung verbunden. Diese Bindung ist sehr stabil, weshalb elementarer Sauerstoff trotz seiner hohen Oxidationskraft bei Raumtemperatur reaktionsträge ist.

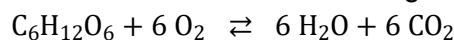
Erst bei hohen Temperaturen kann die Doppelbindung aufgebrochen werden und der Sauerstoff geht dann Verbindungen mit fast allen Elementen ein.

Da der Sauerstoff ein starkes Oxidationsmittel ist, verlaufen diese Reaktionen oft stark exotherm, wobei Sauerstoff üblicherweise von der Oxidationsstufe 0 zur Oxidationsstufe -2 reduziert wird. Man spricht bei der Reaktion mit Sauerstoff von einer Verbrennung;

z. B.: Reaktionsgleichungen für die Verbrennung von Wasserstoff, Kohlenstoff und Schwefel:



Der Sauerstoff ist von überragender Bedeutung für das Leben. Für die meisten Organismen ist er die Grundlage der Zellatmung. Bei der aeroben Atmung dient Sauerstoff als Oxidationsmittel, wobei die dabei freiwerdende Energie für die Bildung des Moleküls Adenosintriphosphat (ATP) benötigt wird. Die dort gespeicherte Energie kann dann an den entsprechenden Stellen wieder abgegeben werden. Somit fungiert ATP als wichtigster Energieträger in vielen Organismen. Beim Stoffwechselprozess entsteht durch die Oxidation der Glukose mit Sauerstoff, der selbst reduziert wird, Wasser und Kohlendioxid; die dabei freiwerdende Energie wird zur Bildung von ATP verwendet.



Im menschlichen Körper wird der Sauerstoff über die Lunge aufgenommen und im Blut von dem Transportmolekül Hämoglobin gebunden und weitertransportiert. Hämoglobin ist eine Komplexverbindung, bei der Eisen(II)-Ionen als Zentralionen fungieren und O_2 -Moleküle koordinativ binden. Sauerstoff wird außerdem auch von Lebewesen (Pflanzen) bei der Photosynthese als Nebenprodukt erzeugt. Nur deshalb enthält unsere Atmosphäre überhaupt freien Sauerstoff.

Ozon

Ozon, die zweite Modifikation des elementaren Sauerstoffs ist ein blassblaues, stechend riechendes Gas. Es ist giftig und wesentlich reaktiver als das O_2 -Molekül. Das O_3 -Molekül ist gewinkelt und hat zwei gleich lange O-O Abstände. Die Lewis-Formel kann nur als mesomere Grenzstruktur angegeben werden. Die echte Struktur des Moleküls liegt daher zwischen den unten angegebenen teilionischen oder diradikalen Grenzformen (siehe Abb. 8.1).

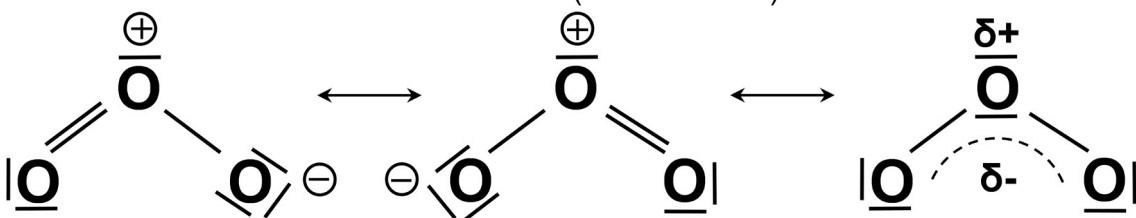
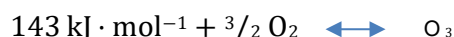


Abb. 8.1: Mesomere Grenzstrukturen von Ozon

Ozon ist energiereicher als O_2 und kann aus diesem gebildet werden.



Es bildet sich z. B. in der Umgebung von hohen elektrischen Feldern bei Blitzeinschlag. In den

höheren Schichten der Atmosphäre werden durch ultraviolettes Licht O_2 -Moleküle gespalten und aus den Bruchstücken O_3 aufgebaut. Ozon hat wiederum die Eigenschaft, ultraviolettes Licht zu absorbieren und fungiert so als UV-Filter in der Stratosphäre.

Die Ozonschicht in der Stratosphäre (in ca. 20-30 km Höhe) hat also eine wesentliche Schutzfunktion gegen die intensive, schädliche UV-Einstrahlung der Sonne. Bodennahes Ozon ist dagegen für den Menschen und andere Organismen schädlich. Es entsteht vor allem an Tagen mit hoher Sonneneinstrahlung bei Luftverschmutzung mit Stickstoffoxiden.

Der Sauerstoff bildet mit fast allen Elementen Verbindungen, die in Abhängigkeit seiner Oxidationsstufe als Oxide, Peroxide, Hyperoxide und Ozonide bezeichnet werden. In Oxiden hat der Sauerstoff die Oxidationsstufe -2, während die Peroxide eine einfach gebundene O-O Gruppe enthalten und der Sauerstoff deshalb die Oxidationsstufe -1 hat. Ein Beispiel ist das Wasserstoffperoxid H_2O_2 . Diese Verbindung ist ein gutes Oxidationsmittel und wird in wässrigen Lösungen, die üblicherweise zwischen 3 und 30 Gewichtsprozent H_2O_2 enthalten, für viele Oxidationsreaktionen eingesetzt.

Das Wasser

Die für den Menschen wichtigste Sauerstoffverbindung ist das Oxid des Wasserstoffs, das Wasser.

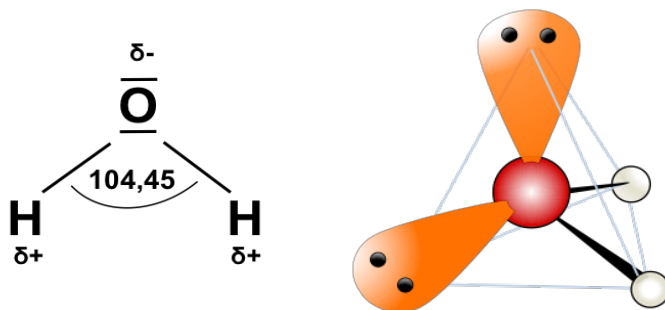


Abb. 8.2: Das Wassermolekül besitzt eine gewinkelte Struktur, wobei der Sauerstoff sp^3 -hybridisiert ist. Die Anordnung der Orbitale im Raum ist verzerrt tetraedisch.

Das gewinkelte Molekül besteht aus einem Sauerstoffatom und zwei Wasserstoffatomen. Das Sauerstoffatom hat eine partiell negative Ladung (δ^-) und die beiden Wasserstoffatome eine partiell positive Ladung (δ^+). Es handelt sich also um polare kovalente Einfachbindungen.

Im Wassermolekül trägt der Sauerstoff die Oxidationszahl -2 und der Wasserstoff die Oxidationszahl +1. Der Sauerstoff ist sp^3 -hybridisiert. Zeichnet man die Struktur von Wasser unter Berücksichtigung der bindenden Orbitale zum Wasserstoff als auch der nichtbindenden, doppelt besetzten Orbitale des Sauerstoffs, so ergibt sich eine verzerrt tetraedrische Anordnung der Orbitale (siehe Abb. 8.2). Dies entspricht dem allgemeinen Prinzip, dass sich die Elektronenpaare aufgrund ihrer gegenseitigen Abstoßung mit maximal möglichem Abstand im Raum anordnen. Für die vier Elektronenpaare des Wassermoleküls ergibt sich damit ein Tetraeder.

Der erhöhte Platzbedarf der nichtbindenden Orbitale gegenüber den bindenden resultiert in einer Abweichung vom idealen Tetraederwinkel ($109,5^\circ$): Der Winkel H-O-H beträgt lediglich $104,45^\circ$.

Das Molekül ist stark polar, daher sind die Wassermoleküle zusätzlich über Wasserstoffbrückenbindungen verbunden. Das positiv polarisierte Wasserstoffatom lagert sich über elektrostatische Wechselwirkungen an das nichtbindende Orbital eines benachbarten Wassermoleküls an. Diese Wasserstoffbrückenbindung ist linear. Der Abstand der Brücke zum benachbarten Wassermolekül ist aber länger als die Bindung innerhalb des Moleküls. Durch die Bindung wird zusätzliche Bindungsenergie frei, die das flüssige Wasser stabilisiert.

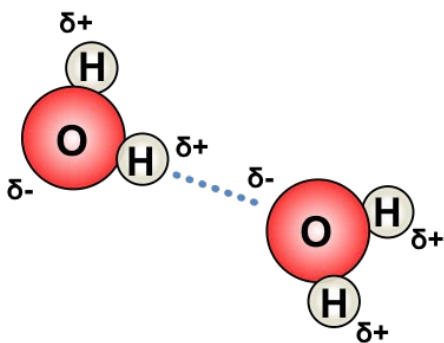


Abb. 8.3: Bindungsmodell einer Wasserstoffbrückenbindung zwischen dem partiell positiv geladenen Wasserstoff und dem partiell negativ geladenen Sauerstoff zweier Wassermoleküle

Dies ist die Ursache für einige spezielle Eigenschaften von Wasser: Im Vergleich zu den anderen Wasserstoffverbindungen innerhalb dieser Gruppe (z. B. H_2S , ein Gas) besitzt Wasser einen stark erhöhten Schmelz- und Siedepunkt. Bei Atmosphärendruck beträgt der Schmelzpunkt $0\text{ }^\circ\text{C}$ und der Siedepunkt $100\text{ }^\circ\text{C}$. Auch in festem Wasser (Eis) sind Wasserstoffbrücken präsent und sorgen für eine Struktur, die große Hohlräume aufweist. Damit hat Eis am Schmelzpunkt eine geringere Dichte als flüssiges Wasser und schwimmt auf. Für ökologische Systeme ist dies von großer Bedeutung, da Gewässer meist nur oberflächlich zufrieren und unter dem Eis flüssiges Wasser erhalten bleibt, in das sich wasserbewohnende Lebewesen zurückziehen können. Man spricht in diesem Zusammenhang von der Anomalie des Wassers, da im Normalfall die feste Phase eine höhere Dichte aufweist als die Flüssigkeit.

Wasser ist ein Rohstoff, der auf der Erde in praktisch unbegrenzter Menge zur Verfügung steht. Im Wasserkreislauf wird Wasser durch Sonneneinstrahlung verdampft, kondensiert in Wolken und fällt als Regen oder Schnee auf die Erde zurück. Flüssiges Wasser läuft unter Einfluss der Schwerkraft nach unten und endet schließlich wieder in den Ozeanen. Diese Dynamik des Wassers ist für viele Prozesse in unserer Umwelt verantwortlich. Wasser bedeckt in etwa 70% der Erdoberfläche, 97% davon in Form von Salzwasser, vom Süßwasser sind nur 25% nicht als Eis gebunden. Nur ca. 0,3% des Süßwasservorkommens sind auch als Trinkwasser nutzbar.

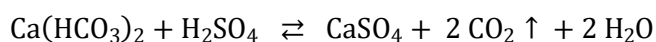
Natürlich vorkommendes Süßwasser z. B. Grundwasser und Flusswasser enthält gelöste Mineralsalze. Darunter beispielsweise Calciumhydrogencarbonat, welches beim Erhitzen in Calciumcarbonat umgewandelt wird:



Je nach Gehalt an gelösten Mineralstoffen wird Wasser als hart oder weich bezeichnet. Der Gehalt an Erdalkali-Ionen wird in $\text{mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ gemessen.

Eine gebräuchlichere Einteilung im deutschen Sprachraum erfolgt über die sogenannten Härtegrade (deutsche Härtegrad $^\circ\text{dH}$). Dabei entspricht 1°dH formal 10 mg CaO pro Liter H_2O .

Ist eine Wasserenthärtung notwendig, um die Ausscheidung von festem CaCO_3 zu verhindern (welche zur Verkalkung von Wasserleitungen führt), so kann durch Ionenaustausch das Ca^{2+} durch 2 H^+ -Ionen ersetzt werden. Alternativ kann man z. B. durch Zugabe von geringen Mengen Schwefelsäure das Kohlendioxid austreiben:



Das gebildete Calciumsulfat ist im Vergleich zu Calciumcarbonat (Löslichkeit: $14\text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$) relativ leicht löslich ($2\text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$).

In der Chemie ist das Wasser als Lösungsmittel und Reaktand unentbehrlich. Die organische Chemie ist eine Chemie der wässrigen Lösungen, in denen sich organische Kohlenstoffverbindungen befinden. Die polaren Wassermoleküle eignen sich besonders gut dafür, Salze aufzulösen.

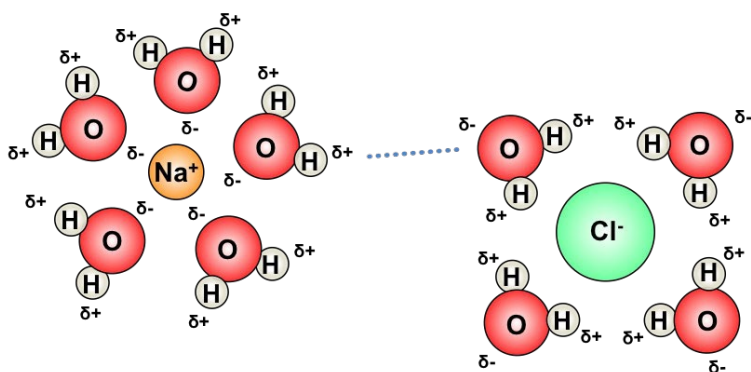


Abb. 8.4: Bei der Solvation (bei Wasser als Lösungsmittel als Hydratation bezeichnet) lagern sich die polarisierten Wassermoleküle an die gelösten Ionen an und bilden eine Hydrathülle.

Dabei werden die Ionen, die das Salz aufbauen, aus dem Kristallverband gelöst und hydratisiert. Das heißt, die Ionen werden von einer Hülle aus Wassermolekülen umgeben, wobei der negativ polarisierte Sauerstoff des Wassermoleküls an die Kationen anlagert, während die positiv polarisierte Wasserstoff-Seite des Moleküls an die Anionen anlagern kann (Abb. 8.4).

Die bei der Bildung der Hydrathülle gewonnene Energie ist die eigentliche Triebkraft der Auflösungsreaktion. Wasser kann aber auch viele polare organische Substanzen lösen und ist mit einigen polaren, organischen Flüssigkeiten wie z. B. Ethanol vollständig mischbar.

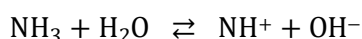
Auch die meisten Gase wie O_2 , N_2 , CO_2 usw. können in Wasser gelöst werden.

Eine besondere Eigenschaft von Wasser ist, wie bereits erwähnt, die Eigendissoziation oder Autoprotolyse. Das bedeutet, dass die Wassermoleküle untereinander sowohl als Protonenakzeptoren als auch als Protonendonatoren fungieren können:



Wasser ist zudem auch ein Ampholyt (es verhält sich amphoter). Das heißt, Wasser fungiert mit Säuren als Protonenakzeptor und mit Basen als Protonendonator.

Wird z. B. das Gas NH_3 in Wasser gelöst, so entsteht durch die Protonierung von NH_3 eine basische Ammoniak-Lösung $NH_3(aq)$:



8.5.3 Der Schwefel

Genau wie der Sauerstoff kann der Schwefel durch die Aufnahme von 2 Elektronen die Edelgaskonfiguration erreichen. Generell unterscheidet sich der Schwefel in seinen Eigenschaften aber ganz wesentlich vom Sauerstoff. Da der Schwefel weniger elektronegativer ist, kann er leicht oxidiert werden und daher in Verbindungen alle Oxidationsstufen zwischen +6 und -2 einnehmen. Damit ist die Chemie des Schwefels wesentlich vielseitiger als die des Sauerstoffs. Ein weiterer wichtiger Unterschied ist, dass der elementare Schwefel keine $S=S$ Doppelbindungen eingeht. Stattdessen hat der Schwefel eine ausgeprägte Neigung, atomare Ketten auszubilden, bei denen jeder Schwefel kovalent an zwei benachbarte Schwefelatome gebunden ist. Diese Ketten sind wegen des Platzbedarfs der beiden nichtbindenden, doppelt besetzten Orbitale am Schwefelatom nicht linear, sondern gewinkelt. Im elementaren Schwefel ist ein ringförmiges gezacktes S_8 -Molekül der grundsätzliche Baustein (siehe Abb. 8.5).

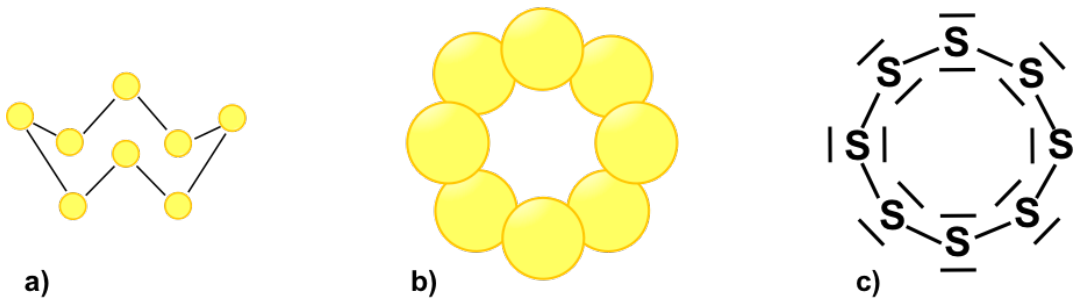


Abb. 8.5: Struktur eines Schwefel-Moleküls. Die thermodynamisch stabilste Form ist der S₈-Ring.

a) „Schwefelkrone“

b) S₈-Ring von oben

c) Strukturformel (Lewis-Formel)

Schwefel kommt in der unbelebten Natur sowohl gediegen (als reines Element) als auch gebunden vor. Die elementaren Schwefelvorkommen sind von vulkanischen Aktivitäten abhängig, da Schwefel aus den dort austretenden schwefelhaltigen Gasen gebildet wird. Gebunden findet sich Schwefel in vielen Mineralien als Sulfate (Salze der Schwefelsäure, z. B. CaSO_4 = Anhydrit; $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ = Gips; BaSO_4 = Baryt) oder als Sulfide (z. B. FeS_2 = Pyrit, Katzengold; PbS = Galenit, ZnS = Zinkblende). Zusätzlich sind viele wichtige Erze von Kupfer, Nickel, Silber, Blei, Zink usw. Sulfide.

Auch in der belebten Natur ist Schwefel ein wichtiger Baustein.
Als Bestandteil von Eiweiß, wie z. B. in den Aminosäuren Methionin und Cystein, ist Schwefel essentiell für den Aufbau von Proteinen in allen Organismen.

8.6 DIE 5. HAUPTGRUPPE: STICKSTOFF UND PHOSPHOR

Zur 5. Hauptgruppe (Gruppe 15) gehören die Elemente Stickstoff (N), Phosphor (P), Arsen (As), Antimon (Sb) und Bismut (Bi). Als Gruppenname ist „Pentete“ oder auch „Pnictogene“ in Verwendung. Meist wird aber einfach von der 5. Hauptgruppe gesprochen. Die allgemeine Valenzelektronenkonfiguration erlaubt Oxidationsstufen von -3 bis +5, wobei -3, +3 und +5 die bedeutendsten Oxidationsstufen sind.

Die Unterschiede der chemischen und physikalischen Eigenschaften innerhalb dieser Gruppe sind, wie bei den Chalkogenen, sehr groß. Stickstoff und Phosphor gehören zu den Nichtmetallen, Arsen und Antimon werden den Halbmetallen zugeordnet und Bismut ist ein Metall. In dieser Einführung beschränken wir uns auf die Diskussion der beiden Nichtmetalle Stickstoff und Phosphor.

8.6.1 Der Stickstoff

Der Stickstoff kommt wie der Sauerstoff und die Halogene elementar als zweiatomiges Molekül vor. Der Stickstoff benötigt zur Erreichung der Edelgaskonfiguration drei kovalente Bindungen. Daher bildet sich zwischen den beiden Stickstoffatomen eine sehr stabile Dreifachbindung aus, die aus einer σ - und zwei π -Bindungen besteht. Durch die ungewöhnlich hohe Dissoziationsenergie der Dreifachbindung ist Stickstoff bei Raumtemperatur sehr reaktionsträge und wird deshalb wie auch die Edelgase Inertgas (lat. iners = untätig, träge) genannt.

Eine empfindliche Substanz wird unter Inertgas (z. B.: N_2 , Ar) gelagert, um sie vor den reaktiveren Bestandteilen der Luft (z. B. Sauerstoff, Wasserdampf, Kohlendioxid) zu schützen.

Anders als beim Edelgas Argon ist diese Reaktionsträgheit aber auf moderate Temperaturen beschränkt. Bei hohen Temperaturen kann die Dreifachbindung dissoziiert werden, wodurch der Stickstoff mit den meisten Elementen reagiert. Das Gas N_2 ist mit mehr als 78 Volumenprozent der Hauptbestandteil der Luft.

Ammoniak

Die Wasserstoffverbindung des Stickstoffs, NH_3 , heißt Ammoniak. NH_3 ist bei Normalbedingungen ein charakteristisch stechend riechendes, giftiges Gas. Der sp^3 -hybridisierte Stickstoff bindet kovalent 3 Wasserstoffatome, wobei ein doppelt besetztes nichtbindendes Orbital übrigbleibt. Die vier Elektronenpaare bilden einen verzerrten Tetraeder um das Stickstoffatom, wobei aufgrund des erhöhten Platzbedarfs des nichtbindenden Orbitals der Bindungswinkel H-N-H auf 107° reduziert ist. Das Ammoniakmolekül hat daher eine trigonal-pyramidenförmige Struktur (siehe Abb. 8.6 und Abb. 3.4).

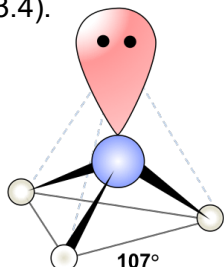
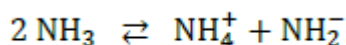


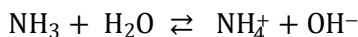
Abb. 8.6: Molekülstruktur von Ammoniak.

Die Anordnung des Stickstoffatoms und der 3 Wasserstoffatome entspricht einer dreiseitigen Pyramide, also trigonal-pyramidal.

Das Vorhandensein des freien Elektronenpaares am Stickstoff führt zu einigen Ähnlichkeiten mit dem Wassermolekül. Wie auch das Wasser bildet der Ammoniak im flüssigen Zustand Wasserstoffbrücken aus. Diese sind allerdings schwächer, sodass der Siedepunkt von Ammoniak zwar vergleichsweise hoch ist, aber mit $-33,4^\circ\text{C}$ deutlich unter dem von Wasser liegt. Flüssiger Ammoniak reagiert amphoter und zeigt ebenfalls Autoprotolyse:



Entsprechend ist in flüssigem Ammoniak eine dem Wasser analoge Säure-Base-Chemie möglich. Damit ist flüssiger Ammoniak ein dem Wasser ähnliches Lösungsmittel. Andererseits ist es aber zur Durchführung vieler Reaktionen geeignet, die in Wasser nicht realisiert werden können.



Wie bereits erwähnt, ist NH_3 -Gas in Wasser gut löslich, wobei es nach der Reaktion basisch reagiert. Das Kation NH_4^+ bildet die sogenannten Ammonium-Salze, die oft ähnliche Eigenschaften wie die Salze der Alkalimetalle haben.

8.6.2 Der Phosphor

Wie schon bei den Chalkogeniden ist auch in der 5. Hauptgruppe die Änderung der Eigenschaften zwischen den ersten beiden Elementen der Gruppe besonders groß. Dies ist schon an den Reinelementen gut zu erkennen. Elementarer Phosphor (gr. phosphorus = Lichtträger) ist ein Feststoff und bildet mehrere Formen aus. Unter Normalbedingungen ist schwarzer Phosphor die stabilste Modifikation. In diesem sind die Phosphoratome mit je drei kovalenten Einfachbindungen zu gewellten, „unendlich“ ausgedehnten Doppelschichten verknüpft. Im Unterschied zu allen bisher besprochenen Festkörpern besteht der schwarze Phosphor aus einem ausgedehnten Netzwerk von kovalent gebundenen Atomen, das sich über den gesamten Kristall erstreckt (siehe Abb. 8.7). Schwarzer Phosphor ist reaktionsträge, hat einen metallisch anmutenden Glanz und ist ein elektrischer Halbleiter (siehe 8.7).

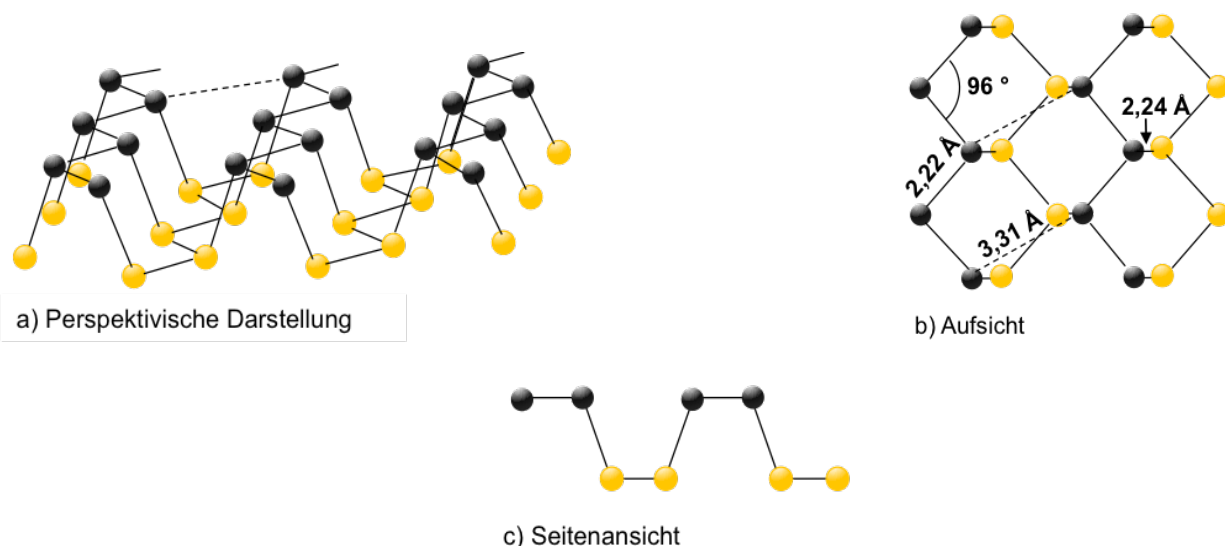


Abb. 8.7: Kristallstruktur von schwarzem Phosphor

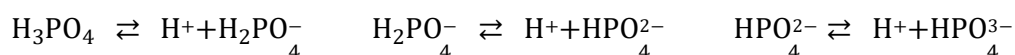
Ganz anders ist die Struktur von weißem Phosphor, der durch Kondensation aus gasförmigem Phosphor an kühlen Oberflächen entsteht. In diesem Fall bildet der Phosphor konkrete P_4 -Moleküle, bei denen jeder Phosphor mit drei kovalenten Einfachbindungen an drei benachbarte P-Atome gebunden ist, wodurch sich ein tetraederförmiges Molekül ergibt. Der Bindungswinkel P-P-P ist mit 60° sehr klein.

Deshalb ist der weiße Phosphor wenig stabil und sehr reaktiv. Er wandelt sich bei Wärmebehandlung in stabilere Modifikationen um. Da weißer Phosphor aus neutralen Molekülen besteht, kann der Festkörper in unpolaren Lösungsmitteln wie CS_2 aufgelöst werden. Er ist sehr giftig und an der Luft selbstentzündlich, weshalb er nur unter großen Vorsichtsmaßnahmen verwendet werden darf. Eine weitere Modifikation ist der rote Phosphor. Er ist amorph und entsteht beim Erhitzen von weißem Phosphor unter Luftabschluss, wobei ein unregelmäßiges dreidimensionales Netzwerk von Phosphoratomen entsteht. Er ist an Luft stabil und entzündet sich erst bei einer Temperatur oberhalb von $300^\circ C$.

Phosphor kommt in der Natur v. a. anionisch gebunden in Form von Phosphaten vor, den Salzen der Phosphorsäure. Das Phosphat-Anion kommt in mehreren Mineralien vor, z. B. in Apatit $Ca_5(F, OH, Cl) (PO_4)_3$, dem wichtigsten Phosphaterz. Phosphor ist für alle Organismen essentiell und findet sich im Körper z. B. in Knochen und Zähnen. Phosphate sind die Grundsubstanz für Nukleinsäuren und Basis für den Energiestoffwechsel in Form des Moleküls ATP (Adenosintriphosphat). In der chemischen Industrie wird Phosphor vor allem für die Erzeugung von Düngemitteln, aber auch für die Herstellung von Tensiden, Pestiziden und im Bereich der Pyrotechnik verwendet.

Phosphorverbindungen

Phosphor bildet viele verschiedene Sauerstoffsäuren, in denen der Phosphor alle Oxidationsstufen zwischen +1 und +5 annehmen kann. In der Phosphorsäure (veraltet: phosphorige Säure) H_3PO_3 hat Phosphor die Oxidationsstufe +3. Die Orthophosphorsäure H_3PO_4 ist eine dreibasige Säure, in der Phosphor die Oxidationszahl +5 hat und die in drei Stufen dissoziiert:



Die entsprechenden Säureanionen heißen Dihydrogenphosphat ($H_2PO_4^-$), Hydrogenphosphat (HPO_4^{2-}) und Orthophosphat (PO_4^{3-}). Die dritte Dissoziationsstufe ist aber nur in stark basischen Lösungen realisierbar. Die Orthophosphorsäure ist insgesamt nur eine mittelstarke Säure. Reine H_3PO_4 ist bei Raumtemperatur ein farbloser Festkörper, der in Wasser gut löslich ist. Phosphate spielen im Organismus eine wichtige Rolle, nicht nur beim energiereichen ATP, sondern beispielsweise auch bei der Zusammensetzung von Knochen und Nucleinsäuren.

8.7 DIE 4. HAUPTGRUPPE: KOHLENSTOFF UND SILICIUM

Die 4. Hauptgruppe (Gruppe 14) bilden die sogenannten Tetrele, auch Tattogene („Gerüstbildner“) genannt. Dazu gehören Kohlenstoff (C), Silicium (Si), Germanium (Ge), Zinn (Sn) und Blei (Pb). Die Elemente dieser Gruppe können grundsätzlich vier Bindungen eingehen. Der Kohlenstoff ist ein Nichtmetall, Silicium und Germanium sind Halbleiter (siehe Abb. 8.7), Zinn und Blei zählen zu den Metallen. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften ändern sich innerhalb der Gruppe graduell. So zeigt sich einerseits die Zunahme von Dichte, Atomradius und metallischem Charakter. Andererseits nehmen die Ionisierungsenergie und Elektronegativität ab. Der Eigenschaftssprung zwischen Kohlenstoff und Silicium, den beiden ersten Elementen der Gruppe, ist, wie schon bei den benachbarten Pentelen und Chalkogenen, groß.

8.7.1 Kohlenstoff

In der Natur kommt elementarer Kohlenstoff hauptsächlich in zwei sehr unterschiedlichen Modifikationen vor: dem Diamanten und dem Graphit (siehe Abb. 3.7). Die großen Unterschiede der beiden Modifikationen sind in der jeweils vorliegenden Bindung begründet. Beim Diamanten liegt am Kohlenstoff sp^3 -Hybridisierung vor. Er ist damit kovalent mit vier weiteren Kohlenstoffatomen verbunden, die wiederum jeweils vier Bindungspartner haben. Die lokale Koordination ist dabei tetraedisch. Der so entstehende Festkörper enthält ein dichtes dreidimensionales Netzwerk kovalenter C-C Bindungen, das sich über den gesamten Kristall erstreckt (siehe Abb. 8.8.).

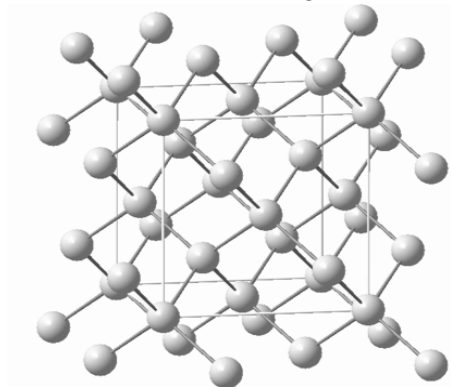
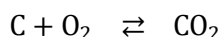


Abb. 8.8: Die Kristallstruktur von Diamant

Aufgrund der hohen Bindungsenergie der C-C Einfachbindung ($348 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$) ist der Diamant ausgesprochen hart. Mit einer Mohs-Härte von 10 ist er der härteste natürliche Festkörper. Reine Diamanten sind vollkommen farblos und besitzen eine extrem hohe Wärmeleitfähigkeit, sind aber elektrische Isolatoren.

Diamanten wandeln sich unter Luftausschluss bei etwa 1500°C rasch in Graphit um. In sehr seltenen Fällen können Diamanten aufgrund vulkanischer Aktivitäten so rasch aus der Tiefe aufsteigen, dass sie bis zur Erdoberfläche gelangen können, ohne sich in die stabilere Modifikation Graphit umzuwandeln. Dies sind die seltenen, natürlich vorkommenden Diamanten, die als Schmucksteine hoch begehrt sind und aufgrund von Verunreinigungen viele verschiedene Farbtöne annehmen können. An der Luft verbrennen Diamanten bereits bei ca. 800°C zu Kohlendioxid:



Graphit ist unter Normalbedingungen die stabile Modifikation des Kohlenstoffs. Im Graphit sind die Kohlenstoffatome sp^2 -hybridisiert. Damit können drei Einfachbindungen zu benachbarten Kohlenstoffatomen gebildet werden, wobei der C – C – C Bindungswinkel 120° beträgt.

Es entstehen planare hexagonale (sechseckige) Netze aus Kohlenstoffatomen. Das jeweils vierte Elektron befindet sich im p_z -Orbital des Kohlenstoffs, also senkrecht zur Netzebene.

Diese Elektronen bilden π -Bindungen aus, deren delokalisierte Charakter dem der aromatischen Kohlenwasserstoffe entspricht. Die delokalisierte π -Bindung erstreckt sich über das gesamte planare Netz und verstärkt die Bindung innerhalb der Schicht.

Im Graphitkristall sind diese Netze versetzt übereinandergestapelt, sodass (von oben betrachtet) die dritte Schicht mit der ersten identisch ist. Diese Schichtfolge wird gerne als A-B-A-B-... Schichtfolge beschrieben, wobei mit „A“ und „B“ die jeweiligen Orientierungen der Schichten gemeint sind (siehe Abb. 8.9).

Die Bindung zwischen den Schichten ist nur schwach. Damit ist der Graphit ein extrem anisotroper Festkörper, das heißt, der Kristall hat in verschiedenen Richtungen sehr unterschiedliche Eigenschaften. Die elektrische und thermische Leitfähigkeit ist parallel zu den Schichten viel höher als senkrecht dazu. Darüber hinaus lassen sich die nur lose gebundenen Schichten gut gegeneinander verschieben, sodass der Graphit in diesen Richtungen sehr weich und gut verformbar ist.

Der Graphit ist im Gegensatz zum Diamanten schwarz, sehr weich und ein guter elektrischer Leiter. Er hat den höchsten Schmelzpunkt aller Elemente und kommt natürlich wesentlich häufiger vor als der Diamant.

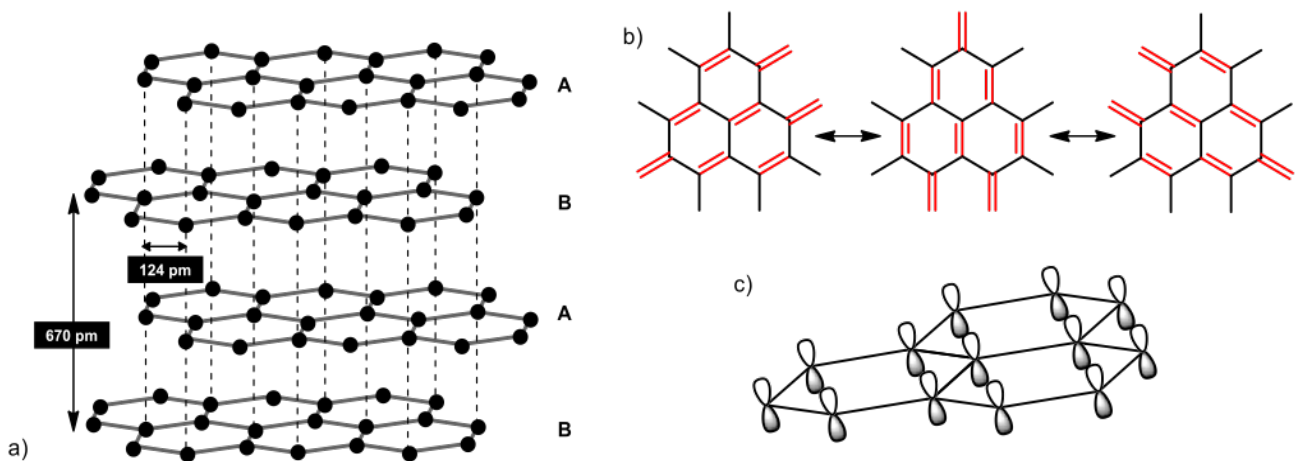


Abb. 8.9:

- a) Ausschnitt aus der Kristallstruktur von Graphit mit Stapelfolge A-B-A-B
- b) Mesomere Grenzstrukturen der delokalisierten π -Bindung (Ausschnitt)
- c) an der π -Bindung beteiligte p-Orbitale senkrecht zur Schichtebene

Es gibt noch andere Formen des elementaren Kohlenstoffs (siehe Abb. 3.7). Technologische Bedeutung haben auch verschiedene, schlecht kristallisierte Kohlenstoffformen wie z. B. Ruß, Glaskohlenstoff, Aktivkohle usw.

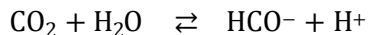
Der Kohlenstoff ist mit ca. 0,09 Massenprozent an der 14. Stelle der häufigsten Elemente auf der Erdoberfläche. Neben den eher seltenen elementaren Modifikationen Diamant und Graphit kommt er in großen Mengen gebunden in Carbonaten vor, darunter z. B. CaCO_3 (Kalkstein, Marmor), MgCO_3 (Magnesit) und $\text{CaCO}_3 \times \text{MgCO}_3$ (Dolomit). In der Luft ist Kohlenstoff in Form von CO_2 enthalten.

Ein erheblicher Teil des Kohlenstoffs ist in der Biosphäre gebunden, da der Kohlenstoff das Grundgerüst aller organischen Moleküle bildet und damit der Grundbaustein des Lebens ist. Große Mengen des Kohlenstoffs bilden fossile biogene (aus Lebewesen entstandene) Brennstoffe. Dazu gehört das Erdöl, das Erdgas (beide bestehen im Wesentlichen aus Kohlenwasserstoffgemischen) und die Kohle.

Die unterschiedlichen Kohlearten (Steinkohle, Braunkohle usw.) bestehen aus elementarem Kohlenstoff in unterschiedlichem Anteil. Diese Kohlenstoffsubstanzen sind die Rohstoffe für die organisch-chemische Industrie und wichtige Energieträger. Die Verbrennung dieser fossilen Brennstoffe versorgt die Menschheit mit enormen Mengen nutzbarer Energie. Das dabei entstehende zusätzliche CO_2 in der Atmosphäre ist aber für die derzeit zu beobachtende Klimaerwärmung verantwortlich und ist deshalb problematisch.

8.7.2 Einige Kohlenstoffverbindungen

Das eben erwähnte CO_2 ist neben CO eines von zwei Kohlenstoffoxiden. Beide Kohlenstoffoxide sind bei Normalbedingungen Gase. Im Kohlenstoffdioxid sind die beiden Sauerstoffatome durch Doppelbindungen an das zentrale Kohlenstoffatom gebunden. Das entstehende Molekül ist linear und reagiert mit Wasser schwach sauer. Formal ist CO_2 das Anhydrid der „Kohlensäure“ (H_2CO_3), die aber nicht stabil ist. Die saure Reaktion in Wasser ist auf die Bildung von Hydrogencarbonat zurückzuführen:

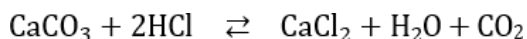


Da in der Atmosphäre CO_2 vorhanden ist, reagiert mit Luft in Berührung stehendes Wasser wie z. B. Regenwasser oder an Luft destilliertes Wasser deshalb immer leicht sauer (pH 5-6). Nur CO_2 -freies, reines Wasser hat einen pH-Wert von 7.

Das Hydrogencarbonat-Ion kann in basischen Lösungen ein weiteres Proton abspalten und so in das Carbonat-Ion übergehen:



Die beiden Anionen bilden zwei Reihen von Salzen, die Carbonate und die Hydrogencarbonate. Da die Kohlensäure nur eine schwache Säure ist, setzen diese Salze bei Kontakt mit starken Säuren wiederum CO_2 frei. Tropft man z. B. auf kalkhaltiges Gestein verdünnte Salzsäure, so wird CO_2 -Gas freigesetzt:



Im Kohlenstoffmonooxid (CO) hat der Kohlenstoff die Oxidationszahl +2 und ist mit einer Dreifachbindung an den Sauerstoff gebunden. Beim Einatmen ist CO hochgiftig, da das CO -Molekül stärker an das Hämoglobin bindet als der Sauerstoff und damit der lebensnotwendige Sauerstofftransport im Blut unterbunden wird. Kohlenmonoxid (kurz für Kohlenstoffmonooxid) entsteht bei der Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Brennstoffen unter Sauerstoffmangel und sorgt immer wieder für tödliche Unfälle beim Umgang mit schlecht gewarteten Verbrennungsheizungen.

8.7.3 Das Silicium

Elementares Silicium ist ein grauer Festkörper mit metallischem Glanz. Er kristallisiert in derselben Struktur wie Diamant, seine Eigenschaften sind aber deutlich unterschiedlich. Silicium ist weniger hart und relativ spröde, d.h. es zerbricht leicht bei mechanischer Beanspruchung. Dies liegt an der deutlich geringeren Bindungsenergie der Si-Si Einfachbindung.

Si ist kein reines Nichtmetall mehr, sondern zählt zu den Halbmetallen. Kristallines Silicium kann durch den Einbau von Atomen anderer Elemente (Dotieren) in seinen Leitereigenschaften verändert und für die Halbleitertechnologie werden.

Silicium ist mit ca. 26 Massenprozent das zweithäufigste Element auf der Erdoberfläche und in Verbindung mit Sauerstoff als Quarz bzw. Silikatgestein der Grundbaustoff der Erdkruste.

8.8 DIE METALLE

Im bisherigen Text von Kapitel 8 wurden nacheinander die Nichtmetall-Elemente der 8., 7., 6., 5. und 4. Hauptgruppe vorgestellt. Den Großteil der Elemente des Periodensystems machen jedoch Metalle aus. Metallisch sind sämtliche Alkalimetalle (1. Hauptgruppe) und Erdalkalimetalle (2. Hauptgruppe), alle Elemente der 3. Hauptgruppe mit Ausnahme des Bor (B), sämtliche Nebengruppenelemente (Gruppe 3 – 12 des Periodensystems) sowie die f-Elemente (Lanthanoide und Actinoide). Damit sind etwa 80% der Elemente Metalle. Den Metallen gemeinsam ist ein Bündel von speziellen Eigenschaften. Dazu zählen:

- der metallische Glanz
- die Oberfläche des Metalls reflektiert das Licht spiegelnd
- Metalle lassen praktisch kein Licht passieren, d.h. sie sind völlig undurchsichtig (opak)
- die Verformbarkeit (Duktilität)
- Metalle können (in bestimmtem Maße) plastisch verformt werden, ohne zu zerbrechen
- die gute Leitfähigkeit für Strom und Wärme
- Metalle sind grundsätzlich elektrische Leiter, deren Widerstand bei Erhöhung der Temperatur zunimmt. Bei den sogenannten Halbmetallen (z. B. Si, Ge, As) ist es genau umgekehrt: Ihr elektrischer Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab.

Die meisten Metalle kristallisieren in einer der folgenden drei Metallstrukturen: Cu-Typ (kubisch flächenzentriert), Mg-Typ (hexagonal dicht gepackt) und W-Typ (kubisch-dicht), benannt nach den Elementen Kupfer, Magnesium und Wolfram.

Diese Kristallstrukturen sind hochsymmetrisch und gewährleisten eine dichte Atomanordnung mit hohen Koordinationszahlen.

Die vielen Gemeinsamkeiten der Metalle erklären sich aus dem gemeinsamen Bindungstyp, der metallischen Bindung.

Ihre bindende Wechselwirkung ist daher nicht in einer bestimmten Raumrichtung entlang einer Bindungsachse festgelegt. Das klassische, bereits Ende des 19. Jahrhunderts entwickelte Bindungsmodell für Metalle geht von einem „Elektronengas“ aus, das zwischen den regelmäßig angeordneten und positiv geladenen Atomrümpfen des metallischen Festkörpers frei beweglich ist (siehe Abb. 3.10). Dieses Modell kann die meisten Metalleigenschaften gut erklären, ist aber schon lange von dem quantenmechanisch begründeten Energiebändermodell abgelöst. Das Bändermodell kann zum Beispiel erklären, ob kristalline Strukturen Leiter, Halbleiter oder Nichtleiter (Isolator) darstellen.

Anders als in kovalenten Verbindungen sind die bindenden Elektronen nicht in konkreten bindenden Orbitalen zwischen den Atomen lokalisiert, sondern sie sind in Festkörpern delokalisiert.

Metalle sind Leiter, weisen also eine hohe elektrische Leitfähigkeit auf, während Halbmetalle (z. B. Silicium und Selen) Halbleiter sind.

Aus dem Vorhandensein einer delokalisierten, in alle Raumrichtungen gleichermaßen wirksamen Metallbindung lässt sich die Verformbarkeit der Metalle ableiten. Die elektrische Leitfähigkeit wird verständlich, wenn man die Bindungselektronen als beweglich versteht. Und die speziellen metallischen Strukturen werden verständlich, wenn man berücksichtigt, dass es eben keine speziellen Bindungsrichtungen gibt, wo bindende Elektronenpaare lokalisiert sind. Es kann also die Koordinationszahl erhöht und damit die Packungsdichte der Atome optimiert werden.

Für die Menschheit sind metallische Werkstoffe unentbehrlich. Die Entdeckung und Nutzbarmachung der Metalle hat die Technologie entscheidend geprägt, sodass ganze Zeitalter der Menschheitsgeschichte nach Metallen benannt sind (Bronzezeit, Eisenzeit).

Metalle kommen in der Natur fast nur gebunden vor. Sie bilden die Kationen in Oxiden, Sulfiden, Silikaten, Carbonaten usw., die uns als Mineralien in Gesteinen umgeben. Es sind daher chemische Prozesse notwendig, um die reinen Metalle aus speziellen Gesteinen (den Erzen) zu erzeugen.

Es gibt einige wenige Ausnahmen: Die sogenannten Münzmetalle Gold (Au), Silber (Ag) und Kupfer (Cu) kommen auch gediegen vor und sind daher die ersten Metalle, die die Menschheit kennengelernt hat. Die meisten anderen Metalle werden aus Oxiden und Sulfiden durch Reduktion gewonnen. Für fast alle Metalle im Periodensystem gibt es heute spezielle Anwendungen. Sie werden entweder als Reinmetalle, in Form von metallischen Legierungen oder in Verbindungen genutzt. Der Grad der Nutzung hängt dabei auch von der Verfügbarkeit ab.

Einige Metalle wie das Rhenium (Re) sind extrem selten und kommen nur für Spezialanwendungen zum Einsatz. Andere Metalle wie das Eisen (Fe) und das Aluminium (Al) sind in riesigen Mengen verfügbar und eignen sich deshalb für Massenanwendungen.

9 Biomoleküle

9.1 KOHLENHYDRATE

Kohlenhydrate (Saccharide) sind energiereiche, organische Polyhydroxycarbonylverbindungen, die aus den chemischen Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O) aufgebaut sind. Saccharide werden nach ihrem Aufbau in Einfachzucker (Monosaccharide), Di-, Oligo- und Polysaccharide unterschieden. Die kleinste Einheit ist ein Monosaccharid. Dazu gehören z. B. die Monosaccharide Glukose (Traubenzucker), Fruktose (Fruchtzucker) und Ribose. Wegen ihres stöchiometrischen Aufbaus, der der Summenformel $C_n(H_2O)_n$ entspricht, also je Mol Kohlenstoff ein

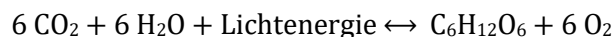
Kohlenhydrate sind Verbindungen mit mehreren Hydroxylgruppen und einer Carbonylgruppe.

Mol Wasser, werden sie als Kohlenhydrate bezeichnet. Strenggenommen gehorchen nur die Monosaccharide dieser Summenformel. Da aber Oligo- und Polysaccharide aus Monosacchariden aufgebaut sind, werden sie ebenfalls als Kohlenhydrate bezeichnet. Ein Disaccharid ist beispielsweise die Verbindung Saccharose (Rohrzucker). Beispiele für Polysaccharide sind Cellulose und Stärke. Sie alle unterscheiden sich in ihren Molekülgrößen und den daraus resultierenden Eigenschaften.

9.1.1 Bildung von Kohlenhydraten

Beim Vorgang der Photosynthese produziert die Pflanze aus energiearmem Kohlendioxid mithilfe des Sonnenlichtes Monosaccharide. Sie dienen als Bausteine für alle weiteren Kohlenhydrate.

Photosynthese:



Durch Aufnahme von Kohlendioxid (CO_2) aus der Luft und Wasser (H_2O) aus der Erde kann die Pflanze in ihren Blattgrünkörperchen (Chloroplasten) mithilfe von Chlorophyll und Sonnenlicht Glukose bilden. Dieser Vorgang wird als Photosynthese bezeichnet. Bei der Reaktion wird Sauerstoff (O_2) abgegeben, welcher von Tieren zum Überleben benötigt wird. Nimmt der Mensch Kohlenhydrate auf, werden diese unter Sauerstoffaufnahme wieder zu Kohlenstoffdioxid und Wasser gespalten. Man nennt diesen Vorgang Zellatmung. Dabei wird die enthaltene Energie wieder frei und kann von der Zelle zur Erfüllung ihrer Funktionen genutzt werden.

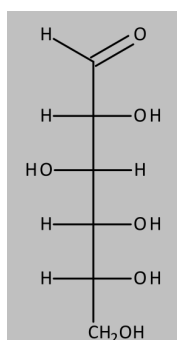


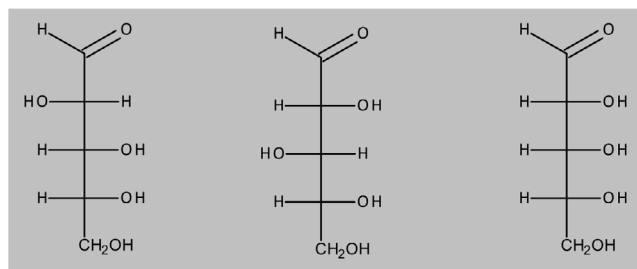
Abb. 9.1: D-Glukose, der wohl bekannteste Zucker, dargestellt in der Fischer-Projektion

9.1.2 Einteilung und Nomenklatur der Kohlenhydrate

Je nach Anzahl der Zuckerbausteine und der damit steigenden Molekülgröße unterteilt man wie oben erwähnt die Kohlenhydrate in drei Gruppen: Mono-, Oligo- und Polysaccharide.

Die häufigsten Monosaccharide sind aus sechs Kohlenstoffatomen aufgebaut (Abb. 9.1) und werden deshalb als Hexosen bezeichnet. Es gibt aber auch Pentosen, wie z. B. Arabinose, Xylose oder Ribose, die nur 5 C-Atome besitzen (Abb. 9.2). Kohlenhydrate werden meist mit einem Trivialnamen und der Endung „-ose“ bezeichnet.

9.1.2.1 Monosaccharide



D-Arabinose

D-Xylose

D-Ribose

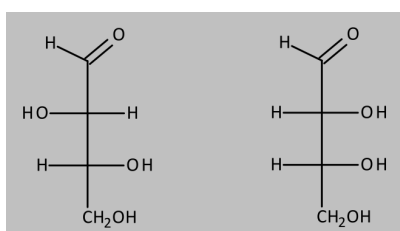
Abb. 9.2: Beispiele für Monosaccharide mit 5 C-Atomen (Pentosen).

Monosaccharide, auch Einfachzucker genannt, bestehen aus nur einem einzigen Zuckerbaustein. Die allgemeine Summenformel lautet $C_n(H_2O)_n$ und entspricht daher vollkommen dem Begriff „Kohlenhydrat“.

Sie besitzen ein Kohlenstoffgerüst aus 4 bis 7 Kohlenstoffatomen. Daran sind mehrere Hydroxygruppen und eine Aldehyd- oder eine Ketofunktion geknüpft.

Je nach Anzahl der C-Atome spricht man von

Tetrosen (4 C-Atome, Abb. 9.3), Pentosen (5 C-Atome), Hexosen (6 C-Atome, Abb. 9.1 und 9.4) und Heptosen (7-C-Atome). Sie unterscheiden sich alle in Schmelzpunkt und Löslichkeit in Wasser.



D-Threose

D-Erythrose

Abb. 9.3: Beispiele für Tetrosen

Monosaccharide tragen entweder am C_1 -Atom eine Aldehydgruppe oder am C_2 -Atom eine Ketogruppe. Demgemäß bezeichnet man sie als Aldosen (z. B. Glukose) oder Ketosen (z. B. Fruktose).

Exkurs: Stereoisomere - Enantiomere - Diastereomere

Da die Zucker bei gleicher Summenformel

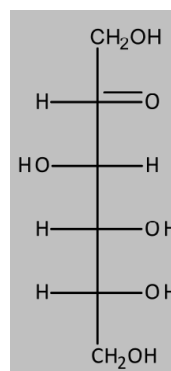


Abb. 9.4:

D-Fruktose

$C_n(H_2O)_n$ in unterschiedlichen Strukturen (z. B. Aufweisen unterschiedlicher funktioneller Gruppen) auftreten können, spricht man von Isomeren. Zwei Moleküle mit der gleichen Summenformel und gleichen funktionellen Gruppen können sich dennoch in der räumlichen Anordnung der funktionellen Gruppen

unterscheiden (Beispiel Milchsäure). Wenn das sp^3 -hybridisierte C-Atom vier unterschiedliche Reste trägt, spricht man von einem asymmetrischen C-Atom. Es existieren zwei Isomere, die sich wie Bild und Spiegelbild verhalten. Diese Isomere nennt man Stereoisomere. Ein bekanntes Beispiel dafür ist die Milchsäure, die in zwei Isomeren vorkommt. Diese stereoisomeren Moleküle können nicht zur Deckung gebracht werden (Abb. 9.5); das liegt an der Tetraederstruktur des sp^3 -hybridisierten C-Atomes. Spiegelbildisomere verhalten sich zueinander wie die linke und die rechte Hand. Man spricht in diesem Fall von Chiralität (gr. *chiros* = Hand) bzw. Händigkeit. Eine synonyme Bezeichnung ist Enantiomerie; demgemäß kann man bei den beiden Milchsäurestrukturen auch von Enantiomeren sprechen.

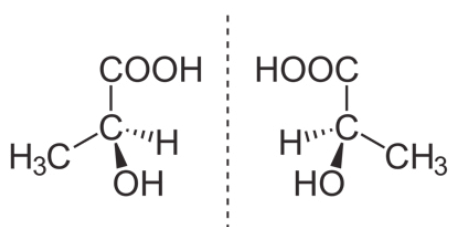


Abb. 9.5: Bild und Spiegelbild der Milchsäure

Da in den Zuckermolekülen mehrere C-Atome asymmetrisch sind (4 unterschiedliche Liganden aufweisen), enthalten sie auch mehrere Chiralitätszentren. Demgemäß können auch eine Vielzahl von Stereoisomeren gebildet werden. Nicht alle dieser Stereoisomeren verhalten sich jedoch wie Bild und Spiegelbild; man spricht in diesen Fällen von Diastereomeren.

Zusammenfassend bedeutet dies, dass sich stereoisomere Strukturen entweder enantiomer oder diastereomer zueinander verhalten.

Enantiomere sind Verbindungen, die die gleiche Summenformel aufweisen und sich wie Bild- und Spiegelbild zueinander verhalten. Ihre Strukturen sind nicht zur Deckung zu bringen.

Eine häufig gewählte Form der Darstellung von Monosacchariden ist die sogenannte Fischer-Projektion. Hier werden die räumlichen Bedingungen (Tetraederstruktur) in eine zweidimensionale Darstellung gebracht (Abb. 9.6 und 9.7). Im folgenden Beispiel des Glycerinaldehyds wird die Aldehydfunktion als höchstoxidiertes C-Atom nach oben gerichtet. Das erste C-Atom in dieser Kette erhält die Nummer 1; die weiteren C-Atome werden im Anschluss durchnummeriert. Das asymmetrische C-Atom (zweites C-Atom, zentrales C-Atom) liegt in der Schreibebeine. Die waagrechten Bindungen liegen über der Schreibebeine (Abb. 9.6), die senkrechten Bindungen weisen nach hinten (Abb. 9.6). Trägt das asymmetrische C-Atom bei dieser Darstellung die OH-Gruppe auf der rechten Seite, liegt die D-Form (*lat. dexter*) vor; zeigt sie nach der linken Seite, spricht man von der L-Form (*lat. laevus*).

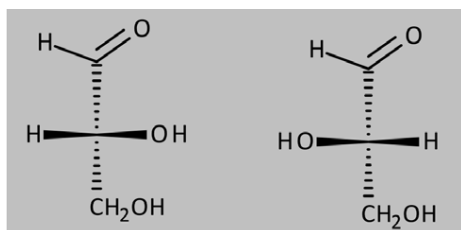


Abb. 9.6: D-Glycerinaldehyd und L-Glycerinaldehyd Darstellungen in der Fischer-Projektion

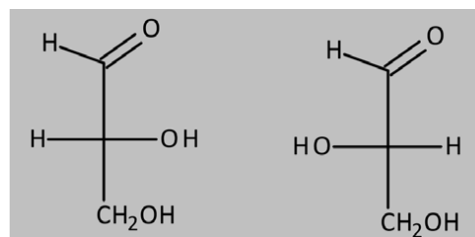


Abb. 9.7: D-Glycerinaldehyd und L-Glycerinaldehyd Stereochemische Darstellung nach Fischer

Die Zuordnung von Zuckern zur D- bzw. L-Reihe erfolgt gemäß der Fischer-Projektion. Ausschlaggebend ist die Stellung der OH-Gruppe an demjenigen asymmetrischen C-Atom, welches am weitesten vom C₁-Atom entfernt ist. Bei Fruktose und Glukose ist dies das C₅-Atom (siehe Abb. 9.1 und 9.4). Die D-/L-Nomenklatur bzw. die Fischer-Projektion von Zuckern wird nach wie vor häufig angewandt, da eine sehr rasche Zuordnung möglich ist. Es gibt zum Erlernen der Kohlenhydrate eine Eselsbrücke: Für die Stellung der OH-Gruppen an den asymmetrischen C-Atomen wird „ta“ für eine nach rechts projizierte OH-Gruppe und „tū“ für eine nach links stehende Gruppe verwendet. Der Merksatz für D-Glukose, von oben nach unten gelesen, lautet demnach: „tatütata“. Zusammengefasst wird die Verbindung in der Fischer-Projektion nach folgenden Regeln dargestellt:

- Die längste Kohlenstoffkette wird vertikal aufgestellt, wobei das am höchsten oxidierte C-Atom oben steht.
- Die horizontalen Bindungen zeigen aus der Schreibebeine zum Betrachter heraus, die vertikalen liegen hinter die Schreibebeine.
- Steht die OH-Gruppe am weitest entfernten chiralen C-Atom rechts, handelt es sich um einen Zucker der D-Reihe; steht sie hingegen links, liegt ein L-Zucker vor.
- Wird die Fischer-Projektion auf Moleküle mit mehreren chiralen C-Atomen, wie Glukose, angewendet, bestimmt jenes chirale Zentrum die Nomenklatur, welches am weitesten vom C₁-Atom entfernt steht.

D-Glukose (Traubenzucker)

In Wasser liegt die D-Glukose aber nicht in der oben angeführten offenkettigen Form vor, sondern die reaktive Carbonylfunktion reagiert mit einer Hydroxylfunktion am Terminus des Moleküls unter Bildung einer Ringform. Bei der Glukose bildet sich meistens ein 6er-Ring. Der wird in Anlehnung an den heterocyclischen Baustein Pyran auch als Pyranose bezeichnet. Bei dieser Reaktion bildet sich am Carbonyl-C-Atom eine neue OH-Gruppe. Weil diese aus einer Carbonylfunktion entstanden ist, und reaktiver als die alkoholischen Hydroxylgruppen ist, wird sie gesondert bezeichnet (siehe unten). Wichtig ist dabei, dass bei diesem Ringschluss aus dem sp²-hybridisierten Carbonyl-C-Atom nun ein sp³-hybridisiertes C-Atom wird, welches nun vier verschiedene Liganden aufweist. Das bedeutet, dass dieses C-Atom ein asymmetrisches C-Atom geworden ist und durch Ringschluss zwei Isomere gebildet werden können: eine alpha- und eine beta-Form, die sich durch die Stellung

der neu gebildeten OH-Gruppe relativ zur Ringebene unterscheiden. Die Ringform wird mithilfe der Haworth-Schreibweise am besten dargestellt (Abb. 9.8). Ähnlich wie bei der Fischer-Projektion wird die räumliche Struktur auf eine Ebene gebracht, wobei die Hydroxylfunktion zwei unterschiedliche Positionen einnehmen kann: oberhalb (beta-Form) oder unterhalb (alpha-Form) der Ringebene. Diese beiden neu entstandenen zwei Stereoisomere werden auch Anomere genannt. Die neu gebildete OH-Gruppe wird daher auch die „anomere Hydroxylgruppe“ genannt. Die offenkettige Form und die beiden Pyranoseformen stehen miteinander im Gleichgewicht, wobei in wässriger Lösung Glukose zu 99,75% in Ringformen und nur zu 0,25% in der offenkettigen Form vorliegt. Die Ringform mit der anomeren Hydroxylgruppe in beta-Stellung ist die energetisch günstigste, weil dabei alle raumgreifenden Gruppen den größtmöglichen Abstand zueinander haben. Dies spiegelt sich auch im mengenmäßigen Auftreten der beta- im Vergleich zur alpha-Form wider: Die Glukose liegt zu 63,6% in der beta-Form und nur zu 36,4% in der alpha-Form vor.

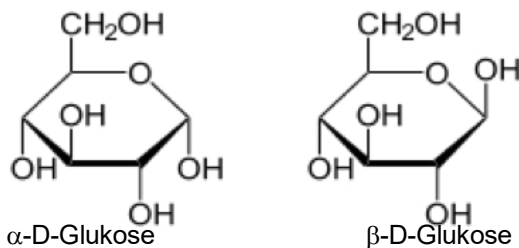


Abb. 9.8: die Anomere α-D-Pyranose, β-D-Pyranose der D-Glukose in der Haworth-Darstellung.

(Achtung: Die Wasserstoffatome sind in dieser Darstellung NICHT mehr eingezeichnet, damit man die Lage der größeren Gruppen besser erkennen kann).

Glukose ist ein süßer, gut wasserlöslicher Einfachzucker und bildet den Grundbaustein für viele Oligo- (z. B. Saccharose) und Polysaccharide (z. B. Cellulose). Man findet ihn vor allem in Obst, Gemüse, Honig und im Blut von Säugetieren. Für Säugetiere ist Glukose sowohl für die Energieversorgung als auch als Baustein besonders wichtig. Sie kommt als hauptsächliche Form im Plasma vor. Bei einem Überangebot von Glukose wird diese in Form des Polysaccharids Glykogen in Leber- und Muskelzellen gespeichert und bei Bedarf wieder aus der Leber freigesetzt. Ein nachhaltiges Überangebot an Glukose führt zur Bildung von Lipiden, die in Fettdepots gespeichert werden (Mästen).

D-Fruktose (Fruchtzucker)

Fruktose, auch Fruchtzucker genannt, ist ebenfalls ein natürlich vorkommender, sehr süßer Einfachzucker mit 6-C-Atomen. Sie ist vor allem in reifem Obst zu finden. Anders als Glukose weist die Fruktose eine Carbonylfunktion am C-2 (Ketofunktion, Abb. 9.4) auf. Es handelt sich daher um eine Ketohexose. Ähnlich wie Glukose bildet auch die Carbonylfunktion der Fruktose mit den Hydroxylfunktionen am Terminus intramolekulare Ringsysteme aus. Der sich hierbei am häufigsten, weil energetisch am günstigsten, bildende Ring ist ein 5-er Ring. Es kann sich aber ebenfalls ein 6-er Ring ausbilden. In Anlehnung an den heterozyklischen Baustein Furan wird der 5er-Ring, den man meist in Fruktosederivaten findet, als Furanose bezeichnet. Auch bei diesem Ringschluss entsteht eine neue OH-Gruppe, die wiederum zum Auftreten von zwei Stereoisomeren führt. Auch hier wird zwischen der alpha- und der beta-Form unterschieden.

D-Glukose und D-Fruktose sind Bausteine des Haushaltszuckers Saccharose, ein Disaccharid, welches als Rohr- oder Rübenzucker weit verbreitet ist.

9.1.2.2 Disaccharide

Die beim Ringschluss gebildete reaktive anomere Hydroxylgruppe kann sehr leicht mit anderen funktionellen Gruppen unter Wasserabspaltung reagieren. So eine Reaktion wird allgemein als „Kondensationsreaktion“ bezeichnet. Wenn zwei Monosaccharide miteinander reagieren, entstehen Disaccharide. Diese gehorchen streng genommen nicht mehr der allgemeinen Formel der Kohlenhydrate, $C_n(H_2O)_n$, da durch die Kondensationsreaktion ein Wassermolekül abgespalten wurde. Bei der Reaktion zweier Hexosen entsteht also ein Disaccharid mit der Summenformel $C_{12}H_{22}O_{11}$.

Die zur Bildung der Disaccharide bzw. Zweifachzucker gebildete Bindung wird „glykosidische Bindung“ genannt. Der Name leitet sich ab von den sogenannten Glykosiden und bezieht sich auf den süßlichen Geschmack von Pflanzenwirkstoffen, die früher häufig in der Medizin Anwendung fanden. Pflanzen bilden häufig toxische Moleküle, die der Abwehr von Fressfeinden dienen. Diese sekundären Pflanzenstoffe sind als Arzneistoffe von großer Relevanz. Hierbei ist häufig ein Kohlenhydratanteil an einen meist schlecht wasserlöslichen organischen Rest geknüpft. Der Kohlenhydratanteil macht das ganze Molekül besser wasserlöslich und kann vom Fressfeind leichter aufgenommen werden.

Alle Verknüpfungen, die von den anomeren Hydroxylgruppen ausgehen, werden als glykosidische Bindung bezeichnet. Bei der Bildung der Disaccharide wird das abzuspalтende Wasser aus mindestens einer anomeren OH-Gruppe beigesteuert. Durch Knüpfen der glykosidischen Bindung kann keine Öffnung des Ringes mehr erfolgen. Die Lage der C-Atome und der daran hängenden Gruppen ist somit fixiert (Abb. 9.9). Da die Molekülarchitektur von der Lage der bindungsbildenden funktionellen Gruppen ganz wesentlich beeinflusst wird, gibt man bei dem entstehenden Produkt an, welche anomere Form der Monosaccharide die Reaktion eingegangen ist. Je nach Art der glykosidischen Verknüpfung werden sie dann als α - oder β -Disaccharide bezeichnet. Daneben wird bei der Angabe der Verknüpfung auch die Ziffer der teilnehmenden C-Atome angegeben.

Bekannte Beispiele für Zweifachzucker sind neben Saccharose (Rohr-/Rübenzucker), Maltose (Malzzucker) oder Laktose (Milchzucker). Saccharose besteht aus Glukose und Fruktose (Abb. 9.9), Maltose aus zwei Glukosebausteinen (Abb. 9.10) und Laktose aus einem Glukose- und einem Galaktose-Baustein (Abb. 9.10).

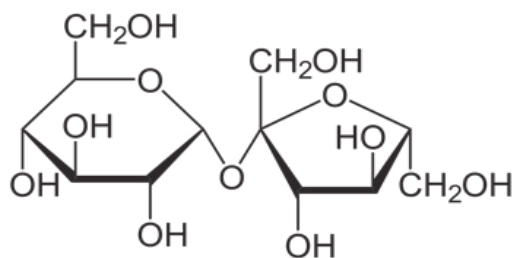
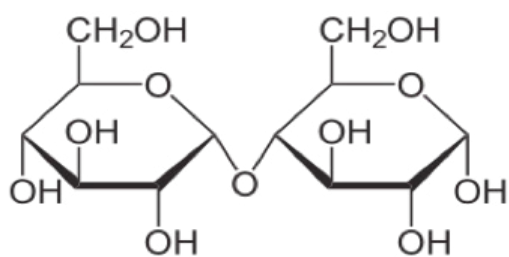
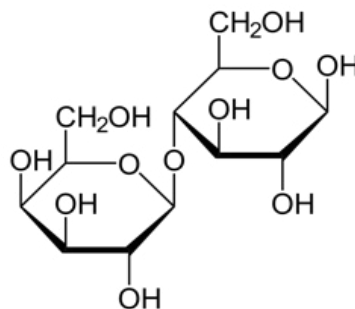


Abb. 9.9: Das Disaccharid Saccharose (links der D-Glukose- Baustein, rechts die D-Fruktose). Der genaue Name der Verbindung lautet: α -D-Glukopyranosyl-(1 $\rightarrow$ 2)- β -D-Fruktofuranosid oder auch β -D-Fruktofuranosyl- α -D-Glukopyranosid.



Maltose
(bestehend aus zwei D-Glukosebausteinen)



Laktose
(bestehend aus D-Glukose und D-Galaktose)

Abb. 9.10: Die Disaccharide Maltose und Laktose in der Haworth-Darstellung.

9.1.2.3 Polysaccharide

Polysaccharide können aus einigen 100 bis zu mehreren 1000 Einfachzuckern aufgebaut sein und stellen somit makromolekulare Naturstoffe dar, deren allgemeine Summenformel $(C_6H_{10}O_5)_n$ lautet. Aufbau und Größe unterliegen naturgemäß einer großen Variabilität. Die wichtigsten in der Natur vorkommenden Polysaccharide sind Stärke (Amylose, Amylopektin und Glykogen), die als intrazellulärer Energiespeicher dient, sowie Cellulose, welche zur Stabilisierung der Zellwände der Pflanzen dient. Diese Makromoleküle bestehen ausschließlich aus Glukoseeinheiten, die durch glykosidische Bindungen verknüpft sind. Dabei ist in der Stärke die Glukose α -glykosidisch, in der Cellulose jedoch β -glykosidisch verbunden.

Stärke bildet das Speicherkohlenhydrat der Pflanzen. Es handelt sich um ein Stoffgemisch aus 25% Amylose und 75% Amylopektin. Amylose besteht aus etwa 250 bis 350 α -D-Glukoseeinheiten, bei denen die Glukose über die anomere OH-Gruppe (C1 in α -Stellung) mit der OH-Gruppe am C4 der nächsten Glukose verknüpft sind. Dadurch bildet sich also eine Kette, die ausschließlich aus den α -(1,4)-glykosidischen Bindungen gebildet wird. Sie hat eine unverzweigte, spiralige Struktur und löst sich in Wasser. Den Hauptteil der Stärke macht Amylopektin mit 70-80% aus. Amylopektin besteht aus ca. 600 bis 6000 α -D-Glukoseeinheiten. Sie enthält auch Verzweigungen, welche gebildet werden, indem eine anomere OH-Gruppe mit einer OH-Gruppe am C6 einer weiteren Glukose verknüpft wird. Amylopektin mit seinen Verzweigungen legt sich um einen Kern aus Amylose. Amylopektin ist nur in heißem Wasser löslich, quillt aber in kaltem Wasser auf und bildet einen Kleister.

Besonders Kartoffeln, Getreide und Hülsenfrüchte enthalten viel Stärke. Dies stellt einen wichtigen Energiespeicher für den Keimling dar. Da Stärke nur wenig Lösungswasser braucht, kann in dieser Form viel Energie gespeichert werden, die kaum osmotische Probleme (wie es die gleiche Menge an freien Glukosemolekülen tun würde) verursacht.

Glykogen ist das Speicherkohlenhydrat bei Tieren und befindet sich in der Leber und der Muskulatur. Glykogen besteht wie Amylose und Amylopektin ausschließlich aus α -glykosidisch verknüpften D-Glukoseeinheiten. Im Gegensatz zur pflanzlichen Stärke ist Glykogen aber sehr stark verzweigt und kann deshalb, wenn nötig, viele Glukosemoleküle zugleich freisetzen. Die α -glykosidischen Bindungen können durch geeignete Enzyme (α -Glukosidasen) gespalten werden und setzen Glukose frei. Bei kurzfristig erhöhtem Energiebedarf wird Glykogen abgebaut und die freie Glukose zur Energiebereitstellung genutzt (Muskelarbeit).

Die dafür benötigten Enzyme kommen in der gesamten belebten Natur vor. Diese Glykosidasen sind in großer Menge im Speichel und im gesamten Verdauungstrakt vorhanden. Sie bewirken, dass langes Herumkauen stärkehaltiger Lebensmittel bereits im Mund Glukose freisetzt, die die Geschmackswahrnehmung „süß“ hervorruft.

Sind die Polysaccharide hingegen aus β -glykosidisch verknüpften Glukosemolekülen aufgebaut, können sie von der Enzymausstattung der Tiere nicht verdaut werden. Tiere, die sich von rein pflanzlicher Nahrung ernähren, benötigen daher symbiotische Mikroorganismen, die über geeignete Enzyme verfügen. Nur über die Tätigkeit der Endosymbionten können diese Tiere die Glukose aus Cellulose verwerten. Cellulose ist der Gerüststoff pflanzlicher Zellwände. Dieses Polysaccharid weist eine sehr dicht gepackte Struktur auf, um Stabilität beizutragen. Diese dichte Packung der Celluloseketten ist, im Gegensatz zu Stärke oder Glykogen, nur mit der β -glykosidisch verknüpften D-Glukose möglich. Dabei entsteht eine langgestreckte Polysaccharidkette, aufgebaut aus 8000 bis 12000 Glukosebausteinen. Wegen der gestreckten Form bilden sich zwischen benachbarten Ketten Wasserstoffbrückenbindungen aus. Die Substanz ist faserig, nicht wasserlöslich und quillt kaum.

Um Cellulose spalten zu können, wird, wie oben erwähnt, das Enzym Cellulase (eine β -Glukosidase) benötigt, das Säugetiere nicht besitzen. Cellulose ist daher für Tiere ohne Endosymbionten unverdaulich (Ballaststoffe).

9.2 BIOMOLEKÜLE – LIPIDE

Zu den Lipiden zählt man die Fette, Phospholipide und Steroide. Sie sind chemisch betrachtet eine sehr heterogene Gruppe von Molekülen. Sie werden aber aufgrund ihrer ähnlichen physikalischen Eigenschaften in eine Gruppe zusammengefasst, wenn sie zwei Bedingungen erfüllen: nicht wasserlöslich, aber löslich in organischen Lösungsmitteln. Generell unterscheidet man, ob Lipide hydrolysierbar – also aus mehreren Bausteinen aufgebaut – oder nicht hydrolysierbar sind.

9.2.1 Fette

Fette sind Verbindungen, die durch Verknüpfung einer Carbonsäure (Fettsäure) mit einem Alkohol (meist Glycerin, Abb. 9.11) unter Wasserabspaltung (Kondensationsreaktion) entstanden sind. Sie sind also hydrolysierbar. Für die Bindung wird eine Hydroxylgruppe und eine Carboxylgruppe (langkettige Carbonsäure) zu einem Ester kondensiert. Da Glycerin ein dreiwertiger Alkohol ist (drei OH-Gruppen) können alle drei Hydroxylgruppen mit einer langkettigen Carbonsäure verestert sein. Dann handelt es sich um ein Neutralfett. Fettmoleküle kommen in vielen Zellen von Pflanzen, Tieren und Menschen vor und werden als Energiespeicher genutzt. Je nach der Natur der Fettsäure sind diese Moleküle bei Raumtemperatur fest oder flüssig. Im letzteren Fall spricht man von Ölen.

Fette und Öle sind aufgrund ihrer apolaren Eigenschaft nicht in Wasser löslich. Durch Natron- oder Kalilauge können die Esterbindungen wieder gespalten (hydrolysiert) werden und Fettsäure und Glycerin werden frei. Diese alkalische Esterhydrolyse wird auch Verseifung genannt, weil sie kulturhistorisch zur Herstellung von Seife verwendet wurde. Da diese Reaktion im Alkalischen abläuft, wird nicht die Carbonsäure, sondern die Fettsäure als Säurerest (in Form ihres Salzes) freigesetzt. Die Salze der Fettsäuren besitzen wegen der negativen Ladung einen hydrophilen „Kopf“ und einen lipophilen „Schwanz“ und können daher Micellen bilden, welche Schmutz und Fettpartikel einschließen. Natriumsalze der Fettsäuren werden als Kernseife und die Kaliumsalze der Fettsäuren als Schmierseife verwendet.

Zu den einfachen Lipiden gehören die Neutralfette. Häufig spricht man allerdings einfach nur von „Fetten“. Sie bestehen aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff und Sauerstoff. Gebildet werden sie immer aus zwei Bausteinen, dem Glycerin (Glycerol) und einer oder mehreren Fettsäuren.

Neutralfette sind Derivate des Glycerins, das mit drei Fettsäuren verestert ist (die Hydroxylgruppen des Glycerins sind mit den Carboxylgruppen durch eine Kondensationsreaktion verknüpft).

Bausteine der Fette

Da Glycerin ein dreiwertiger Alkohol (mit drei Hydroxylgruppen) ist, kann jede einzelne mit einer Fettsäure über eine Esterbindung verknüpft werden. Sind drei Fettsäuren an ein Glycerin gebunden, spricht man von einem Triglycerid.

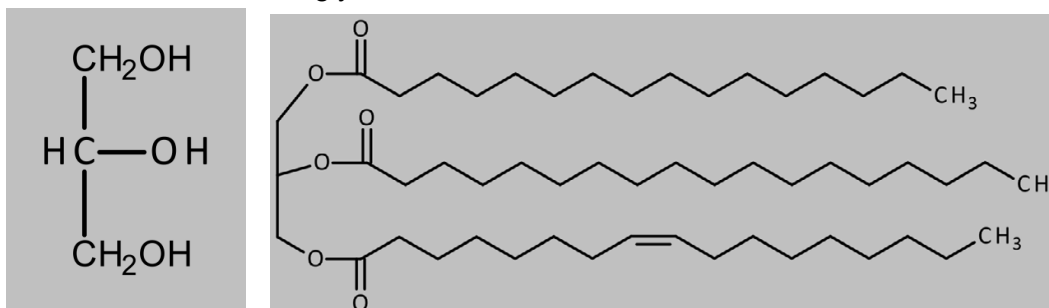


Abb. 9.11: Glycerin (links) und ein Glycerinderivat (rechts), ein Neutralfett – das Kondensationsprodukt von Glycerin mit den Fettsäuren Palmitin- (oben), Stearin- (Mitte) und Ölsäure (unten). Palmitin- und Stearinsäure sind gesättigte Fettsäuren, Ölsäure ist eine ungesättigte Fettsäure.

Fettsäuren

Fettsäuren sind unverzweigte Ketten mit einer Anzahl an Kohlenstoffatomen, die größer ist als 6. Am ersten Kohlenstoffatom befindet sich eine Carboxylgruppe (-COOH). Enthält die Verbindung keine Doppelbindung spricht man von gesättigten Fettsäuren (siehe Abb. 9.11, Palmitinsäure mit 16 C-Atomen und Stearinsäure mit 18 C-Atomen). Ungesättigte Fettsäuren besitzen mindestens eine Doppelbindung (siehe Abb. 9.11, Ölsäure).

Gesättigte Fettsäuren

Fettsäuren können gesättigt (maximale Anzahl an Wasserstoffatomen) sein und weisen dann keine Doppelbindungen auf (Abb. 9.12, A-C). Sie können eine oder mehrere Doppelbindungen aufweisen. Je nachdem bezeichnet man sie als einfach ungesättigt oder mehrfach ungesättigt (siehe Abb. 9.12, D-G). Zu den mehrfach ungesättigten Fettsäuren gehören auch die Omega-3- und Omega-6-Fettsäuren. In ungesättigten Fettsäuren sind die Doppelbindungen isoliert. Diese können, anders als in aromatischen Verbindungen, keine delokalisierten Elektronensysteme ausbilden, da zwischen den sp^2 -hybridisierten C-Atomen mit den π -Bindungen immer ein C-Atom mit einer sp^3 -Hybridisierung liegt. Somit sind Fettsäuren, die mehrere Doppelbindungen enthalten, auch nicht mesomeriestabilisiert.

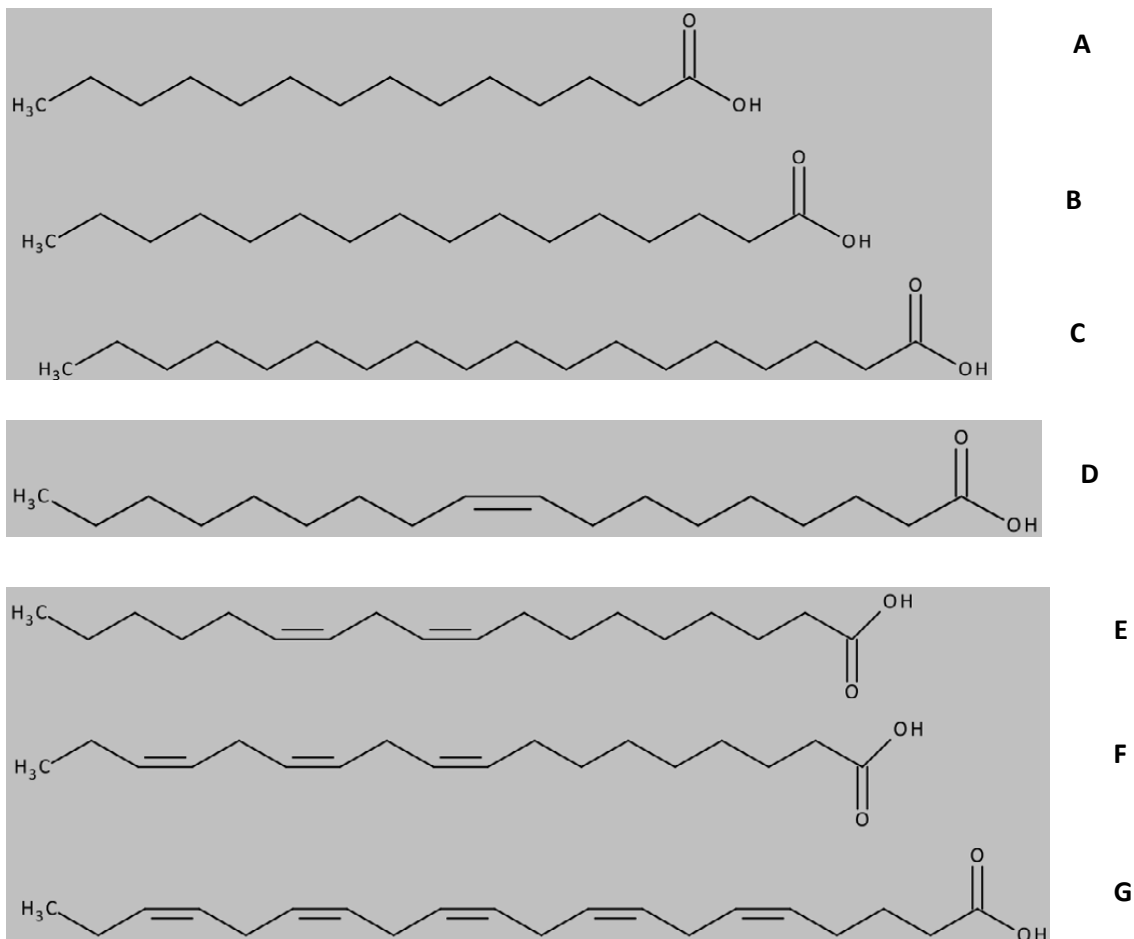


Abb. 9.12: Die gesättigten Fettsäuren (A) Myristinsäure (C14), (B) Palmitinsäure (C16) und (C) Stearinsäure (C18); die einfach ungesättigte Fettsäure (D) Ölsäure und die mehrfach ungesättigten Fettsäuren (E) Linsäure, (F) Linolensäure und (G) eine 5-fach ungesättigte Fettsäure (aus Fischölen)

Schmelzpunkte der Fette

Nicht alle Fette haben denselben Schmelzpunkt. Mit der Kettenlänge sowie der Anzahl an Doppelbindungen ändert sich auch der Schmelzpunkt. Nimmt die Kettenlänge zu, steigt er; nimmt die Zahl an Doppelbindungen zu, sinkt er. Kurzkettige Fettsäuren haben einen Schmelzpunkt zwischen +16 und -8 °C und sind bei Raumtemperatur flüssig. Bei langkettigen Fettsäuren liegt der Schmelzpunkt zwischen +55 und +70 °C. Sie sind bei Raumtemperatur fest. Der Schmelzpunkt einer mittelkettigen Fettsäure liegt dazwischen.

Flüssige Fette (Öle) haben eine größere Anzahl an Doppelbindungen in den Fettsäuren und meist kürzere Fettsäureketten als feste Fette.

Warum sinkt der Schmelzpunkt mit Zunahme der Doppelbindungen? Das liegt daran, dass infolge der Doppelbindung (π -Bindung und sp^2 -hybridisierte Kohlenstoffatome) ein „Knick“ in der Kettenarchitektur entsteht. Dadurch liegen die Fettsäuren weniger dicht beieinander und können weniger schwache Wechselwirkungen (Van-der-Waals-Kräfte) ausbilden. Es wird eine geringere Energie benötigt, um sie gegeneinander zu verschieben – also ihren Aggregatzustand zu verändern –, weshalb der Schmelzpunkt niedriger liegt. Besitzen Fettsäuren hingegen keine Doppelbindung, liegen sie dicht aneinander. Es ist mehr Energie nötig, sie zu „trennen“, wodurch der Schmelzpunkt steigt.

9.2.2 Membranbildende Lipide: Phospholipide und Steroide

Ohne diesen beiden Molekültypen wäre die am Anfang der Evolution stehende Bildung einer Zellstruktur nicht vorstellbar; sie sind die Grundbausteine von biologischen Membranen.

Ein Phospholipidmolekül ähnelt einem Fettmolekül mit dem Unterschied, dass die dritte Hydroxyl-

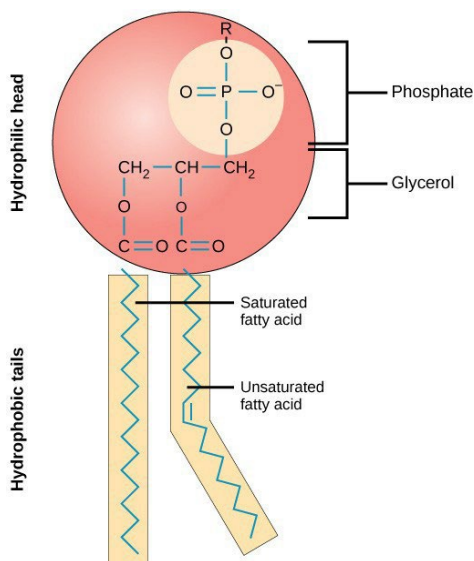


Abb. 9.13: Die Struktur eines Phospholipids, in der Darstellung als gemischte Skelett-/ Valenzstrichformel

gruppe nicht mit einer Fettsäure, sondern mit einer Phosphorsäure verestert ist. Diese Phosphorsäure hat drei dissoziierbare Hydroxylfunktionen. Diese steuern bei neutralem pH-Wert negative Ladungen bei, welche das Molekül an dieser Stelle geladen und somit wasserlöslich machen. Außerdem kann die Phosphatgruppe über eine weitere OH-Gruppe wiederum mit unterschiedlichen anderen kleinen Molekülen, die ggfs. Ladungen mitbringen können (sog. Kopfgruppen), verknüpft sein (Abb. 9.13). Durch die Einführung einer polaren, oder im Falle des Cholins geladenen, Kopfgruppe haben Phospholipide eine spezielle Eigenschaft, man sagt sie sind amphipatisch: Auf der Seite der beiden Fettsäurereste ist das Molekül hydrophob (wasserabweisend, vermeidet Interaktionen mit Wasser), die Phosphorsäure-Kopfgruppe (Phosphatrest) ist hydrophil (wasserliebend, interagiert mit Wasser). Daraus ergibt sich, dass sich im wässrigen Milieu die Phospholipidmoleküle mit ihren Fettsäureresten spontan

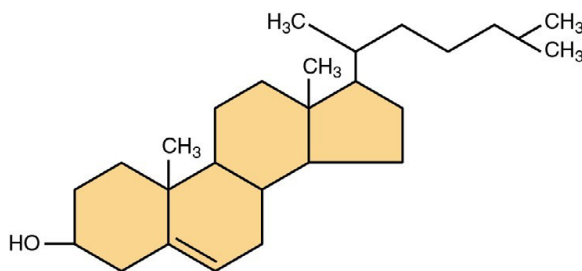
geordnet aneinanderlagern, um den Kontakt mit Wasser möglichst zu vermeiden. Für die Ausbildung des Bilayers spielt die Struktur der Fettsäurereste eine wichtige Rolle.

Weil sehr viele Phospholipide eine gesättigte und eine ungesättigte Fettsäure aufweisen (Abb. 9.13), führt dies zu einer größeren Raumforderung des hydrophoben Molekülandes. Dadurch können keine kleinen Micellen (wie bei Seifen) gebildet werden. Die hydrophoben Bereiche lagern sich zusammen, und energetisch am günstigsten ist dabei die Ausbildung einer Doppelschicht.

Phospholipide sind amphipatisch, haben eine hydrophile Kopfgruppe und einen hydrophoben Fettsäureteil. Sie bilden in wässriger Umgebung spontan Lipiddoppelschichten.

Steroide sind eine andere Gruppe von chemischen Substanzen mit vier kondensierten, in einer Ebene angeordneten Kohlenwasserstoffringen, weisen aber ebenfalls einen amphipatischen Charakter auf.

Sie haben eine schwach polare Hydroxyl-(Kopf-)Gruppe und ein apolares Kohlenwasserstoffgerüst. Der bekannteste Vertreter dieser Molekülklasse ist Cholesterol



(Abb. 9.14"Cholesterol).

Es ist Baustoff und Vorläufersubstanz. Cholesterol ist ein in tierischen

Membranen weitverbreitetes Steroid, das sich entsprechend seiner Polarität in den Lipidbilayer einbaut und durch seine starre Struktur einen Einfluss auf die „Fluidität“ einer Membran ausübt. Außerdem dient Cholesterol als Ausgangsstoff für die Synthese der Steroidhormone, deren bekannteste Vertreter die Sexualhormone sind.

9.3 PROTEINE

Eiweißstoffe, auch Proteine genannt, bestehen aus Aminosäuren. Diese bilden die Grundbausteine und sind aus den Elementen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und manchmal Schwefel (S) und Phosphor (P) aufgebaut. Sie besitzen zwei funktionelle Gruppen, eine Amino- und eine Carboxylgruppe.

Die bedeutendsten Stickstoffverbindungen sind die Nitrate (NO_3 -Verbindungen, Salze der Salpetersäure) sowie die Ammoniumsalze (NH_4^+ -Verbindungen). In der Landwirtschaft gelangen sie im Idealfall über die natürlichen Düngemittel wie verrottete Pflanzenteile (Kompost) oder Ausscheidungen von Tieren (Jauche, Stallmist) in den Boden und können dann von den Pflanzen aufgenommen werden. Häufig sind allerdings künstliche Dünger aus Ammonium- und Nitratverbindungen nötig, um ausreichend Stickstoff für das Pflanzenwachstum bereitzustellen. Ausgewählte Bodenbakterien wie die symbiotischen Knöllchenbakterien bei Schmetterlingsblütlern können sogar elementaren Stickstoff direkt aus der Luft fixieren, welcher dann von den Pflanzen als Stickstoffquelle für die Aminosäurebiosynthese verfügbar wird. Bei Verrottung kann der in Form von Aminosäuren und Protein fixierte Stickstoff der Pflanzen durch im Boden befindliche Mikroorganismen, welche die Stickstoffverbindungen abbauen, wieder frei und als elementarer Stickstoff an die Luft abgegeben werden.

9.3.1 Struktur von Proteinen

Die im Tierreich vorkommenden Eiweiße (Proteine) sind aus alpha-Aminosäuren (2-Aminocarbon-säure) aufgebaut. Bei ihnen hängen sowohl die Aminofunktion, als auch die Carboxylfunktion am selben C-Atom – dem sog. alpha-C-Atom (siehe unten). Neben den alpha-Aminosäuren existieren aber auch beta- und gamma- Aminosäuren, die nicht in Proteinen vorkommen und für verschiedene andere Funktionen wie z. B. die Signalübertragung bei der Reizleitung benötigt werden. Die DNA kodiert für insgesamt 20 verschiedene proteinogene alpha-Aminosäuren (das bedeutet, sie sind Bausteine von Proteinen), aus denen alle in der Zelle gebildeten Proteine aufgebaut sind. Bei vielen Proteinen werden nach der Bildung einige Aminosäuren chemisch modifiziert (post-translationell). So können auch andere Atome in die Aminosäuren eingebaut werden. Für die meisten Tierarten sind dieselben 8 Aminosäuren essentiell und müssen deshalb mit der Nahrung aufgenommen werden. Da die Tiere keinen Proteinspeicher besitzen, müssen essentielle Aminosäuren regelmäßig aufgenommen werden, um keine Mangelsituation zu erzeugen. **Nomenklatur**

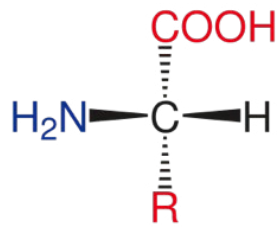
Jede der 20 biogenen α -Aminosäuren besitzt einen Trivialnamen. Gemäß den Regeln der Fischer-Projektion werden die Aminosäuren als L- oder D-Aminosäure bezeichnet, denn das C-Atom mit der Amino- und Carboxylfunktion ist asymmetrisch (mit Ausnahme von Glycin). Für die Zuordnung zur D- oder L-Reihe ist ausschlaggebend, zu welcher Seite die Aminogruppe am asymmetrischen α -C-Atom weist. Alle biogenen Aminosäuren der Tiere sind L-Aminosäuren.

Zur Abkürzung der Trivialnamen verwendet man entweder einen dreibuchstabigen oder einbuchstabigen Code, wie zum Beispiel: Alanin - Ala – A.

Alle proteinogenen Aminosäuren tragen am α -C-Atom eine Aminogruppe, eine Carboxygruppe und ein Wasserstoffatom. Sie unterscheiden sich nur in ihrem 4. Bindungspartner (auch Restgruppe genannt).

9.3.2 Aufbau einer Aminosäure

Alle Aminosäuren besitzen dieselbe Grundstruktur (Abb. 9.15) und unterscheiden sich lediglich in ihrem Rest R (siehe Abb. 9.16), welcher als Seitenkette bezeichnet wird. Die Proteine der Tiere sind ausschließlich aus L-Aminosäuren aufgebaut. Am zentralen (alpha-)Kohlenstoffatom (C-Atom) hängen somit immer:



- eine Aminogruppe (-NH₂)
- eine Carboxygruppe (-COOH)
- ein Wasserstoffatom (H)
- ein Rest R

Abb. 9.15: Fischerprojektion einer L-Aminosäure

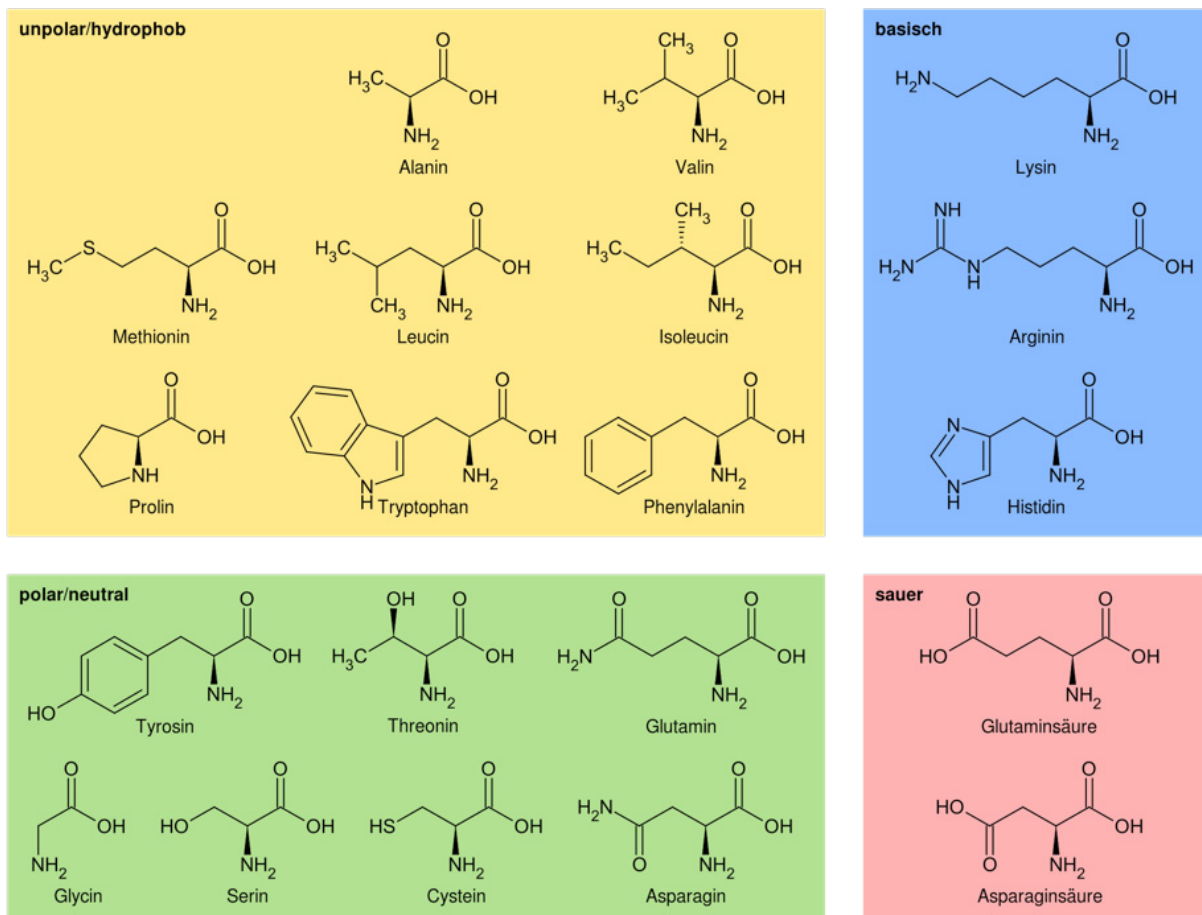


Abb. 9.16: Überblick über die 20 proteinogenen Aminosäuren

Man kann die α -Aminosäuren nach ihren Seitenketten in vier Gruppen unterteilen:

- unpolare Aminosäuren; die Seitenkette besteht nur aus den Elementen Wasserstoff und Kohlenstoff (gelbes Feld),
- polare, nicht-dissoziierbare Aminosäuren; in der Seitenkette finden sich ein Heteroatom, wie O, S, Se oder N (grünes Feld),
- saure Aminosäuren; die Seitenkette enthält eine zusätzliche Carboxylgruppe (rotes Feld).
- basische Aminosäuren; die Seitenkette enthält eine zusätzliche Aminogruppe (blaues Feld).

Die kleinste Aminosäure, Glycin, besitzt als Rest nur ein Wasserstoffatom. Ihr α -C-Atom weist somit zwei Wasserstoffatome als Liganden auf und ist nicht asymmetrisch. Alle anderen Aminosäuren besitzen mindestens ein chirales C-Atom (viele unterschiedliche Liganden am α -C-Atom).

9.3.3 Eigenschaften der Aminosäuren

Aminosäuren können sowohl als Basen als auch als Säuren reagieren. Die Aminogruppe fungiert als Base und kann ein Proton aufnehmen, die Carboxylgruppe als Säure und kann ein Proton abgeben. Die pK_s -Werte der Carboxylfunktionen liegen zwischen 2 und 3, während die pK_B -Werte der Aminofunktion um 9 liegen. Somit liegt eine Aminosäure in Wasser als Zwitterion vor. Dabei liegt die Aminofunktion protoniert (mit einer positiven Ladung) vor, während die Carboxylatgruppe deprotoniert ist und eine negative Ladung aufweist (Abb. 9.17). Der pH-Wert hat aber einen Einfluss auf die Dissoziation der Säure- bzw. Basenfunktion. Je höher die Protonenkonzentration (niedriger pH-Wert) ist, desto mehr Gruppen liegen protoniert vor und die Ladung des gesamten Moleküls wird positiv. Bei Erhöhung des pH-Wertes deprotonieren die Gruppen in Abhängigkeit der pK_s -Werte und die Säurereste vermitteln dem Molekül dann eine negative Ladung.



Abb. 9.17: Bildung des Zwitterions am Beispiel der Aminosäure Glycin bei neutralem pH-Wert

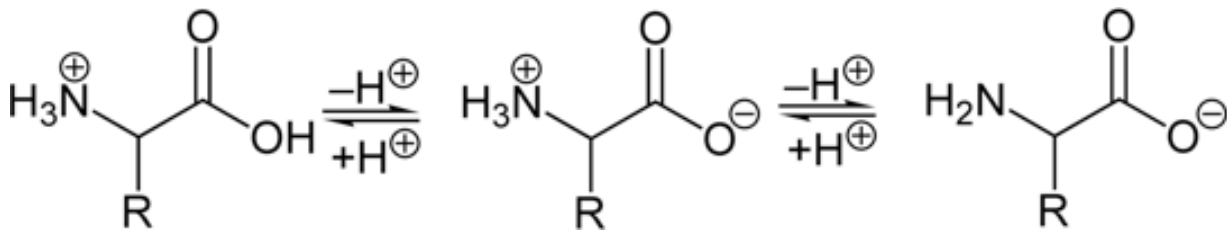


Abb. 9.18: Amphotere Eigenschaften von Aminosäuren und Abhängigkeit der Ladung vom pH-Wert

Durch Decarboxylierung entstehen aus den Aminosäuren biogene Amine, welche Bestandteile von Biomolekülen sind oder als Signalstoffe wirken. Aus der Aminosäure Tyrosin wird beispielsweise so das Hormon Adrenalin und Noradrenalin gebildet.

9.3.4 Peptidbindung

Aminosäuren verbinden sich über die Carboxylgruppe ($-\text{COOH}$) am α -C-Atom einer Aminosäure und der Aminofunktion ($-\text{NH}_2$) am α -C-Atom einer weiteren Aminosäure miteinander. Dabei wird Wasser abgespalten (Kondensationsreaktion). Man spricht auch von einer Peptidbindung (eine Säureamidbindung). Es können sich dadurch lange Aminosäureketten (Peptidketten) ausbilden. Je nach Anzahl der Aminosäuren, welche miteinander verknüpft wurden, spricht man von Dipeptid (zwei AS), Tripeptid (3 AS), Oligopeptid (oligo = wenig, bis zehn AS) oder Polypeptid (poly = viel, mehr als zehn bis mehrere 100 AS). Besonders große Peptide werden als Proteine bezeichnet (mehrere 100 bis zehntausende AS).

9.3.5 Räumliche Struktur der Proteine

Proteine besitzen, wie alle anderen Makromoleküle auch, eine sehr komplexe Struktur. Da diese aber bei den Proteinen eine sehr wichtige Rolle für die Funktion (z. B. Enzyme) spielt, beschäftigt man sich bei Proteinen besonders intensiv mit deren Strukturmerkmalen.

Man betrachtet bis zu vier Ebenen:

- Primärstruktur
- Sekundärstruktur
- Tertiärstruktur
- Quartärstruktur

Die Primärstruktur gibt die Art, Anzahl und Abfolge der Aminosäuren (Aminosäuresequenz) einer Peptidkette an. Diese Reihenfolge ist genetisch festgelegt und bestimmt häufig die räumliche Struktur und die Eigenschaften. Da es 20 verschiedene Aminosäuren gibt, ergeben sich unzählige mögliche Verbindungen.

Die Abfolge der Aminosäuren in einer Peptidkette ist genetisch determiniert. Sie bedingt direkt unter Ausbildung von verschiedenen Strukturebenen die räumliche Struktur von Proteinen.

Die dreidimensionale Struktur eines Proteins wird durch weitere Strukturebenen (Sekundär-, Tertiär- und Quartär-Struktur, Abb. 9.19) angegeben: Die Sekundärstruktur beschreibt die Lage der Peptidbindungen zueinander. Sie wird durch die Wasserstoffbrücken zwischen dem Sauerstoffatom und dem Aminowasserstoff verschiedener Peptidbindungen stabilisiert (Abb. 9.19). Die Peptidbindungen können ungeordnet zueinander vorliegen oder sich zu zwei unterschiedlichen Strukturen zusammenlagern. Wenn sie übereinanderstehen, bildet sich eine schraubenförmige Anordnung der Peptidkette – eine Helix (z. B. α -Helix) – aus. Helikale Proteinbereiche sind dehnbar und elastisch. Diese Strukturen sind für bewegliche oder dynamische Bewegungen des Peptids oder Proteins wichtig. Es können sich aber die Peptidbindungen mehrerer Proteinfäden auch nebeneinander anordnen und eine Fläche (ein Blatt) ausbilden (β -Faltblatt). Die „Faltblatt“-Struktur ergibt sich aus den Tetraederwinkeln der α -C-Atome. Diese Struktur ist nicht weiter dehnbar, weil hier schon die größtmögliche Streckung der Peptidkette oder des Proteins verwirklicht ist. Die β -Faltblatt-Bereiche vermitteln einem Peptid oder Protein größtmögliche Stabilität und sie sind deswegen in Strukturteilen von größeren Proteinen bzw. Skelettproteinen häufig zu finden.

Die Tertiärstruktur beschreibt die gesamte räumliche Struktur einer Peptidkette. Sie wird durch die weiteren inter- und intramolekularen Wechselwirkungen wie Disulfidbrücken (R-S-S-R'), Ionenbindungen, Wasserstoffbrücken und hydrophobe Wechselwirkungen bestimmt. Die Anordnung der Kette kann dadurch faserförmig (fibrillär) oder knäueiförmig (globulär) sein (Abb. 9.19).

Die Quartärstruktur ergibt sich durch das Zusammenfügen verschiedener Peptidketten mit ihren jeweiligen Tertiärstrukturen. Während alle Proteine eine Tertiärstruktur aufweisen, sind die Quartärstrukturen nur in größeren Proteinkomplexen realisiert. Man spricht dann auch von einzelnen Untereinheiten. Sie werden, wie die Tertiärstruktur, durch Van-der-Waals-Kräfte und andere Wechselwirkungen zusammengehalten. Auch die Quartärstruktur wird durch Disulfidbrücken, Ionenbindungen, Wasserstoffbrücken und hydrophobe Wechselwirkungen stabilisiert.

Bei der Ausbildung der Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur spielen die Seitenketten eine große Rolle. Sie sind für die Eigenschaften der Proteine ausschlaggebend. Durch die Verschiedenartigkeit der Aminosäurereste können die unterschiedlichsten Proteine gebildet werden. Dissoziierbare Gruppen in den Seitenketten beeinflussen außerdem die Ladung der Proteine. Sie hängt vom pH-Wert ab. So können z. B. wichtige Pufferungsfunktionen von den Seitenketten der Aminosäure Histidin übernommen werden. Man spricht in diesem Zusammenhang von einem Eiweißpuffer. Dieser kann überschüssige H^+ - oder OH^- -Ionen abfangen und dadurch pH-Wert-Änderungen ausgleichen.

Neben der Pufferwirkung können Proteine auch Wasser binden und somit darin gelöste Stoffe transportieren. Ihre Funktion reicht von Stütz- und Stabilisierungsfunktion bis hin zur Signalweiterleitung, Tunnel- und Transportfunktion. Das Transportprotein Albumin kann beispielsweise wasserunlösliche Fettsäuren, Mineralstoffe oder Vitamine im Blut transportieren. Auch viele Arzneistoffe werden an Albumin gebunden und so zum Wirkort befördert.

9.4.1 Die Bestandteile der Nukleotidmonomere

Nukleinsäure-Basen

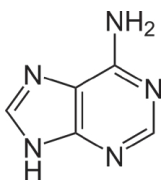
Der basische Charakter wird durch den Gehalt an Stickstoff bestimmt. Zwei Typen von Basen kommen in Nukleinsäuren vor (Abb. 9.21):

- Purine (2-Ringsystem-Basen) und
- Pyrimidine (1-Ringsystem-Basen)

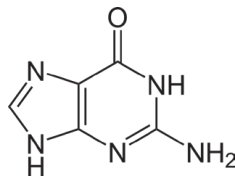
Zu den Purinen gehören die Basen Adenin und Guanin (G), die Pyrimidinbasen sind Cytosin (C), Thymin (T) und Uracil (Abb. 9.21). Die Basen der DNA sind die vier Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) und Thymin (T). Als Zuckerbaustein ist hier die 2'-Desoxyribose vertreten.

In der RNA findet Uracil (U) anstelle von Thymin Verwendung; die RNA-Basen sind A, G, C und U (Abb. 9.21), und der Zuckerbaustein ist Ribose (siehe unten).

Purine

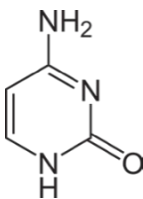


Adenin

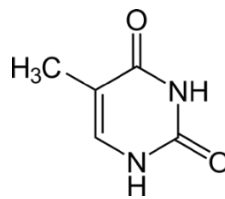


Guanin

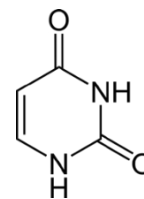
Pyrimidine



Cytosin



Thymin



Uracil

Abb. 9.21: Die Basen sind Purin und Pyrimidinderivate mit unterschiedlichen Ringsubstituenten

Nukleotidmonomere (oder Nukleosidmonophosphate) enthalten die Komponenten Base, Pentose (Ribose oder Desoxyribose) und Phosphorsäurereste.

Schon sehr früh war bekannt, dass Purin- und Pyrimidinbasen in der DNA immer im Verhältnis 50:50 vorkommen. Mit der Aufklärung der Doppelhelixstruktur der DNA wurde auch die komplementäre Paarung der Basen erklärbar. Durch die chemische Struktur der Basen können sich jeweils eine Purin- und eine Pyrimidinbase miteinander durch Ausbildung von Wasserstoffbrücken paaren (Abb. 9.22).

Die charakteristische Basenpaarung führt zu der Bildung eines komplementären Stranges:

- Adenin paart mit Thymin (oder mit Uracil in der RNA) und bildet dabei 2 Wasserstoffbrücken aus (Abb. 9.22).
- Guanin paart unter Ausbildung von drei Wasserstoffbrücken mit Cytosin ($A=T$ od. $A=U$ und $G\equiv C$).

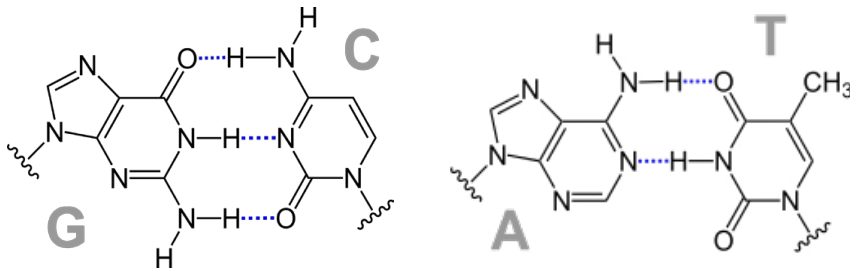


Abb. 9.22: Die Basenpaarung

Als Basenpaarung bezeichnet man die Ausbildung von spezifischen Wasserstoffbrücken zwischen den Basen Guanin und Cytosin bzw. Adenin und Thymin (Adenin und Uracil in der RNA).

Ribosen (Pentosen in Ringform)

RNA und DNA unterscheiden sich in den Zuckerbestandteilen. In RNA ist es die Ribose, in DNA ist es die Desoxyribose, die am Kohlenstoff C-2 ein Wasserstoff anstelle der in der Ribose vorhandenen Hydroxylgruppe (-OH) aufweist (Abb. 9.23).

Damit fehlt der DNA die freie reaktive Hydroxylgruppe, die demnach die DNA reaktionsträger macht als die RNA. Aufgrund dieser energetisch stabileren Eigenschaft ist sie besser als RNA geeignet, um als Speichersubstanz für genetische Information zu fungieren.

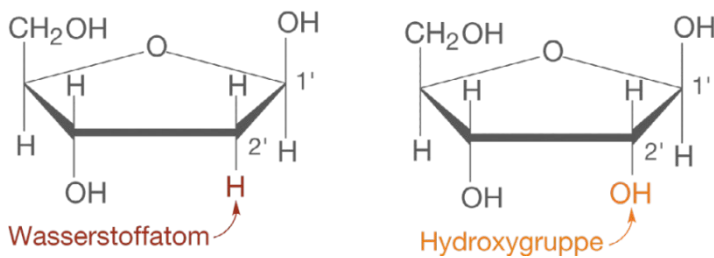


Abb. 9.23: Desoxyribose und Ribose

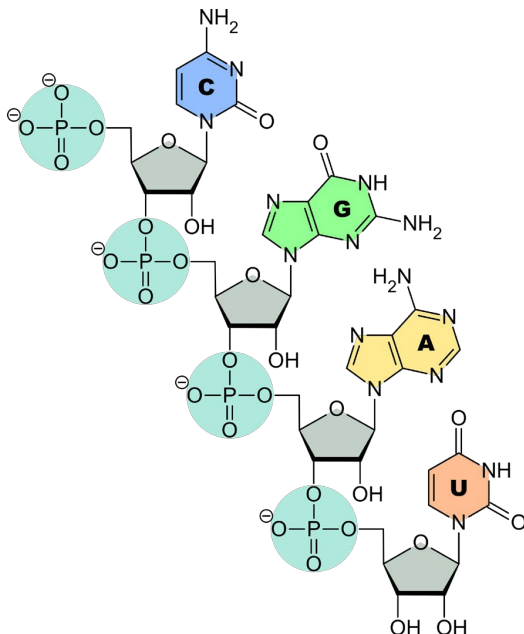


Abb. 9.24: Die Verknüpfung der Nukleotidbestandteile (hier ein RNA-Strang)

9.4.2 Die Struktur der Polynukleotide DNA und RNA

Phosphorsäure und Zucker bilden das Rückgrat der langen Polynukleotidkette, wogegen die Basen im ca. rechten Winkel davon abstehen (Abb. 9.24) und mit dem zweiten Strang über ihre Basen Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden können. Das Molekül hat die Form einer Leiter, in der die Sprossen die Basenpaare bilden und die Holme das Phosphat-Zucker-Rückgrat darstellen.

Was diese Grundstruktur betrifft, gibt es keinen Unterschied zwischen DNA und RNA: Die Bindungen sind gleich. Die Unterschiede betreffen lediglich die Zuckerbestandteile (Ribose bzw. Desoxyribose) und die Base Thymin (DNA) und Uracil (RNA). Ansonsten sind alle Verbindungen und Strukturen äquivalent: sowohl die Bindung zwischen der Pentose und den Basen (eine N-glykosidische Bindung) als auch die Phosphorsäureesterbindung zwischen Pentose und Phosphorsäurereste der benachbarten Nukleotide.

Aber beide Moleküle unterscheiden sich in der Sekundärstruktur:

Zwischen der Ober- und Unterseite der benachbarten Basenpaare verursachen schwache Wechselwirkungen eine Annäherung der Basenpaare und erzeugen einen hydrophoben Innenraum. Dies führt zu einer stapelförmigen Anordnung der Basenpaare und erzwingt damit eine Verdrehung des DNA-Doppelstranges zu der bekannten Helixstruktur (Verdrehung der Leiter, Abb. 9.25).

Die beiden hydrophilen Pentose-Phosphat-Rückgrate bilden die äußere Oberfläche der Doppelhelix und stehen mit der wässrigen Umgebung in Kontakt.

Die relativ hydrophoben gestapelten Basen befinden sich dagegen im Inneren der Helix (Abb. 9.25). Die Struktur der DNA verdeutlicht eindrücklich ein grundlegendes Prinzip zwischen Struktur und Funktion. Die besonderen Eigenschaften dieser chemischen Substanz ermöglichen, dass das Molekül als sehr effektives und stabiles Medium für die Speicherung von Information dient. Im Gegensatz zur doppelsträngigen DNA ist die RNA in der Regel einzelsträngig, kann allerdings mit komplementären Basensequenzen ($A=U$, $G\equiv C$) charakteristische Rückfaltungen und Schleifen und damit Doppelstrangbereiche ausbilden. Die komplementäre Basenpaarung führt hier aber nicht zur Bildung einer durchgehenden Helix.

Die Grundstrukturen der Nukleinsäuren sind in DNA und RNA gleich.
Sie unterscheiden sich lediglich im Zuckerbestandteil (Desoxyribose/Ribose), in der Pyrimidinbase Thymin/Uracil und in ihrer Sekundärstruktur.

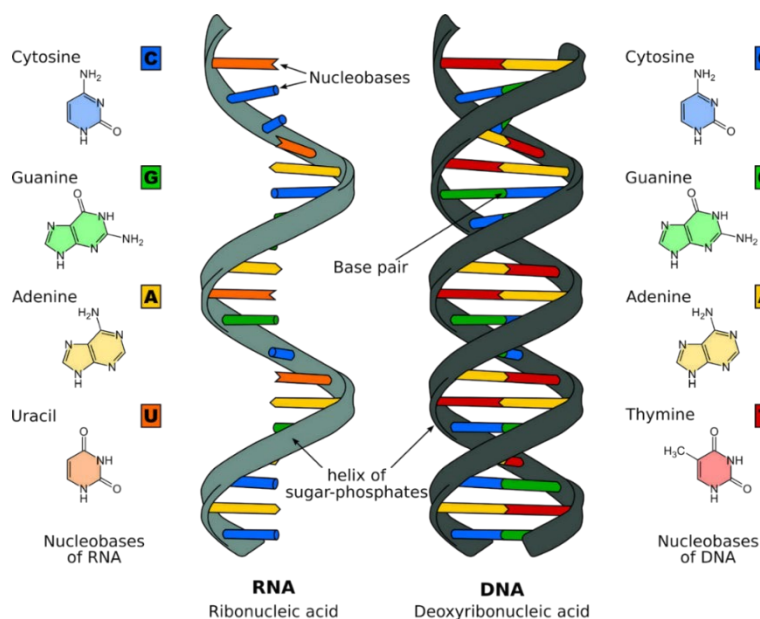


Abb. 9.25: Die Struktur von RNA (links als Einzelstrang) bzw. DNA (rechts als antiparalleler Doppelstrang)

10 Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1.1 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H2O_Kalottenmodell_und_St%C3%A4bchenmodell_8127.JPG
„Molekül - gebaut mit dem Molekülbaukasten“ von Bin im Garten unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
- Abb. 2.1 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rutherfordsches_Atommodell.svg,
„Rutherfordsches Atommodell“ von Night Ink, gemeinfrei
- Abb. 2.2 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energieniveauschema_Orbitalmodell.png,
„Energieniveauschema_Orbitalmodell“ von Ichwarnur veröffentlicht unter Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International Lizenz
- Abb. 2.3 a https://commons.wikimedia.org/wiki/File:S_Orbital.png,
This work is ineligible for copyright and therefore in the public domain because it consists entirely of information that is common property and contains no original authorship
- Abb. 2.3 b https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1c/Px_py_pz_orbitals.png/800px-Px_py_pz_orbitals.png, This work is ineligible for copyright and therefore in the public domain because it consists entirely of information that is common property and contains no original authorship
- Abb. 2.4 https://de.wikipedia.org/wiki/Kohlenstoff#/media/File:Elektronenkonfiguration_Kohlenstoff.png, „Elektronenkonfiguration des Kohlenstoffatoms im Grundzustand“ von Ichwarnur unter der CC BY SA 4.0 Lizenz
- Abb. 2.5 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a5/Periodensystem.svg>,
„Periodensystem“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 2.6 Universität Wien
- Abb. 3.1 Universität Wien
- Abb. 3.2 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3f/Butters%C3%A4ure_Lewis.svg,
„Buttersäure_Lewis“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.3 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f2/1%2C4-pentadiene_%28hydrogens%29.svg,
„1,4-pentadiene (hydrogens)“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.4 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/Sulfuric_acid_lewis.png,
„Sulfuric acid lewis“, von Pngbot unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
- Abb. 3.5 Universität Wien
- Abb. 3.6 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/75/Mesomerie_Nitrit-Ion.svg; <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/Sulfurdioxide-resonance.svg>,
„Mesomerie_Nitrit-Ion“, gemeinfrei verfügbar; „Sulfurdioxide-resonance“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.7 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Kohlenstoff_Hybridisiert.jpg,
„Kohlenstoff Hybridisiert“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.8 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/e8/Tetrahedral-angle-3D-balls.png>,
„Tetrahedral-angle-3D-balls“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.9 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Methan_geom2.PNG,
„Methan geom2“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.10 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/1_Butan.svg,
„1 Butan“, gemeinfrei verfügbar;
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/76/Butane-3D-balls.png>,
„Butane-3D-balls“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.11 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fa/Water-2D-flat.png>; „Water-2D-flat“, gemeinfrei verfügbar;
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:H2O_Kalottenmodell_und_St%C3%A4bchenmodell_8127.JPG; „Ammonia-3D-balls-A“, gemeinfrei verfügbar;
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/05/Ammonia-3D-balls-A.png>;
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7f/Ammonia-dimensions-from-Greenwood%26Earnshaw-2D.png>,
„Ammonia-dimensions-from-Greenwood&Earnshaw-2D“, gemeinfrei verfügbar
- Abb. 3.12 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/95/Doppelbindung1.png>,
„Doppelbindung1“, von David Pilz unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
- Abb. 3.13 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/32/Liaison_pi.svg,
„Liaison pi“ von Amelliug unter der CC BY SA 3.0 Lizenz

Abb. 3.14	Universität Wien
Abb. 3.15	Universität Wien
Abb. 3.16	Universität Wien
Abb. 3.17	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Diamond_and_graphite.jpg , „Diamond and graphite“ von Itub unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
Abb. 3.18	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3b/Buckminsterfullerene_animated.gif ,
a 3.18 b	„Buckminsterfullerene animated“ von Sponk unter der CC BY SA 3.0 Lizenz; „Carbon nanotube“ von AJC1 unter der CC BY SA 2.0 Lizenz
Abb. 3.19	Universität Wien
Abb. 3.20	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f9/Ionlattice-fcc.svg , „Ionlattice-fcc“ von Prolineserver unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
Abb. 3.21	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/4/41/ Nuvola_di_elettroni.svg/1280px-Nuvola_di_elettroni.svg.png , „Nuvola di elettroni“, gemeinfrei verfügbar
Abb. 3.22	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/Gaya_dipol-dipol_cair_paralel_3.jpg , „Gaya dipol-dipol cair paralel 3“ von Via al Zahra unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
Abb. 3.23	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/ Wasserstoffbr%C3%BCckenbindungen-Wasser.svg , „Wasserstoffbrückenbindungen-Wasser“, gemeinfrei verfügbar
Abb. 5.1	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ad/S%C3%A4uren_und_Laugen_-_PH_ Skala_Universalindikator.png , „Säuren und Laugen - PH Skala Universalindikator“ von Kopiersperre unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
Abb. 7.1	Universität Wien
Abb. 7.2	Universität Wien
Abb. 7.3	Universität Wien
Abb. 7.4	Universität Wien
Abb. 7.5	Universität Wien
Abb. 7.6	Universität Wien
Abb. 7.7	Universität Wien
Abb. 7.8	Universität Wien
Abb. 7.9	Universität Wien
Abb. 7.10	Universität Wien
Abb. 7.11	Universität Wien
Abb. 7.12	Universität Wien
Abb. 7.13	Universität Wien
Abb. 8.1	Universität Wien
Abb. 8.2	Universität Wien
Abb. 8.3	Universität Wien
Abb. 8.4	Universität Wien
Abb. 8.5	Universität Wien
Abb. 8.6	Universität Wien
Abb. 8.7	Universität Wien
Abb. 8.8	Universität Wien
Abb. 8.9	Universität Wien
Abb. 9.1	Universität Wien
Abb. 9.2	Universität Wien
Abb. 9.3	Universität Wien
Abb. 9.4	Universität Wien
Abb. 9.5	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/12/Milchs%C3%A4ure_Enantiomerenpaar.svg , „Milchsäure_Enantiomerenpaar“, gemeinfrei verfügbar
Abb. 9.6	Universität Wien
Abb. 9.7	Universität Wien
Abb. 9.8	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/2e/Alpha-D-Talopyranose.svg/1200px-Alpha- D-Talopyranose.svg.png ; „Alpha-D-Talopyranose“, gemeinfrei verfügbar; https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/82/Beta-D-Glucopyranose.svg/946px-Beta-D- Glucopyranose.svg.png „Beta-D-Glucopyranose“, gemeinfrei verfügbar
Abb. 9.9	https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Saccharose2.svg ,

- „Saccharose2“, gemeinfrei verfügbar;
 Abb. 9.10 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/93/Maltose_Haworth.svg,
 „Maltose_Haworth“, gemeinfrei verfügbar;
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/36/Lactose_Haworth.svg,
 „Lactose_Haworth“, gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.11 Universität Wien
 Abb. 9.12 Universität Wien
 Abb. 9.13 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Figure_05_01_02.jpg,
 „Figure_05_01_02“ von CNX OpenStax unter der CC-BY 4.0 Lizenz, modifiziert
 Abb. 9.14 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:222_Other_Important_Lipids-01.jpg,
 „222_Other_Important_Lipids-01“ von OpenStax College unter der CC-BY 3.0 Lizenz
 Abb. 9.15 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1c/L-amino_acid_general.svg,
 „L-amino_acid_general“, gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.16 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/7d/Overview_proteinogenic_amino_acids-DE.svg,
 „Overview_proteinogenic_amino_acids-DE“, gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.17 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f0/Betain-Glycine.png>,
 „Betain-Glycine“, gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.18 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amino_acid_titration.png,
 „Amino acid titration“ von Jue-commonswiki unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
 Abb. 9.19 <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Protein-Struktur.png>,
 „Protein-Struktur“ von Imalipusram unter der CC BY SA 3.0 Lizenz
 Abb. 9.20 https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nucleotide_nucleoside_general.svg#/media/File:Nucleotide_nucleoside_general.svg,
 „Nucleotide nucleoside general“ von Yikrazuul unter der CC BY-SA 3.0 Lizenz
 Abb. 9.21 <https://de.wikipedia.org/wiki/Adenin>, „Adenin“,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Cytosin.svg>, „Cytosin“,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Guanin.svg>, „Guanin“,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Thymin.svg>, „Thymin“,
<https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Uracil.svg>, „Uracil“, alle gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.22 https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Base_Pair_GC_Hydrogen_Bridge_V.1.svg, „Base
 Pair GC Hydrogen Bridge V.1“, gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.23 Barbara Hamilton, Universität Wien
 Abb. 9.24 <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=9831526>,
 „RNA-Nucleobases“, gemeinfrei verfügbar
 Abb. 9.25 https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Difference_DNA_RNA-EN.svg,
 „Difference DNA RNA-EN“ von Sponk unter der CC BY SA 3.0 Lizenz

*Die nicht näher spezifizierten Referenzen der Universität Wien stammen von Markus Marker oder Helmut Spreitzer.

11 Tabellenverzeichnis

- Tab. 1.1 Übersicht der Basiseinheiten
 Tab. 3.1 Zusammenhang Art der Bindung und Elektronegativitätsdifferenz
 Tab. 5.1 Bei Standardbedingungen gemessene Konzentrationen von HCl und NaCl
 Tab. 5.2 Übersicht Beispiele Ampholyt mit korrespondierender Base/Säure
 Tab. 5.3 pH-Werte von Säuren und Basen im Alltag
 Tab. 7.1 Übersicht Alkane
 Tab. 7.2 Chemische Bezeichnung und Trivialnamen von Carbonsäuren

Physik

Aufnahmeverfahren 2026/27

26.02.2026

Impressum

Titel: Physik - Aufnahmeverfahren 2026/2027

Urheber:

Titel: Grundwissen Physik (Release 0.4.4c)

Autor: Bernhard Grotz

Veröffentlicht unter der Creative Commons License (Version 3.0, by-nc-sa). Unabhängig von dieser Lizenz ist die Nutzung dieses Buchs für Unterricht und Forschung (§52a UrhG) sowie zum privaten Gebrauch (§53 UrhG) ausdrücklich erlaubt. Der Autor erhebt mit dem Buch weder den Anspruch auf Vollständigkeit, noch auf Fehlerfreiheit; insbesondere kann für inhaltliche Fehler keine Haftung übernommen werden.

Bearbeitung und Ergänzung durch:

Vizerektorat für Lehre, Lehrinnovationen und klinische Angelegenheiten mit dem Zentrum für Biologische Wissenschaften
Veterinärmedizinische Universität Wien
Veterinärplatz 1
1210 Wien

Herausgeberin:

Veterinärmedizinische Universität Wien
Veterinärplatz 1
1210 Wien



Lizenziert unter der CC BY-NC-SA 3.0 AT Lizenz

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung - Nicht-kommerziell - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 3.0 Österreich zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/at/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Teilbereiche der Physik.....	3
1.2 Physikalisches Experimentieren.....	3
1.3 Größen und Einheiten	3
2 Mechanik	6
2.1 Körpereigenschaften	6
2.2 Kinematik.....	8
2.3 Dynamik.....	23
2.4 Drehmoment und Gleichgewicht	31
2.5 Kraftwandler und Getriebe.....	35
2.6 Arbeit, Leistung und Energie.....	39
2.7 Impuls und Drehimpuls	45
2.8 Mechanik der Festkörper, Flüssigkeiten und Gase	47
2.9 Schwingungen und Wellen.....	62
3 Optik	74
3.1 Ausbreitung des Lichts.....	74
3.2 Reflexion von Licht	77
3.3 Lichtbrechung.....	81
3.4 Linsensysteme	85
3.5 Optische Geräte.....	87
3.6 Wellenoptik	91
3.7 Photometrie.....	95
4 Thermodynamik (Wärmelehre)	101
4.1 Temperatur und Wärme.....	101
4.2 Wärmekapazität und Phasenübergänge.....	103
4.3 Ausbreitung von Wärme	108
4.4 Ausdehnung bei Erwärmung.....	111
4.5 Die allgemeine Gasgleichung	113
4.6 Die kinetische Gastheorie.....	114
4.7 Die Hauptsätze der Wärmelehre	115
4.8 Wärmekraftmaschinen	119
5 Elektrizität und Magnetismus	120
5.1 Elektrische Ladung	120
5.2 Stromstärke, Spannung und Widerstand	122
5.3 Elektrische Arbeit, Energie und Leistung	129

5.4	Leiter, Halbleiter und Isolatoren.....	130
5.5	Elektrische Felder	132
5.6	Magnetismus	136
5.7	Elektromagnetische Induktion.....	142
6	Abbildungsverzeichnis	144
7	Tabellenverzeichnis	144

1 EINLEITUNG

1.1 TEILBEREICHE DER PHYSIK

Die Physik kann ihrerseits in weitere Teilbereiche untergliedert werden. Hierbei unterscheidet man für gewöhnlich die „klassische“ Physik von der „modernen“ Physik.

Klassische Physik

Die klassische Physik ab dem 17. bis zum 19. Jahrhundert wurde stark durch Isaac Newton sowie die Weiterführungen durch Émilie du Châtelet geprägt. Hierzu zählen unter anderem die Teilbereiche Mechanik, Akustik, Optik und Wärmelehre. In diesen Bereichen sind Beobachtungen oftmals direkt mit menschlichen Sinnen möglich. In den weiteren Teilbereichen Elektrizitätslehre und Magnetismus, die ebenfalls zur „klassischen“ Physik gezählt werden, sind viele Vorgänge nicht direkt mit menschlichen Sinnen wahrnehmbar.

Moderne Physik

Durch die Arbeiten von Albert Einstein (Relativitätstheorie), Erwin Schrödinger und Werner Heisenberg (Quantentheorie) und weiteren wurde im 20. Jahrhundert die „moderne“ Physik. Hierzu zählen u.a. die Atom-, Kern- und Teilchenphysik, die Quantentheorie, die Relativitätstheorie sowie die Festkörperphysik. Direkte Beobachtungen von Vorgängen sind hierbei mit menschlichen Sinnen (meist) unmöglich. Sowohl Newton als auch Einstein haben mit ihren wissenschaftlichen Arbeiten jeweils die vorherrschenden Weltbilder maßgeblich beeinflusst.

1.2 PHYSIKALISCHES EXPERIMENTIEREN

Versuche, die unter gleichen Bedingungen stets gleiche Ergebnisse liefern, bilden die Basis für das Formulieren von Gesetzmäßigkeiten und für technische Anwendungen. Lassen sich physikalische Vorgänge unter gleichen Bedingungen zu jeder Zeit wiederholen, so lassen sich nach Auswertung der Ergebnisse allgemein gültige Aussagen formulieren. Die Darstellung physikalischer Gesetze (Ursache und Wirkung) kann qualitativ in Worten oder quantitativ in mathematischer Form erfolgen. Eine Darstellung in mathematischer Form ist oft aussagekräftiger, erfordert allerdings eine Messbarkeit der entsprechenden Größen.

1.3 GRÖßEN UND EINHEITEN

Maßeinheiten spielen in der Physik eine wichtige Rolle:

- Jede physikalische Größe entspricht einer messbaren Eigenschaft eines Objekts oder Zustands, beispielsweise Länge, Masse, Zeit, Geschwindigkeit, Energie, Temperatur usw.
- Jede physikalische Größe setzt sich aus einem Zahlenwert und einer Maßeinheit zusammen:

$$\text{Physikalische Größe} = \text{Zahlenwert} \cdot \text{Einheit}$$

Handelt es sich beispielsweise bei der physikalischen Größe um die Masse m eines Objekts, so ist $[m] = kg$, falls die Masse in der Einheit „Kilogramm“ angegeben wird.

- Größen können nur addiert oder subtrahiert werden, wenn sie in ihren Einheiten übereinstimmen. Zuerst müssen also einzelne Einheiten gegebenenfalls passend umgerechnet werden.
- Größen können stets miteinander multipliziert oder durcheinander dividiert werden. Dabei wird die Rechenvorschrift sowohl auf die Zahlenwerte als auch auf die Einheiten der einzelnen Größen angewandt.

1.3.1 Skalare und vektorielle Größen

Manche physikalischen Größen, beispielsweise Masse, Volumen, elektrische Ladung und Temperatur, haben keine räumliche Vorzugsrichtung; ihre Wirkung ist also in allen Richtungen des Raumes gleich. Durch die Angabe *eines* Zahlenwerts und der zugehörigen Maßeinheit werden solche sogenannten „skalaren“ Größen hinreichend beschrieben. Andere physikalische Größen, beispielsweise Kraft, Beschleunigung und Geschwindigkeit, besitzen stets eine eindeutige Richtung im Raum. In Zeichnungen werden derartige Größen durch Pfeile (Vektoren), in physikalischen Formeln durch einen kleinen Pfeil über

dem Formelsymbol dargestellt. Im dreidimensionalen Raum sind letztlich auch *drei* Zahlenwerte und die zugehörige Maßeinheit nötig, um die physikalische Wirkung dieser sogenannten „vektoriellen“ Größen in die jeweiligen Raumrichtungen hinreichend zu beschreiben.

1.3.2 Internationale Einheiten

Durch Verwendung von klar festgelegten Maßeinheiten lassen sich Messergebnisse auch zu einer anderen Zeit, an einem anderen Ort und/oder in einer anderen Sprache nachvollziehen und vergleichen.

SI-Basiseinheiten: Folgende sieben Einheiten wurden als internationales Einheitensystem festgelegt (Tab.1.1):

Größe	Einheit	Einheitsbezeichnung
Länge	<i>m</i>	Meter
Zeit	<i>s</i>	Sekunde
Masse	<i>kg</i>	Kilogramm
Temperatur	<i>K</i>	Kelvin
Elektr. Stromstärke	<i>A</i>	Ampere
Lichtstärke	<i>cd</i>	Candela
Stoffmenge	<i>mol</i>	Mol

Aus diesen sieben „SI-Einheiten“ lassen sich die weiteren (für die Praxis ebenso relevanten) Einheiten nur mittels Multiplikation oder Division herleiten.

1.3.3 Zehnerpotenzen

Je nach Untersuchungsgegenstand können sich die Zahlenwerte von Messergebnissen um etliche Größenordnungen unterscheiden – beispielsweise besitzt ein Planet eine erheblich größere Masse als ein einzelnes Atom und ein Isolator einen um ein Vielfaches größeren elektrischen Widerstand als ein Leiter.

Für die einzelnen Zehnerpotenzen gibt es sprachliche Abkürzungen, beispielsweise steht die Vorsilbe „Kilo“ für den Faktor $1000 = 10^3$; somit kann man z.B. für 1000g auch $1 \cdot 10^3 \text{ g} = 1 \text{ kg}$ schreiben.

Ein wesentlicher Vorteil von Zehnerpotenzen liegt darin, dass sie sich aufgrund der Beziehung $a^b \cdot a^c = a^{b+c}$ und $(a^b)^c = a^{b \cdot c}$ einfach miteinander verrechnen lassen.

Beispiele:

- Wie viele Meter entsprechen einem Millimeter? $1 \text{ mm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- Wie viele Millimeter entsprechen einem Meter? $1 \text{ m} = 1 \cdot 10^3 \text{ mm}$
- Wie viele Quadrat-Meter entsprechen einem Quadrat-Millimeter? $1 \text{ mm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Somit gilt für einen Quadrat-Meter: $(1 \text{ mm})^2 = 1 \cdot (10^{-3} \text{ m})^2 = 1 \cdot (10^{-3})^2 \text{ m}^2 = 1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$
- Wie viele Quadrat-Millimeter entsprechen einem Quadrat-Meter? $1 \text{ m} = 1 \cdot 10^3 \text{ mm}$
Somit gilt für einen Quadrat-Meter: $(1 \text{ m})^2 = 1 \cdot (10^3 \text{ mm})^2 = 1 \cdot (10^3)^2 \text{ mm}^2 = 1 \cdot 10^6 \text{ mm}^2$
- Wie viele Kubik-Millimeter entsprechen einem Kubik-Meter? $1 \text{ mm} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
Somit gilt für einen Kubik-Meter: $(1 \text{ mm})^3 = 1 \cdot (10^{-3} \text{ m})^3 = 1 \cdot (10^{-3})^3 \text{ m}^3 = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$
- Wie viele Kubik-Millimeter entsprechen einem Kubik-Meter? $1 \text{ m} = 1 \cdot 10^3 \text{ mm}$
Somit gilt für einen Kubik-Meter: $(1 \text{ m})^3 = 1 \cdot (10^3 \text{ mm})^3 = 1 \cdot (10^3)^3 \text{ mm}^3 = 1 \cdot 10^9 \text{ mm}^3$

Einige solcher Potenzen sind in der folgenden Tabelle (1.2) aufgelistet:

Vorsilbe	Kurzzeichen	Faktor	Kurzschreibweise
Exa	<i>E</i>	1000000000000000000	$1 \cdot 10^{18}$
Peta	<i>P</i>	1000000000000000	$1 \cdot 10^{15}$
Tera	<i>T</i>	1000000000000	$1 \cdot 10^{12}$
Giga	<i>G</i>	1000000000	$1 \cdot 10^9$
Mega	<i>M</i>	1000000	$1 \cdot 10^6$
Kilo	<i>k</i>	1000	$1 \cdot 10^3$
Hekto	<i>h</i>	100	$1 \cdot 10^2$
Deka	<i>da</i>	10	$1 \cdot 10^1$
		1	$1 \cdot 10^0$
Dezi	<i>d</i>	0,1	$1 \cdot 10^{-1}$
Zenti	<i>c</i>	0,01	$1 \cdot 10^{-2}$
Milli	<i>m</i>	0,001	$1 \cdot 10^{-3}$
Mikro	μ	0,000001	$1 \cdot 10^{-6}$
Nano	<i>n</i>	0,000000001	$1 \cdot 10^{-9}$
Piko	<i>p</i>	0,000000000001	$1 \cdot 10^{-12}$
Femto	<i>f</i>	0,000000000000001	$1 \cdot 10^{-15}$
Atto	<i>a</i>	0,000000000000000001	$1 \cdot 10^{-18}$

1.3.4 Messfehler

Physikalische Messungen erfolgen durch ein Vergleichen der zu messenden Größe mit einer in der entsprechenden Einheit geeichten Skala (Meterstab, Waage, Thermometer, Volt- und Amperemeter, usw.). Häufig werden elektrische Messverfahren angewendet, welche die Messergebnisse mittels digitaler Anzeigen einfach ablesbar machen. Dennoch muss stets beachtet werden, dass die ermittelten Messwerte fehlerhaft sein können. Man unterscheidet prinzipiell zwischen systematischen und zufälligen („statistischen“) Messfehlern:

- *Systematische* Fehler ergeben sich aus einer falsch eingestellten Messapparatur. Ist beispielsweise ein Thermometer falsch kalibriert, so weicht die angezeigte Temperatur unweigerlich von der tatsächlichen Temperatur ab. Systematische Fehler treten bei jeder wiederholten Messung erneut auf, oftmals sorgen sie für eine konstante Abweichung vom tatsächlichen Wert (wenn beispielsweise die Skala eines Lineals bei 1 *mmmm* statt 0 *mmmm* beginnt).
- *Statistische* Fehler lassen sich auf Schwankungen der zu messenden Größe bei punktuellen Messungen mit Messfühlern, Messverzögerungen sowie Ableseungenauigkeiten (bei nicht-digitalen Anzeigen) beziehungsweise ungenaue elektronische Sensoren (bei digitalen Messgeräten) zurückführen.

Für jede einzelne Messung gilt also:

$$\text{Messwert} = \text{Tatsächlicher Wert} \pm \text{systematischer Fehler} \pm \text{statistischer Fehler}$$

oder kürzer:

$$\text{Messwert} = \text{Tatsächlicher Wert} \pm \text{Fehler}$$

Eine derartige explizite Darstellung eines Messergebnisses stellt letztlich eine Wahrscheinlichkeitsaussage dar. Üblicherweise wird damit gemeint, dass sich der tatsächliche Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 68% innerhalb des Intervalls [Messwert – Fehler; Messwert + Fehler] befindet.

2 MECHANIK

2.1 KÖRPEREIGENSCHAFTEN

Alle physikalischen Körper also räumlich begrenzte Materieformen bestehen aus Stoffen und besitzen gemeinsame physikalische Eigenschaften. Umgangssprachlich bezeichnet man physikalische beziehungsweise geometrische Körper häufiger als „Objekte“.

2.1.1 Masse

Jedes physikalische Objekt besteht aus Materie; jeder Materie-Baustein wiederum „wiegt“ etwas, sodass jedes physikalische Objekt auch stets eine gewisse Masse m als charakteristische Eigenschaft aufweist.

Einheit: Die Masse eines Objekts wird meist in Kilogramm (kg) angegeben. Weitere gebräuchliche Einheiten sind die Tonne (t) und das Gramm (g).

$$\begin{aligned}1\ t &= 1000\ kg \\1\ kg &= 1000\ g\end{aligned}$$

Die Masse m eines Objekts kann man an seiner Schwere beziehungsweise an seiner Trägheit erkennen:

- Die Eigenschaft „Schwere“ gibt an, wie sehr ein Objekt in der Lage ist, sich selbst oder einen anderen Gegenstand im Gravitationsfeld eines Planeten zu beschleunigen. Als anschauliches Beispiel kann man an die „Gewichte“ einer Kuckucksuhr denken, die beim Herabsinken in der Lage sind, die Zeiger der Uhr anzutreiben.
- Die Eigenschaft „Trägheit“ gibt an, wie sehr sich ein Objekt einer von außen einwirkenden Kraft widersetzt; man kann die „Trägheit“ eines Objekts somit als „Widerstand gegen Beschleunigung“ auffassen.

2.1.2 Volumen

Jedes Objekt besitzt ein Volumen V , also eine räumliche Ausdehnung.

Einheit: Das Volumen V eines Objekts wird meist in Kubikmeter (m^3) angegeben.

Weitere gebräuchliche Einheiten sind der Liter ($1\ l = 1\ dm^3$) und der Kubik-Zentimeter (cm^3)

$$\begin{aligned}1\ m^3 &= 10 \cdot 10 \cdot 10\ dm^3 = 1000\ l \\1\ l &= 10 \cdot 10 \cdot 10\ cm^3 = 1000\ cm^3\end{aligned}$$

Ein Liter entspricht einem Kubik-Dezimeter, also einem Würfel von $10\ cm \cdot 10\ cm \cdot 10\ cm$ Kantenlänge.

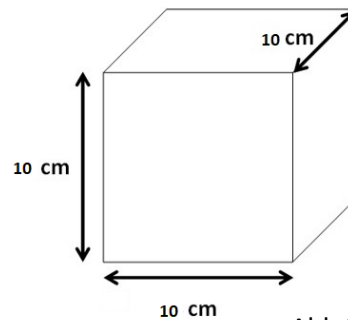


Abb.2.1 Würfel

Zur Bestimmung des Volumens eines Objekts können folgende Methoden angewendet werden:

- Das Volumen eines festen, *regelmäßig* geformten Objekts kann durch geometrische Berechnung bestimmt werden. Dazu müssen die charakteristischen Längen der jeweiligen Form gemessen werden.
- Das Volumen eines festen, *unregelmäßig* geformten Objekts kann durch Flüssigkeitsverdrängung ermittelt werden.
- Das Volumen von Flüssigkeiten kann mit Messzylindern gemessen werden.
- Gase verteilen sich gleichmäßig in dem zur Verfügung stehenden Raum. Das Volumen eines Gases kann daher bestimmt werden, indem das Volumen des vom Gas ausgefüllten Raumes gemessen wird.

2.1.3 Dichte

Die Dichte ρ eines Gegenstands gibt an, welche Masse m er bei einem bestimmten Volumen V besitzt.

Definition:

Die Dichte ρ eines Objekts ist gleich dem Verhältnis aus seiner Masse m und seinem Volumen V : $\rho = \frac{m}{V}$

Einheit: Verwendet man Standard-Einheiten, so ergibt sich als Einheit für die Dichte Kilogramm je Kubikmeter (kg/m^3). Eine weitere gebräuchliche Einheit ist Gramm je Kubikzentimeter (g/cm^3):

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = 100 \cdot 100 \cdot 100 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 1\,000\,000 \frac{\text{g}}{\text{m}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Folgende Dichteeinheiten können als gleichwertig verwendet werden:

$$\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} = \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = \frac{\text{t}}{\text{m}^3}$$

Experimentell kann die Dichte eines Festkörpers bestimmt werden, indem man seine Masse mithilfe einer Waage bestimmt und sein Volumen durch Eintauchen in eine Flüssigkeit ermittelt. Nach dem archimedischen Prinzip verdrängt jeder Gegenstand beim Eintauchen so viel Flüssigkeit, wie er selbst an Volumen besitzt. Teilt man den Wert der Masse durch den Wert des Volumens, erhält man die Dichte.

Stoff	Dichte in kg/m^3
Aluminium	2700
Blei	11340
Eis	900
Glas	ca. 2500

Tab.2.1a Beispiele Dichte unterschiedlicher Stoffe

Stoff	Dichte in kg/m^3
Holz	500 bis 1200
Kupfer	8900
Schaumstoff	150
Gold	19300

Tab.2.1b Beispiele Dichte unterschiedlicher Stoffe

Die Dichte einer Flüssigkeit kann mit einem Aräometer gemessen werden: Je kleiner die Dichte ist, desto weiter taucht das Aräometer in die Flüssigkeit ein. An der Skala kann die Dichte direkt abgelesen werden.

Stoff	Dichte in kg/m^3
Ethanol	790
Glycerin	1260
Leichtbenzin	700
Petroleum	810

Stoff	Dichte in kg/m^3
Quecksilber	13600
Schmieröl	900
Schwefelsäure	1836
Wasser (bei 4°C)	1000

Tab.2.1c&d Beispiele Dichte unterschiedlicher Flüssigkeiten

Die Dichte von Gasen hängt vom Druck und der Temperatur ab. Um die Dichten verschiedener Gase vergleichen zu können, werden die Werte für Druck $p = 1 \text{ bar}$ und $T = 0^\circ\text{C}$ angegeben.

Stoff (bei 0°C)	Dichte in kg/m^3
Luft	1,29
Helium	0,18
Kohlenstoffdioxid	1,98

Stoff (bei 0°C)	Dichte in kg/m^3
Methan	0,72
Wasserstoff	0,09
Xenon	5,90

Tab.2.1e&f Beispiele Dichte unterschiedlicher Gase

2.1.3.1 Durchschnittliche Dichte

Besteht ein Gegenstand aus mehr als einem Material, so setzt sich seine durchschnittliche Dichte aus den jeweiligen Massen- und Volumenanteilen zusammen:

$$m_{\text{ges}} = m_1 + m_2 + \dots$$

$$\rho_{\text{ges}} \cdot V_{\text{ges}} = \rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \dots$$

Teilt man beide Seiten der Gleichung durch V_{ges} , so erhält man für die durchschnittliche Dichte ρ_{ges} des Objekts:

$$\rho_{ges} = \frac{m_1 + m_2 + \dots}{V_{ges}} = \frac{\rho_1 \cdot V_1 + \rho_2 \cdot V_2 + \dots}{V_1 + V_2 + \dots}$$

Da die Masse von Gasen gegenüber der von Festkörpern meist vernachlässigbar klein ist, kann die obige Formel beispielsweise genutzt werden, um den „Luftanteil“ eines porösen Gegenstands zu bestimmen.

2.1.4 Aggregatzustand

Da Objekte aus chemischen Stoffen bestehen und diese im festen, flüssigen und gasförmigen Aggregatzustand auftreten können, unterscheidet man entsprechend auch zwischen Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen.

Je nach Aggregatzustand zeigen Objekte ein unterschiedliches Volumen- und Formverhalten:

- Im festen Zustand sind die Atome einer Substanz in Kristallgittern oder Makromolekülen fest an ihre Plätze gebunden und können nur Schwingungen um ihre jeweilige Position ausführen.
- Im flüssigen Zustand können sich die einzelnen Atome bzw. Moleküle innerhalb der Flüssigkeit frei bewegen. Der Austritt aus der Flüssigkeit wird jedoch durch zwischenmolekulare Kräfte stark erschwert.
- Im gasförmigen Zustand spielen zwischenmolekulare Kräfte so gut wie keine Rolle; die Atome beziehungsweise Moleküle können sich frei bewegen.

Aggregatzustände und ihre Eigenschaften

Aggregatzustand	Fest	Flüssig	Gasförmig
Typisches Beispiel	Metall	Wasser	Luft
Volumen	Bestimmt	Bestimmt	Angepasst an Gefäßvolumen
Form	Bestimmt	Bestimmt	Angepasst an Gefäßform
Abstand zwischen Teilchen	Klein	Klein	Sehr groß
Verschiebbarkeit der Teilchen	Klein	Groß	Sehr groß
Kompressibilität	Sehr gering	Sehr gering	Sehr groß

Tab. 2.2 Aggregatzustände

In welchem Aggregatzustand ein Material vorliegt, hängt vom Druck und von der Temperatur ab; im Abschnitt Phasenübergänge wird hierauf näher eingegangen.

2.2 KINEMATIK

Die Kinematik ist das Teilgebiet der Physik, in dem unterschiedliche Bewegungen, also Ortsveränderungen von Körpern gegenüber einem Bezugspunkt untersucht werden.

2.2.1 Raumkurve und Massenpunkt

Eine Bewegung entspricht einer Ortsveränderung eines Objekts *relativ* zu einem anderen, als ruhend angenommenen Objekt beziehungsweise Standpunkt – dieser entspricht normalerweise dem Ort des Beobachters.

2.2.1.1 Die Raumkurve

Je nach der Form der Bewegung (beispielsweise geradlinig, kreisförmig, innerhalb einer Ebene oder räumlich) wird zur physikalischen Beschreibung der Bewegung ein geeignetes Koordinatensystem („Bezugssystem“) gewählt. Im Ursprung des Koordinatensystems steht meistens der als ruhend angenommene Beobachter. Das beobachtete Objekt durchläuft bezüglich dieses Zentrums eine ein-, zwei- oder dreidimensionale Raumkurve („Trajektorie“).

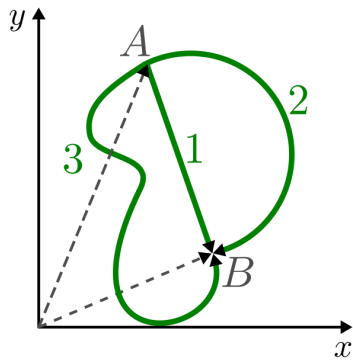


Abb. 2.2 Mögliche Raumkurven einer zweidimensionalen Bewegung von A nach B aus der Vogelperspektive: geradlinig (1), kreisförmig (2) und krummlinig (3).

2.2.1.2 Der Massenpunkt

In vielen Fällen ist die physikalische Beschreibung einer Bewegung einfacher, wenn man sich das beobachtete Objekt als einen einzelnen Punkt im Koordinatensystem vorstellt. Dieser „Massenpunkt“ wird dabei so behandelt, als ob er die gesamte Masse des Objekts besäße; meist wird daher der Schwerpunkt des Objekts als Massenpunkt gewählt.

Neben der Verschiebung des Schwerpunkts („Translation“) kann auch eine Drehung („Rotation“) des Objekts um dieses Zentrum stattfinden. Tritt eine Kombination beider Bewegungsformen auf, so können diese unabhängig voneinander betrachtet und die jeweiligen Effekte addiert werden; man spricht in diesem Fall von einer „Überlagerung“ von Bewegungsvorgängen. In den folgenden Abschnitten werden die zur Beschreibung von allgemeinen Bewegungsvorgängen nötigen Formeln und Überlegungen vorgestellt, wobei zunächst von einfachen Modellen ausgegangen wird und diese dann schrittweise erweitert werden.

2.2.2 Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit

Im folgenden Abschnitt werden zunächst anhand von eindimensionalen Bewegungen einige grundlegende Konzepte zur mathematischen Beschreibung von Bewegungsvorgängen vorgestellt; diese werden dann auf zwei- beziehungsweise dreidimensionale Vorgänge übertragen.

2.2.2.1 Eindimensionale Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit

Eine geradlinige Bewegung stellt die einfachste Variante eines Bewegungsvorgangs dar: Es genügt bereits eine einzelne Raumachse als Koordinatensystem. Hat man (willkürlich, aber verbindlich) den Nullpunkt sowie die Richtung der Koordinatenachse einmalig festgelegt, so genügt folglich eine einzige Längenangabe s , um den Ort des Objekts bezüglich des Koordinatenursprungs exakt angeben zu können:

- Hat der Ort s einen positiven Wert, so befindet sich das Objekt um den entsprechenden Wert entlang der als positiv gewählten Raumrichtung vom Koordinatenursprung entfernt.
- Hat der Ort s einen negativen Wert, so befindet sich das Objekt um den entsprechenden Wert entgegen der als positiv gewählten Raumrichtung vom Koordinatenursprung entfernt.

Bei Bewegungsvorgängen ändert sich der Ort s des Objekts im zeitlichen Verlauf; man schreibt daher häufig auch explizit $s(t)$, um die Abhängigkeit des Orts s von der Zeit t auszudrücken.

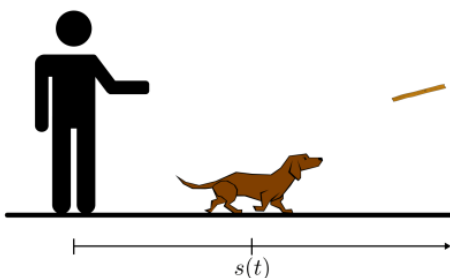


Abb. 2.3 Die Bewegung eines Hundes, der einem Stöckchen naheht oder es zurückbringt, kann in guter Näherung als geradlinige Bewegung aufgefasst werden.

Die Δ -Schreibweise

Das Symbol s wird nicht nur für Ortsangaben verwendet, sondern auch um zurückgelegte Wegstrecken anzugeben. In diesem Fall wählt man allerdings bevorzugt die Schreibweise Δs , um Verwechslungen zu vermeiden. Das Δ -Symbol (ein griechisches „Delta“) steht dabei für „Differenz“ – gemeint ist damit, inwiefern sich der Wert von s_{end} am Ende des Bewegungsvorgangs von dem Wert s_{start} zu Beginn des

Bewegungsvorgangs unterscheidet:

$$\begin{aligned}\Delta s &= s_{\text{end}} - s_{\text{start}} \\ &= s - s_0\end{aligned}$$

Dass bei dieser Konvention der Startwert (meist mit s_0 bezeichnet) vom Endwert (meist mit s bezeichnet) abgezogen wird, hat folgenden Grund:

- Ist der Anfangswert s_0 kleiner als der Endwert s , so verläuft die Bewegung entlang der als positiv definierten Bewegungsrichtung.
- Ist umgekehrt der Endwert s kleiner als der Anfangswert s_0 , so verläuft die Bewegung in Richtung der negativen Koordinatenachse.

Gilt für den Startwert $s_0 = 0$, so beginnt die Bewegung am Nullpunkt des Koordinatensystems, und für den Zeitpunkt t gilt $\Delta s = s - s_0 = s$. In diesem Fall stimmt somit zu einem Zeitpunkt t der Ort $s(t)$ mit der zurückgelegten Wegstrecke Δs überein, und das Δ kann weggelassen werden;

im Allgemeinen ist dies jedoch nicht der Fall. Die gleiche Δ -Schreibweise wird auch für einzelne Zeitabschnitte verwendet; auch hier gilt beispielsweise $\Delta t = t_{\text{end}} - t_{\text{start}}$. Diese Schreibweise hat den Vorteil, dass man einen Vorgang in verschiedene Zeitabschnitte $\Delta t_1 = t_1 - t_0$, $\Delta t_2 = t_2 - t_1$ usw. unterteilen kann, sofern in diesen beispielsweise unterschiedliche Geschwindigkeiten oder Bewegungsrichtungen vorliegen; eine komplexe Aufgabenstellung kann so in mehrere einfacher zu lösende Teile zerlegt werden.

2.2.2.2 Geschwindigkeit

Bewegt sich ein Objekt mit konstanter Geschwindigkeit, so legt es in gleichen Zeitabschnitten die jeweils gleiche Wegstrecke zurück.

Definition:

Die Geschwindigkeit v eines sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegendes Objekts ist gleich dem Verhältnis aus der zurückgelegten Wegstrecke Δs und der dazu benötigten Zeit Δt : $v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$

Einheit:

Die Geschwindigkeit wird meist in Kilometer je Stunde (km/h) oder Meter je Sekunde (m/s) angegeben.

Beispiele:

- Licht legt in einer Sekunde 300 000 km zurück. Die Lichtgeschwindigkeit beträgt somit 300 000 000 m/s.
- Eine Schnecke legt in einer Sekunde etwa 0,8 mm zurück. „Schneckentempo“ entspricht somit ungefähr 0,0008 m/s.

Umrechnung von km/h in m/s

Sowohl km/h als auch m/s sind als Geschwindigkeitseinheiten üblich. Um sie ineinander umzurechnen, kann man folgende Zusammenhänge nutzen: $1 \text{ km} = 1000 \text{ m}$

$$1 \text{ h} = 60 \text{ min} = 60 \cdot 60 \text{ s} = 3600 \text{ s}$$

Daraus folgt:
$$1 \frac{\text{km}}{\text{h}} = \frac{1 \text{ km}}{1 \text{ h}} = \frac{1000 \text{ m}}{3600 \text{ s}} = \frac{1}{3,6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

und umgekehrt:
$$1 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 3,6 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Ort und zurückgelegte Wegstrecke

Der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeit kann allgemein in Form eines $v(t)$ -Diagramms dargestellt werden. Hierbei wird der Betrag der Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit wie der Graph einer mathematischen Funktion in ein zweidimensionales Koordinatensystem eingezeichnet.

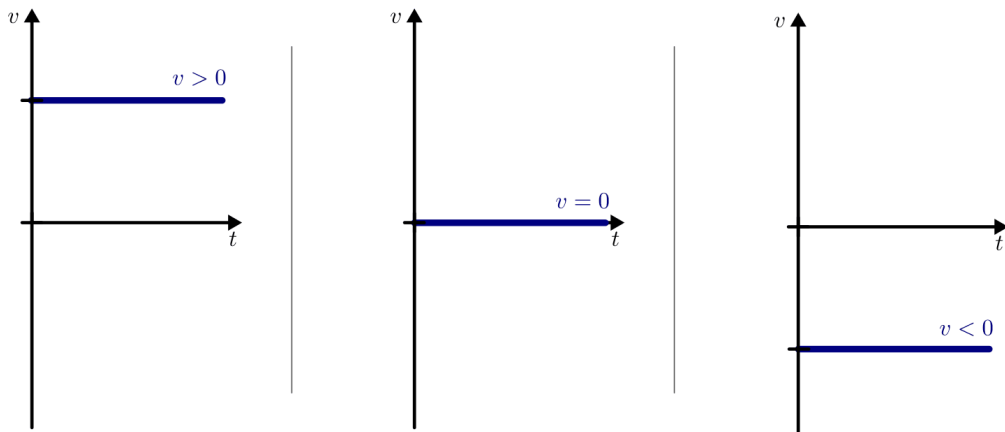


Abb.2.4 $v(t)$ Diagramme einer konstanten Geschwindigkeit

Der Wert der Geschwindigkeit kann größer, gleich oder kleiner null sein.

Im Fall einer zeitlich konstanten Geschwindigkeit entspricht der Graph der Geschwindigkeit einer waagrechten Geraden. Der Wert der $v(t)$ -Geraden hat folgende Bedeutung:

- Umso größer der Wert der Geschwindigkeit ist, desto weiter ist die $v(t)$ -Gerade von der horizontalen t -Achse (entspricht dem Wert $v = 0$) entfernt.
- „Ruhe“ ist der Spezialfall einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit: $v = 0$
- Bewegt sich ein Objekt in die entgegengesetzt zur ursprünglich als „positiv“ festgelegten Richtung, so erhält seine Geschwindigkeit ein negatives Vorzeichen.

Kennt man die (konstante) Geschwindigkeit v eines Objekts und weiß, wie lange es mit dieser Geschwindigkeit unterwegs ist, so kennt man allerdings noch nicht den genauen Ort, an dem sich das Objekt zum Zeitpunkt t befindet. Man weiß nämlich nicht, von welchem Startpunkt die Bewegung begonnen hat. Um den Ort $s(t)$ des Objekts in Abhängigkeit von der Zeit angeben zu können, muss also die Startposition s_0 mitberücksichtigt werden:

$$s(t) = v_0 \cdot \Delta t + s_0$$

Der zeitliche Verlauf der zurückgelegten Wegstrecke kann ebenfalls graphisch in Form eines sogenannten Weg-Zeit-Diagramms („ $s(t)$ -Diagramm“) dargestellt werden. Aus obiger Gleichung folgt, dass sich die Wegstrecke Δs bei konstanter Geschwindigkeit v in gleichen Zeitabschnitten Δt kontinuierlich um $\Delta s = v \cdot \Delta t$ ändert – die entsprechende Weg-Zeit-Linie entspricht also einer Geraden.

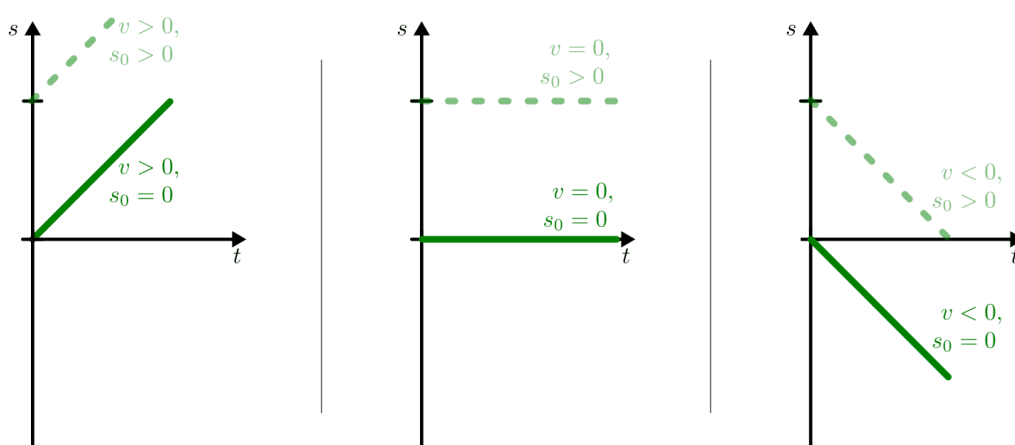


Abb.2.5 $s(t)$ -Diagramme einer konstanten Geschwindigkeit

Die Steigung der Weg-Zeit-Geraden kann größer, gleich oder kleiner null sein.

Die Steigung der Geraden in einem $s(t)$ -Diagramm hat folgende Bedeutung:

- Umso größer die (konstante) Geschwindigkeit ist, desto steiler ist der Verlauf der Geraden im $s(t)$ -Diagramm.
- Ist die Geschwindigkeit eines Objekts konstant gleich null, so bleibt seine Entfernung vom Beobachter unverändert. Der zeitliche Verlauf des zurückgelegten Weges entspricht einer waagrechteten Geraden.
- Das Vorzeichen der Geschwindigkeit gibt an, ob die Gerade im $s(t)$ -Diagramm steigt oder fällt. Eine negative Steigung bedeutet hierbei, dass sich das beobachtete Objekt entgegen der ursprünglich als „positiv“ festgelegten Raumrichtung bewegt – egal, ob die Bewegung vom Beobachter oder von einer um die Strecke s_0 entfernten Stelle aus beginnt.

Der Wert, den die Ortsfunktion $s(t) = v \cdot t$ zu einer bestimmten Zeit t annimmt, entspricht jeweils der Fläche zwischen der entsprechenden Geschwindigkeits-Zeit-Linie und der t -Achse; ggf. muss das Vorzeichen berücksichtigt werden und die anfängliche Entfernung s_0 zum Ergebnis hinzuaddiert werden.

Die Durchschnittsgeschwindigkeit

Auch wenn sich die Geschwindigkeit mit der Zeit beziehungsweise entlang einer Wegstrecke mehrfach ändert, so kann man trotzdem für den gesamten Bewegungsvorgang eine durchschnittliche Geschwindigkeit angeben.

Definition:

Die Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ eines Objekts ist gleich dem Verhältnis aus der Wegstrecke Δs_{ges} , die er insgesamt zurücklegt, und der dazu benötigten Zeit Δt_{ges} : $\bar{v} = \frac{\Delta s_{ges}}{\Delta t_{ges}}$

Beispiel:

- Ein Radrennfahrer legt eine Etappe von 130 km in einer Zeit von $4,0 \text{ h}$ zurück. Seine Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt somit:

$$\bar{v} = \frac{\Delta s_{ges}}{\Delta t_{ges}} = \frac{130 \text{ km}}{4 \text{ h}} = 32,5 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

Man sieht, dass auch bei diesem Vorgang das Modell der geradlinigen Bewegung verwendet werden kann, auch wenn sich der Radfahrer sehr wahrscheinlich nicht geradlinig fortbewegt. Bei vielerlei Fragestellungen ist allerdings nicht der konkrete Streckenverlauf von Bedeutung, sondern nur die Länge der Strecke. Kennt man zusätzlich die durchschnittliche Geschwindigkeit, so weiß man, wie lange der Bewegungsvorgang dauern wird; derartige Abschätzungen sind beispielsweise bei Wanderungen oder Fahrrad-Touren durchaus hilfreich.

Die Relativgeschwindigkeit

Bewegen sich zwei Objekte von einem gleichen Ausgangspunkt aus mit verschiedenen Geschwindigkeiten v_1 und v_2 in die gleiche Richtung, so entspricht ihre gegenseitige Entfernung der Differenz der zurückgelegten Wegstrecken; die Objekte entfernen sich also mit zunehmender Zeit voneinander. Die wachsende Entfernung kann durch die sogenannte Relativgeschwindigkeit v_{rel} ausgedrückt werden:

$$v_{rel} = v_2 - v_1$$

Diese Gleichung gibt die Relativgeschwindigkeit des zweiten Objekts relativ zum ersten Objekt an; umgekehrt gibt $v_1 - v_2$ die Geschwindigkeit des ersten Objekts relativ zum zweiten an. Beide Relativgeschwindigkeiten haben den gleichen Betrag, aber ein unterschiedliches Vorzeichen, da sie in entgegengesetzte Richtungen zeigen.

Das Rechnen mit Relativgeschwindigkeiten ist beispielsweise hilfreich, um die für Überholvorgänge mit konstanten Geschwindigkeiten notwendigen Zeiten beziehungsweise Wegstrecken zu berechnen. Zudem können, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, mittels Relativgeschwindigkeiten auch Entfernungen zwischen Objekten berechnet werden, die sich mit konstanten Geschwindigkeiten in unterschiedlichen Raumrichtungen bewegen.

2.2.2.3 Mehrdimensionale Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit

Die im letzten Abschnitt vorgestellten Gesetzmäßigkeiten für eindimensionale Bewegungen lassen sich auch ohne großen Aufwand auf zweidimensionale Bewegungen übertragen. Ein Grundprinzip hierbei ist, dass jeder zweidimensionale Bewegungsvorgang in eine x - und eine y -Komponente aufgeteilt werden kann. Die Ausrichtung des Koordinatensystems kann wiederum einmalig frei gewählt werden, ist für den Rest der Rechnung dann allerdings verbindlich.

Ein zweites Grundprinzip ist, dass einzelne Bewegungsvorgänge, auch wenn sie entlang unterschiedlicher Raumrichtungen stattfinden, jeweils getrennt voneinander betrachtet werden können.

2.2.2.4 Addition von Teilgeschwindigkeiten

Verlaufen zwei Bewegungen geradlinig entlang einer gemeinsamen Linie, so genügt eine einfache Addition der beiden Geschwindigkeitsbeträge v_1 und v_2 , um die resultierende Geschwindigkeit zu erhalten.

Beispiele:

- Eine Person bewegt sich mit einer Geschwindigkeit v_1 auf einem Laufband entgegen der Laufbandgeschwindigkeit v_2 . Sind beide Geschwindigkeiten gleich groß, so bleibt die Person an der gleichen Stelle – die resultierende Geschwindigkeit v ist gleich null. Sind beide Geschwindigkeiten unterschiedlich groß, so bewegt sich die Person in Richtung der größeren Geschwindigkeit.
- Stimmt die Bewegungsrichtung der Person mit der Richtung der Laufbandgeschwindigkeit überein, so addieren sich die Beträge beider Geschwindigkeiten. Die Geschwindigkeit v der Person (relativ zum Erdboden) ist somit gleich $v_1 + v_2$.

Die Addition der auftretenden Geschwindigkeiten ist auch möglich, wenn diese in einem beliebigen Winkel zueinanderstehen. Zeichnerisch stellt man dazu die beiden Geschwindigkeiten $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ als Pfeile dar, deren Richtungen mit denen der beiden Geschwindigkeiten übereinstimmen und deren Längen die Beträge beider Geschwindigkeiten abbilden. Nach den Regeln der Vektor-Addition lässt sich damit aus beiden Geschwindigkeitspfeilen die Richtung und der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit $\vec{v}$ graphisch ermitteln. Betrag und Richtung der resultierenden Geschwindigkeit $\vec{v}$ können auch rechnerisch bestimmt werden.

Für eine zweidimensionale Bewegung (in einer Ebene) gilt: $\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 = \begin{pmatrix} v_{1x} \\ v_{1y} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{2x} \\ v_{2y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{1x} + v_{2x} \\ v_{1y} + v_{2y} \end{pmatrix}$

Die resultierende Geschwindigkeit $\vec{v}$ entspricht somit einer komponentenweisen Addition der beiden Geschwindigkeitsvektoren. Für den Betrag der resultierenden Geschwindigkeit $v = |\vec{v}|$ gilt:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$$

Aus dem Verhältnis der y - zur x -Komponente lässt sich der Winkel der resultierenden Geschwindigkeit bestimmen: $\tan \varphi = \frac{v_y}{v_x} \Leftrightarrow \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right)$

Beispiel:

- Ein Boot überquert mit einer Geschwindigkeit $v_1 = 3 \frac{m}{s}$ senkrecht einen Fluss, der mit einer Geschwindigkeit $v_2 = 1 \frac{m}{s}$ strömt. Legt man ein Koordinatensystem so an, dass die y -Achse in Richtung der Geschwindigkeit des Bootes und die x -Achse in Richtung der Flussströmung zeigt, so folgt für die resultierende Geschwindigkeit $\vec{v}$:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 3 \end{pmatrix}$$

Der Betrag der resultierenden Geschwindigkeit ist hierbei:

$$v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{\left(1 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(3 \frac{m}{s}\right)^2} = \sqrt{10 \frac{m^2}{s^2}} \approx 3,16 \frac{m}{s}$$

Der Winkel gegenüber der x -Achse (Richtung des Flusses) beträgt:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_y}{v_x} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{3}{1} \right) \approx 71,6^\circ$$

Das Boot driftet somit um einen Winkel von rund $90^\circ - 71,6^\circ = 18,40^\circ$ ab.

Die in die jeweiligen Richtungen zurückgelegten Wegstrecken Δs_x und Δs_y lassen sich wiederum komponentenweise über die Formel $\Delta s = v \cdot \Delta t$ berechnen. Eine weitere Verallgemeinerung auf dreidimensionale Bewegungsvorgänge erfolgt nach den gleichen Prinzipien, indem man zusätzlich eine z-Komponente betrachtet und folglich mit drei- anstelle mit zweidimensionalen Vektoren rechnet.

2.2.3 Bewegungen mit konstanter Beschleunigung

Das Modell einer Bewegung mit konstanter Beschleunigung stellt eine Verallgemeinerung einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit dar. Hat ein sich bewegendes Objekt insbesondere eine konstante Beschleunigung mit einem Wert von null, so bewegt es sich mit konstanter Geschwindigkeit fort; eine Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit kann als Spezialfall einer beschleunigten Bewegung angesehen werden. Durch das Einbeziehen von Beschleunigungen wird berücksichtigt, dass keine abrupten, sondern stets nur kontinuierliche Geschwindigkeitsänderungen möglich sind. Die allgemeinen Zusammenhänge zwischen Geschwindigkeitsänderung, Beschleunigung und Zeit beziehungsweise Wegstrecke werden im folgenden Abschnitt zunächst für geradlinige, dann auch für zusammengesetzte Bewegungsvorgänge näher beschrieben.

2.2.3.1 Eindimensionale Bewegungen mit konstanter Beschleunigung

Bei einer Bewegung mit konstanter Beschleunigung nimmt die Geschwindigkeit eines Objekts in gleichen Zeitabschnitten um den jeweils gleichen Betrag zu beziehungsweise ab.

Definition:

Die Beschleunigung a eines sich geradlinig bewegendes Objekts ist gleich dem Verhältnis aus der Geschwindigkeitsänderung Δv und der dazu benötigten Zeit Δt : $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$

Einheit:

Die Beschleunigung wird in Meter je Quadratsekunde (m/s^2) angegeben.

- Beispiele:*
- $1 m/s^2$ ist die Beschleunigung eines Objekts, dessen Geschwindigkeit sich in 1s um $1 m/s$ ändert.
 - Die Beschleunigung, die ein Objekt im freien Fall auf der Erde erfährt, „Erdbeschleunigung“, beträgt rund $9,81 m/s^2$. Häufig wird diese Beschleunigung, die bei vielerlei physikalischen Vorgängen eine Rolle spielt, mit dem Buchstaben $k = 9,81 m/s^2$ bezeichnet und Ortsfaktor genannt.

Bei längeren Bewegungsvorgängen können aufeinanderfolgende Zeitabschnitte unterschiedliche Beschleunigungen aufweisen. Beispielsweise beschleunigt ein Sprinter zunächst gleichmäßig, bis er seine Höchstgeschwindigkeit erreicht hat, hält diese Geschwindigkeit (möglichst) konstant bis zum Ziel und bremst nach der Ziellinie wieder gleichmäßig ab. Derartige Bewegungsvorgänge lassen sich oftmals abschnittsweise durch jeweils konstante (Durchschnitts-)Beschleunigungen beschreiben.

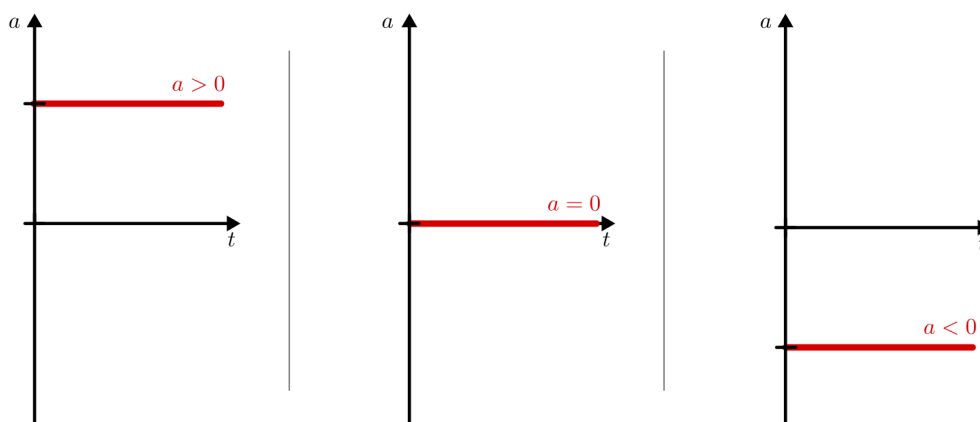


Abb. 2.6 Beschleunigung-Zeit-Diagramme einer konstanten Beschleunigung

Der Wert der Beschleunigung kann größer, gleich oder kleiner null sein.

2.2.3.2 Beschleunigung und Geschwindigkeit

Aus der Gleichung folgt, dass sich die Geschwindigkeit bei einer konstanten Beschleunigung a in gleichen Zeitabschnitten Δt kontinuierlich um den Wert $\Delta v = a \cdot \Delta t$ verändert.

Kennt man die (konstante) Beschleunigung a eines Objekts und weiß, über welchen Zeitabschnitt Δt die Beschleunigung anhält, so kann man im Allgemeinen jedoch nicht angeben, wie groß die Geschwindigkeit v des Objekts zum Zeitpunkt t ist. Hierzu muss man zusätzlich wissen, wie groß die anfängliche Geschwindigkeit v_0 des Objekts war. Für den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeit $v(t)$ gilt also:

$$v(t) = a \cdot \Delta t + v_0$$

Zeichnet man ein $v(t)$ -Diagramm einer solchen Bewegung, so entspricht der Graph der Geschwindigkeit einer Geraden.

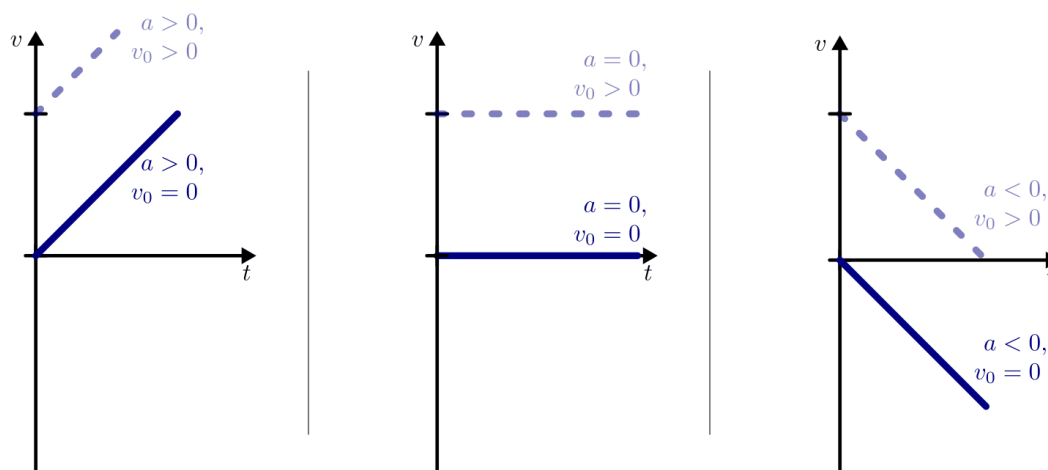


Abb. 2.7 Geschwindigkeit-Zeit-Diagramme einer konstanten Beschleunigung

Die Steigung der Geschwindigkeit-Zeit-Geraden kann größer, gleich oder kleiner null sein.

Die Steigung einer $v(t)$ -Geraden hat folgende Bedeutung:

- Umso steiler die Geschwindigkeit-Zeit-Gerade ist, desto größer ist die Beschleunigung.
- Ist die Beschleunigung des beobachteten Objekts gleich null, so entspricht die Geschwindigkeit-Zeit-Linie einer waagrechten Geraden. Dies gilt gleichermaßen für ruhende und sich mit konstanter Geschwindigkeit v_0 bewegende Objekte.
- Eine Beschleunigung entgegen der ursprünglich als „positiv“ festgelegten Raumrichtung erhält ein negatives Vorzeichen – egal, ob das beobachtete Objekt ruht oder sich mit einer konstanten Geschwindigkeit v_0 fortbewegt. Dies hat – je nach Wert der Anfangsgeschwindigkeit v_0 – eine Beschleunigung „in Gegenrichtung“ beziehungsweise ein kontinuierliches Abbremsen zur Folge.

Aus einem $v(t)$ -Diagramm kann also die Beschleunigung zu einem Zeitpunkt t ermittelt werden, indem man an dieser Stelle nicht den Wert, sondern die *Steigung* der Diagramm-Linie betrachtet. Beispielsweise gilt für einen Bremsvorgang $v > 0$, während für die Geschwindigkeitsänderung (und somit für die Steigung des Graphen) $\Delta v < 0$ gilt.

2.2.3.3 Beschleunigung und Wegstrecke

Zeichnet man in ein $s(t)$ -Diagramm die zurückgelegte Wegstrecke in Abhängigkeit von der Zeit ein, so hat der Graph bei einer beschleunigten Bewegung ($a \neq 0$) einen parabelförmigen Verlauf. Die konkrete Form der Parabel hängt von der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der anfänglichen Entfernung s_0 des Objekts vom Beobachter (Koordinatenursprung) ab.

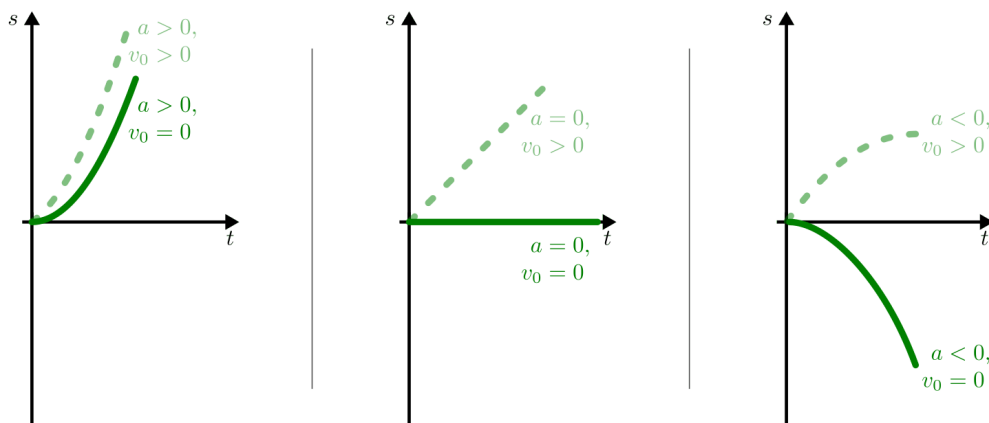


Abb. 2.8 Weg-Zeit-Diagramme einer konstanten Beschleunigung

Für $a > 0$ ist die Weg-Zeit-Parabel nach oben, für $a < 0$ nach unten geöffnet.

Für $a = 0$ entspricht die Weg-Zeit-Funktion einer Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit.

2.2.3.4 Wegstrecken in $v(t)$ -Diagrammen ablesen

Zunächst soll angenommen werden, dass zum Zeitpunkt $t_0 = 0$ die Bewegung am Koordinatenursprung s_0 mit einer Startgeschwindigkeit von $v_0 = 0$ beginnt. In diesem Fall gilt:

$$\Delta s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$$

Diesen Zusammenhang kann man sich anschaulich erklären, indem man bedenkt, dass eine zurückgelegte Wegstrecke letztlich als Produkt aus Geschwindigkeit und Zeit dargestellt wird. Stellt man sich den Zeitabschnitt Δt , in dem die Beschleunigung stattfindet, nochmal in viele kleine Zeitabschnitte Δt_1^* , Δt_2^* , Δt_3^* usw. unterteilt vor (wie bei einer Betrachtung des Vorgangs mit Stroboskop-Licht), so kann man in diesen kurzen Momenten die jeweiligen Geschwindigkeiten v_1^* , v_2^* , v_3^* usw. jeweils in guter Näherung als konstant annehmen.

Bei einer solchen Aufteilung in viele kleine Zeitschritte mit jeweils konstanten Geschwindigkeiten lassen sich die in den einzelnen Zeitschritten zurückgelegten Wegstrecken mittels der Formel $\Delta s = v \cdot \Delta t$ berechnen; diese können dann zum Gesamtergebnis aufsummiert werden. In einem $v(t)$ -Diagramm entsprechen die so berechneten einzelnen Wegstrecken den Rechteckflächen zwischen der (stufenförmigen) Geschwindigkeit und der t -Achse.

Ist die Beschleunigung konstant, so nimmt die Geschwindigkeit v des sich bewegenden Objekts linear mit der Zeit zu. Der Mittelwert der einzelnen Geschwindigkeiten während des Beschleunigungsvorgangs entspricht wiederum der Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ des Objekts:

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2}$$

Mit v_0 wird hierbei wiederum die Geschwindigkeit zu Beginn der Beschleunigung, mit v die (End-) Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t bezeichnet. Ist insbesondere die Startgeschwindigkeit $v_0 = 0$, so ist $\bar{v} = \frac{1}{2} \cdot v$, also gleich der Hälfte der Endgeschwindigkeit. In diesem Fall gilt somit für die während des Beschleunigungsvorgangs zurückgelegte Wegstrecke:

$$\begin{aligned} \Delta s &= \bar{v} \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot v \cdot \Delta t \\ &= \frac{1}{2} \cdot (a \cdot \Delta t) \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2 \end{aligned}$$

Der Hintergedanke bei dieser Gleichung ist, dass während des Beschleunigungsvorgangs – über alle kleinen Zeitschritte gemittelt – die durchschnittliche „Höhe“ der Rechtecke gleich der Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ ist; die Gesamtfläche zwischen der $v(t)$ -Linie und der t -Achse ist also identisch mit der Fläche, die man erhält, wenn man die Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ mit Δt multipliziert.

Die gleiche Überlegung trifft ebenso zu, wenn die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 \neq 0$ ist. In diesem Fall gilt für die Durchschnittsgeschwindigkeit:

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v}{2} = v_0 + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t$$

Die Durchschnittsgeschwindigkeit ist also allgemein gleich dem Mittelwert zwischen der Start- und Endgeschwindigkeit; bei einer konstanten Beschleunigung a wird sie zur Hälfte der Beschleunigungszeit Δt , also zum Zeitpunkt $t_{start} + \frac{1}{2} \cdot \Delta t$, erreicht. Setzt man wiederum diesen Term für $\bar{v}$ in die Bewegungsgleichung ein, so erhält man:

$$\Delta s = \bar{v} \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2 + v_0 \cdot \Delta t$$

Diese Gleichung gibt allgemein den Zusammenhang zwischen der zurückgelegten Wegstrecke Δs , der Beschleunigung a , der Anfangsgeschwindigkeit v_0 und der Zeitdauer Δt an.

2.2.3.5 Die allgemeine Bewegungsgleichung

Die obige Gleichung ist tatsächlich eine Verallgemeinerung der bislang betrachteten Fälle:

Ist die Beschleunigung $a = 0$, so erhält man die Ortsgleichung für Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit:

$$a = 0 \Rightarrow \Delta s = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot 0 \cdot \Delta t^2}_{=0} + v_0 \cdot \Delta t = v_0 \cdot \Delta t$$

- Ist die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$, so erhält man die Ortsgleichung für Bewegungen mit konstanter Beschleunigung ohne Anfangsgeschwindigkeit:

$$v_0 = 0 \Rightarrow \Delta s = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2 + \underbrace{0 \cdot \Delta t}_{=0} = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2$$

Man kann sich eine beschleunigte Bewegung mit Anfangsgeschwindigkeit also als zwei Prozesse vorstellen, die gleichzeitig ablaufen, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen (einmal die Bewegung mit der konstanten Anfangsgeschwindigkeit und einmal die Bewegung mit der konstanten Beschleunigung ohne Anfangsgeschwindigkeit). Beide Teilprozesse können somit getrennt voneinander betrachtet und ihre Effekte addiert werden.

Den konkreten Ort $s(t)$ eines Objekts erhält man schließlich, indem man bei der Bewegung dessen anfängliche Entfernung vom Koordinatenursprung s_0 mitberücksichtigt:

$$s(t) = \bar{v} \cdot \Delta t + s_0 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot \Delta t^2 + v_0 \cdot \Delta t + s_0$$

Diese Formel genügt in Kombination mit der Formel $v(t) = a \cdot \Delta t + v_0$ bereits, um den Ort sowie die Geschwindigkeit eines Objekts zu jedem beliebigen Zeitpunkt angeben zu können, sofern die Startwerte bekannt sind und die Beschleunigung konstant ist.

2.2.3.6 Die Bremsformel

Insbesondere für Bremsvorgänge gibt es eine weitere nützliche Formel, die sich aus der obigen Gleichung herleiten lässt. Mit einer Anfangsgeschwindigkeit v_0 gilt für den Zusammenhang zwischen v , a und Δs :

$$v^2 - v_0^2 = 2 \cdot a \cdot \Delta s$$

$$\Delta s = \frac{v_0^2}{2 \cdot |a|}$$

Diese Gleichung wird häufig „Bremsformel“ genannt; im Fall $v = 0$ lässt sich damit der Bremsweg

bei bekannter Anfangsgeschwindigkeit und Beschleunigung unmittelbar berechnen. Die „Bremsformel“ lässt sich allerdings auch allgemein auf Bewegungen mit konstanter Beschleunigung anwenden und erleichtert insbesondere dann das Rechnen, wenn in der Aufgabenstellung keine Zeitangabe enthalten ist.

Reaktionszeit und Anhalteweg

Um die gesamte Strecke zu berechnen, die ein Fahrzeug zum Anhalten benötigt, muss neben dem Bremsweg auch die Wegstrecke berücksichtigt werden, die der Fahrer während der Reaktionszeit zurücklegt. Es gilt also:

$$\Delta s_{Anhalte} = \Delta s_{Brems} + \Delta s_{Reaktion}$$

Während der Reaktionszeit, die oftmals vereinfacht als „Schrecksekunde“ angenommen wird, bewegt sich das Fahrzeug mit der konstanten Geschwindigkeit v_0 weiter. Es ergibt sich somit mit $t_{\text{Reaktion}} \triangleq 1\text{ s}$:

$$\Delta s_{\text{Anhalte}} = \frac{v_0^2}{2 \cdot |a|} + v_0 \cdot t_{\text{Reaktion}}$$

Der Bremsweg (und somit auch der Anhalteweg) nimmt bei der gleichen Bremsbeschleunigung quadratisch mit der Geschwindigkeit zu; aus diesem Grund sind in Ortschaften sowie an unübersichtlichen Stellen Geschwindigkeitsbegrenzungen für die Verkehrssicherheit wichtig.

2.2.3.7 Beschleunigungen und Kräfte

Beschleunigungen treten allgemein dann auf, wenn eine resultierende Kraft F_{res} auf einen Gegenstand einwirkt; für die Beschleunigung gilt dabei $a = \frac{F}{m}$, wobei m für die Masse des Gegenstands steht. Kennt man also die auf einen Gegenstand einwirkenden Kräfte, so kann mittels der obigen Formeln auch dessen Bewegung vorhergesagt werden; umgekehrt können aus berechneten oder gemessenen Beschleunigungswerten auch die entsprechenden Kräfte abgeschätzt werden.

2.2.4 Wurfbewegungen

Im folgenden Abschnitt werden zunächst eindimensionale, später auch zweidimensionale Wurfbewegungen näher beschrieben. Als Vereinfachung soll dabei der Luftwiderstand vernachlässigt werden.

Alle Wurfbewegungen haben die Gemeinsamkeit, dass die geworfenen Objekte eine Beschleunigung von $k = 9,81 \text{ m/s}^2$ ("Erdbeschleunigung") in Richtung des Erdmittelpunkts erfahren. Die einzelnen Wurfbewegungen unterscheiden sich also lediglich hinsichtlich ihrer Startbedingungen.

2.2.4.1 Freier Fall

Als „freien Fall“ bezeichnet man einen Bewegungsvorgang, bei dem ein Objekt mit einer Anfangsgeschwindigkeit von $v_0 = 0$ in einer Höhe $h = s_0$ startet und konstant mit der Erdbeschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ beschleunigt wird; der Luftwiderstand wird dabei vernachlässigt.

Durch die konstante Beschleunigung wird das fallende Objekt mit der Zeit kontinuierlich beschleunigt. Beginnt der Vorgang zum Zeitpunkt $t_0 = 0$, so gilt für die Geschwindigkeit v des Objekts in Abhängigkeit von der Zeit: $v(t) = -g \cdot t$

Für die zurückgelegte Wegstrecke Δs beziehungsweise den Ort s gilt entsprechend mit $v_0 = 0$:

$$\Delta s = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2$$

$$s(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + s_0$$

Beim Aufprall auf dem Boden gilt $a(t) = 0$; daraus lassen sich die Falldauer beziehungsweise die Geschwindigkeit v_{max} beim Aufprall berechnen:

$$s(t) = 0 \Leftrightarrow \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{\text{max}}^2 = s_0$$

$$t_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \cdot s_0}{g}}$$

$$v_{\text{max}} = -g \cdot t_{\text{max}} = -g \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot s_0}{g}} = -\sqrt{2 \cdot s_0 \cdot g}$$

- Gilt für die konstante Beschleunigung $a < 0$, so ist die (Halb-)Parabel nach unten hin geöffnet.
- Ohne Anfangsgeschwindigkeit ($v_0 = 0$) findet eine beschleunigte Bewegung in negative s -Richtung statt.

- Mit einer Anfangsgeschwindigkeit $v_0 > 0$ ergibt sich ein kontinuierliches Abbremsen, wobei der Scheitel der Halbparabel den Bremsweg angibt:

$$s(t) = v_0 \cdot t - \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Bleibt nach einem vollständigen Abbremsen – wie bei einem senkrechten Wurf nach oben – die Beschleunigung $a < 0$ weiterhin bestehen, so findet anschließend eine beschleunigte Bewegung in negativer s -Richtung statt. Kann der Luftwiderstand vernachlässigt werden, so spricht man bei diesem Vorgang von einem „freien Fall“ mit $|g| = 9,81 \text{ m/s}^2$ und $v_0 = 0$.

2.2.4.2 Senkrechter Wurf nach oben

Wird ein Objekt senkrecht nach oben geworfen, so startet es in der z -Richtung mit einer positiven Anfangsgeschwindigkeit v_0 ; gleichzeitig wird es durch die Erdbeschleunigung in die entgegengesetzte Richtung beschleunigt. Beginnt der Vorgang wiederum zum Zeitpunkt $t_0 = 0$, so gilt für die Geschwindigkeit v des Objekts in Abhängigkeit von der Zeit:

$$v(t) = -g \cdot t + v_0$$

Als Annahme soll zunächst gelten, dass das Objekt in einer Höhe von $a_0 = 0$ abgeworfen wird. Dann gilt für den Ort s in Abhängigkeit von der Zeit:

$$s(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + v_0 \cdot t$$

Aus den beiden obigen Gleichungen kann man die maximale Steighöhe $s_{\max}$ berechnen. Die zum Erreichen dieser Höhe benötigte Zeit $t_{\max}$ lässt sich anhand der ersten Gleichung bestimmen; an diesem Punkt ist nämlich die Geschwindigkeit des Objekts gleich null:

$$v_0 - g \cdot t_{\max} = 0 \Leftrightarrow t_{\max} = \frac{v_0}{g}$$

Setzt man diesen Term für $t_{\max}$ in die zweite Gleichung ein, so kann man die maximale Steighöhe $s_{\max}$ berechnen:

$$\begin{aligned} s_{\max} &= v_0 \cdot t_{\max} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot t_{\max}^2 \\ &= v_0 \cdot \frac{v_0}{g} - \frac{1}{2} \cdot g \cdot \left(\frac{v_0}{g}\right)^2 \\ &= \frac{v_0^2}{g} - \frac{1}{2} \cdot \frac{v_0^2}{g} \\ &= \frac{v_0^2}{2 \cdot g} \end{aligned}$$

Nach der doppelten Zeit, also $2 \cdot t_{\max}$ kommt das Objekt wieder auf dem Boden an. Dies kann man beispielsweise überprüfen, indem man in der Weg-Zeit-Gleichung $s(t) = 0$ setzt und die Gleichung nach t auflöst. (Der Luftwiderstand wird dabei vernachlässigt.) Die Wegstrecke wird beim Herunterfallen in der gleichen Weise durchlaufen wie beim Hochwerfen, nur zeitlich umgekehrt. Entsprechend ist auch die Geschwindigkeit des Objekts, sofern kein Luftwiderstand auftritt, vor Aufprall wieder gleich der ursprünglichen Geschwindigkeit v_0 .

2.2.4.3 Senkrechter Wurf nach unten

Kann ein geworfenes Objekt – beispielsweise im Anschluss an einen senkrechten Wurf nach oben – nach dem Erreichen seiner Ausgangslage weiter herabfallen, so führt man ab diesem Zeitpunkt einen so genannten senkrechten Wurf nach unten aus; seine Anfangsgeschwindigkeit beträgt dabei $-v_0$.

Für die Geschwindigkeit v des Objekts gilt in Abhängigkeit von der Zeit t : $v(t) = -g \cdot t - v_0$

Für den Ort des Objekts gilt im zeitlichen Verlauf entsprechend: $s(t) = -\frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 - v_0 \cdot t + s_{z,0}$

Gilt im Speziellen für die Anfangsgeschwindigkeit $v_0 = 0$, so entspricht das Ergebnis $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot z_0}$ der Geschwindigkeit des Objekts beim freien Fall.

2.2.4.4 Waagrechter Wurf

Wird ein Objekt von einer erhöhten Position $s_{z,0} = z_0$ aus waagrecht geworfen, so bewegt er sich – unter Vernachlässigung des Luftwiderstands – entlang der horizontalen x -Richtung mit seiner ursprünglichen Geschwindigkeit $v_0 = v_x$ fort. In der vertikalen Richtung findet gleichzeitig eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung entgegen der z -Achse statt; die Anfangsgeschwindigkeit in dieser Richtung ist $v_{z,0} = 0$.

Für den Vektor $\vec{v}$ der Geschwindigkeit gilt somit in Abhängigkeit von der Zeit t : $\vec{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_0 \\ -g \cdot t \end{pmatrix}$

2.2.4.5 Schräger Wurf

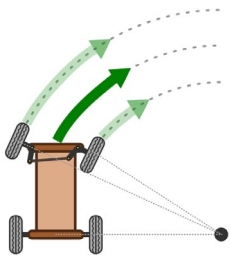
Bei einem schrägen Wurf wird ein Objekt in einem Winkel α gegenüber der Horizontalen abgeworfen ($0^\circ < \alpha < 90^\circ$).

Ohne Luftwiderstand bleibt die horizontale Komponente der Geschwindigkeit unverändert. In vertikaler Richtung wird das Objekt hingegen (wie beim senkrechten Wurf nach oben) mit der Beschleunigung $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ zum Erdmittelpunkt hin beschleunigt. Für die Geschwindigkeit $\vec{v}$ gilt somit in Abhängigkeit von der Zeit t :

$$\vec{v}(t) = \begin{pmatrix} v_x \\ v_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_{0x} \\ v_{0z} - g \cdot t \end{pmatrix}$$

Die Wurfbahn ist (ohne Luftwiderstand) parabelförmig und damit symmetrisch; die Zeit bis zum Aufprall auf dem Boden muss somit doppelt so lang sein wie die Zeit t_z , zum Erreichen der maximalen Steighöhe. Die Wurfweite ist, ebenso wie die Wurfhöhe, vom Wurfwinkel α abhängig.

2.2.5 Kreisförmige Bewegungen



Eine kreisförmige Bewegung ist die Bewegung eines Körpers auf einer Kreisbahn. Da einzelne Teile des Körpers dabei unterschiedlich lange Strecken zurücklegen, wird im Allgemeinen nur die Bewegung seines Schwerpunkts betrachtet.

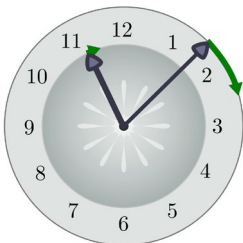
Entlang einer Kreisbahn legen die Räder auf der Innen- und Außenspur unterschiedlich weite Strecken zurück.

Abb.2.9 Kreisförmige Bewegung eines Körpers

2.2.5.1 Rotationen

Prinzipiell gibt es keinen Unterschied zwischen einer kreisförmigen Bewegung und einer Rotation. Im Sprachgebrauch bezeichnet man allerdings eine Bewegung als kreisförmig, wenn der Radius der Kreisbahn groß ist im Vergleich zu den Abmessungen des sich bewegenden Körpers; ist der Radius der kreisförmigen Bewegung hingegen in der gleichen Größenordnung wie die Länge des Körpers, so spricht man von einer Rotation.

2.2.5.2 Kreisförmige Bewegungen mit konstanter Geschwindigkeit



Bei einer gleichförmigen Kreisbewegung ändert sich ständig die Richtung, in die sich der Körper bewegt, jedoch nicht der Betrag seiner Geschwindigkeit. Eine volle Umdrehung entspricht dabei einem Winkel von $2 \cdot \pi = 360^\circ$ bei einer Umlaufbahn mit dem Radius r beträgt die dabei vom Körper zurückgelegte Strecke $s = 2 \cdot \pi \cdot r$.

Die Spitzen eines Uhrzeigers durchlaufen eine Kreisbahn mit konstanter Geschwindigkeit (Abb.2.10).

2.2.5.3 Winkelgeschwindigkeit und Drehzahl

Bei einer kreisförmigen Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit überstreicht der Ortsvektor des Körpers – ausgehend vom Mittelpunkt der Kreisbewegung – in gleichen Zeitabschnitten einen jeweils gleichen Winkel.

Definition:

Die Winkelgeschwindigkeit (auch „Drehgeschwindigkeit“ oder „Kreisfrequenz“ genannt) ω eines Körpers ist gleich dem Verhältnis aus dem durchlaufenen Winkel $\Delta\varphi$ und der dazu benötigten Zeit Δt : $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$

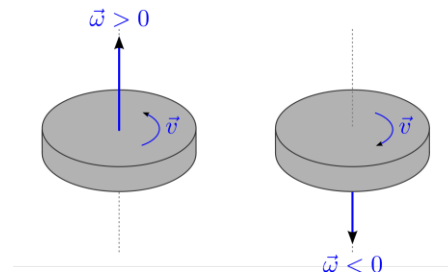
Zur Bestimmung der Winkelgeschwindigkeit wird häufig eine komplette Umdrehung ($\varphi = 360^\circ = 2\pi$) in Relation zu der dafür benötigten Umlaufzeit T gesetzt: $\omega = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = \frac{2\pi}{T}$.

Die Winkelgeschwindigkeit ist umso schneller, desto kleiner der Wert der Umlaufzeit T ist.

Einheit:

Die Winkelgeschwindigkeit ω wird in Radianen pro Sekunde (rad/s) angegeben ($1\text{rad} \approx 57,3^\circ$). Die Winkelgeschwindigkeit ist, wie auch die Bahngeschwindigkeit, eine vektorielle Größe. Da bei einer gleichmäßigen Kreisbewegung die Winkelgeschwindigkeit konstant bleibt, existiert für diese nur eine mögliche Richtung, die ebenfalls unverändert bleibt, und zwar senkrecht zur Drehebene.

Abb. 2.11 Richtung der Winkelgeschwindigkeit bei einer Rotation oder kreisförmigen Bewegung:



Als Merkregel für die Orientierung von $\vec{\omega}$ kann die „Rechte-Hand-Regel“ genutzt werden: Zeigen die Finger der rechten Hand in Richtung der Drehbewegung, so zeigt der Daumen die Richtung der Winkelgeschwindigkeit an.

Neben der Winkelgeschwindigkeit wird bei Dreh- und Rotationsbewegungen häufig auch eine sogenannte „Drehzahl“ n angegeben, welche die Anzahl an vollständigen Umdrehungen je Zeiteinheit angibt. Zwischen der Drehzahl n und der Winkelgeschwindigkeit ω gilt folgender Zusammenhang: $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$.

Der Faktor $2 \cdot \pi$ ergibt sich daraus, dass eine vollständige Umdrehung einem Winkel von $360^\circ = 2\pi$ entspricht. Da Winkelangaben reine Zahlenwerte sind, wird eine Drehzahl von beispielsweise zehn Umdrehungen je Minute als $n = 10 \frac{1}{\text{min}}$ geschrieben. Wenn allerdings nur $10 \frac{1}{\text{min}}$ als Bezeichnung angegeben wird, so kann anhand der Einheit nicht zweifelsfrei abgelesen werden, ob damit eine Winkelgeschwindigkeit oder eine Drehzahl gemeint ist. In der Praxis wird die Drehzahl daher häufig in der Form $n = 10 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ angegeben, wobei $\frac{\text{U}}{\text{min}}$ für „Umdrehungen je Minute“ steht.

2.2.5.4 Bahngeschwindigkeit

Je weiter ein rotierender Punkt oder ein sich auf einer Kreisbahn bewegendes Körper von der Rotationsachse entfernt ist, desto weitere Strecken legt er bei gleicher Winkelgeschwindigkeit zurück.

Definition:

Die Bahngeschwindigkeit v eines Körpers auf einer Kreisbahn ist gleich dem Produkt aus seiner

Winkelgeschwindigkeit ω und dem Radius r der Kreisbahn: $v = \omega \cdot r = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{T}$

Einheit:

Die Bahngeschwindigkeit v wird in Meter je Sekunde oder in Kilometer je Stunde angegeben.

2.2.5.5 Radialbeschleunigung

Da sich die Richtung der Bahngeschwindigkeit eines mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω beziehungsweise konstanter Bahngeschwindigkeit v umlaufenden Punktes ständig ändert, erfährt jeder Körper auf einer Kreisbahn eine zeitlich konstante Radialbeschleunigung a_φ in Richtung des Kreismittelpunktes.

Definition:

Die Radialbeschleunigung a_{rad} ist direkt proportional zum Quadrat der Bahngeschwindigkeit v und umgekehrt proportional zum Kreisradius r :

$$a_{rad} = \frac{v^2}{r}$$

Einheit:

Die Zentripetalbeschleunigung a_{rad} wird in Meter je Quadratsekunde (m/s^2) angegeben.

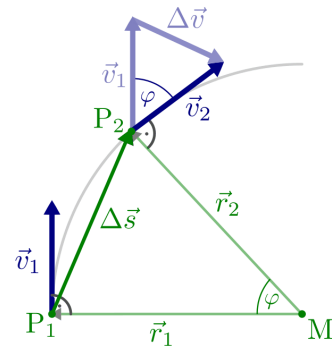
Die obige Formel für die Radialbeschleunigung lässt sich herleiten, wenn man in einer schematischen Abbildung zu den zwei Ortspunkten P_1 und P_2 eines sich auf einer Kreisbahn bewegendes Körpers die zugehörigen Bahngeschwindigkeiten $\vec{v}_1$ und $\vec{v}_2$ einzeichnet. Diese ändern aufgrund der Radialbeschleunigung zwar ihre Richtung, jedoch nicht ihren Betrag, so dass $v_1 = v_2$ gilt. Beide Bahngeschwindigkeiten stehen zudem stets senkrecht zur jeweiligen Radiuslinie; bewegt sich also der Körper entlang der Kreisbahn um den Winkel φ weiter, so dreht sich auch sein Geschwindigkeitsvektor um den gleichen Winkel.

Abb. 2.12 Schematische Skizze zur Herleitung der Formel für die Radialbeschleunigung.

Da der Abstand $r_1 = r_2$ der Punkte P_1 und P_2 vom Kreismittelpunkt gleich ist, haben das grün dargestellte Orts-Dreieck und das blau dargestellte Geschwindigkeits-Dreieck neben dem gleichen Winkel φ zudem ein gleiches Längenverhältnis zweier Seiten, denn es gilt $\frac{v_1}{v_2} = \frac{r_1}{r_2} = 1$.

Beide Dreiecke sind also einander ähnlich und stimmen somit in den Längenverhältnissen aller Seiten überein.

Folglich gilt: $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta s}{r}$ oder $\Delta v = \Delta s \cdot \frac{v}{r}$



Setzt man diesen Ausdruck für die Geschwindigkeitsänderung Δv in Relation zur dafür benötigten Zeit Δt , so erhält man die Gleichung für die Radialbeschleunigung:

$$a_{rad} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \cdot \frac{v}{r} = v \cdot \frac{v}{r} = \frac{v^2}{r}$$

Auch bei einer konstanten Bahngeschwindigkeit ist eine Kreisbewegung stets eine beschleunigte Bewegung: Es ändert sich zwar nicht der Betrag $v = |\vec{v}|$ der Geschwindigkeit, dafür aber kontinuierlich ihre Richtung.

2.2.5.6 Kreisförmige Bewegungen mit konstanter Beschleunigung

In gleicher Weise wie eine Beschleunigung a eine Änderung der Geschwindigkeit v eines Körpers hervorruft, bewirkt eine Winkelbeschleunigung α eine Änderung der Winkelgeschwindigkeit ω eines Körpers.

Zwischen der Winkelbeschleunigung α und der in der Zeit Δt bewirkten Änderung der Winkelgeschwindigkeit $\Delta \omega$ gilt folgender Zusammenhang:

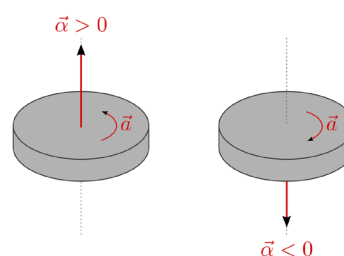
$$\alpha = \frac{\Delta \omega}{\Delta t}$$

Die Winkelbeschleunigung ist, wie auch die Winkelgeschwindigkeit, eine vektorielle Größe. Wird beispielsweise eine liegende Scheibe gegen den Uhrzeigersinn beschleunigt, so zeigt die Winkelbeschleunigung nach oben, andernfalls nach unten. Allgemein kann die „Rechte-Hand-Regel“ genutzt werden: Zeigen die Finger der rechten Hand in die Beschleunigungsrichtung, so zeigt der Daumen die Richtung der Winkelbeschleunigung an.

Da sich bei einer Bewegung auf einer Kreisbahn der Radius r nicht ändert, gibt es einen weiteren Zusammenhang zwischen der Winkelbeschleunigung und der gewöhnlichen tangentialen Beschleunigung a :

$$\alpha = \frac{a}{r}$$

Abb. 2.13 Richtung der Winkelbeschleunigung bei einer Rotation oder kreisförmigen Bewegung:



2.3 DYNAMIK

2.3.1 Mechanische Kräfte

Kräfte erkennt man an Wirkungen, die sie hervorrufen. Wird ein Körper verformt oder ändert sich seine Geschwindigkeit, so ist stets eine Kraft die Ursache. Es können jedoch auch Kräfte wirken, ohne dass sich der Bewegungszustand eines Körpers ändert oder er (sichtbar) verformt wird. In diesem Fall heben sich mehrere gleichzeitig wirkende Kräfte in ihrer Wirkung auf („Zusammenwirken mehrerer Kräfte“).



Abb. 2.14 Beim Bogenschießen wird die Sehne gespannt und dabei der Bogen elastisch verformt. Lässt man die Sehne los, so beschleunigt die Spannkraft des Bogens den Pfeil.

2.3.1.1 Die Newtonschen Gesetze

Die drei im Folgenden kurz dargestellten Gesetzmäßigkeiten stellen die Basis der klassischen Mechanik dar. Sie wurden in dieser Form erstmals im Jahre 1687 von Isaac Newton niedergeschrieben.

Das 1. Newtonsche Gesetz („Trägheitsgesetz“)

Zur Änderung eines Bewegungszustands, d.h. zu einer Beschleunigung, ist stets eine Kraft nötig. Die Ursache dafür liegt in der sogenannten „Trägheit“, einer Eigenschaft jedes Körpers, sich aufgrund seiner Masse einer Beschleunigung zu widersetzen. Ursprünglich hatten Galileo Galilei und Isaac Newton diese Gesetzmäßigkeit etwa so formuliert: „Jeder Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, solange keine äußeren Kräfte an ihm wirken.“

Wenn sich ein Körper mit einer festen Geschwindigkeit geradlinig bewegt, dann bleibt der Betrag und die Richtung der Bewegung konstant, bis eine Kraft eine Änderung seiner Bewegung bewirkt. Dass wir es im Alltag gewohnt sind, dass Gegenstände ohne beschleunigend wirkende Kräfte irgendwann von selbst zur Ruhe kommen, liegt an nie völlig vermeidbaren Reibungskräften und am Luftwiderstand. Im Weltall allerdings, in dem es aufgrund der Abwesenheit von Materie auch keine Reibung gibt, umkreisen die Planeten viele Millionen Jahre lang ihre Sonne(n), ohne ihre Geschwindigkeit zu verlieren. Auch das Abbremsen eines Körpers entspricht einer (negativen) Beschleunigung und erfordert dementsprechend eine Kraft.

Das 2. Newtonsche Gesetz („Kraftgesetz“)

Als Kraft wird allgemein die Ursache einer Beschleunigung oder Verformung bezeichnet. Der quantitative Zusammenhang zwischen der Größe einer Kraft und der durch sie bewirkten Beschleunigung wurde erstmals durch Isaac Newton in Form einer mathematischen Gleichung beschrieben.

Formel:

Die Größe einer Kraft $\vec{F}$ ist proportional zu der Beschleunigung $\vec{a}$, die ein Körper der Masse m durch sie erfährt:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Die Richtung der Beschleunigung $\vec{a}$ stimmt mit der Richtung der beschleunigenden Kraft $\vec{F}$ überein.

Einheit:

Kräfte werden in der Einheit Newton (N) angegeben: $1\,N = 1\,kg \cdot 1\,\frac{m}{s^2}$

Beispiele:

- Durch eine Kraft von $1\,N$ erfährt ein Körper der Masse $1\,kg$ eine Beschleunigung von $1\,\frac{m}{s^2}$. Dies gilt im Weltall, im Vakuum, und allgemein immer dann, wenn keine Reibung auftritt. Durch Reibungskräfte kann die tatsächliche Beschleunigung in der Praxis deutlich geringer sein.
- $1\,N$ entspricht auf der Erde der Gewichtskraft eines $100\,g$ schweren Körpers.

Eine Masse von 1 kg erfährt auf der Erde eine Gewichtskraft von rund 10 N . Im freien Fall übt die Erde damit eine Beschleunigung von rund $10\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ (genauer: $9,81\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$) auf sie aus.

Kräfte werden nach ihrer Ursache (Muskelkraft, Magnetkraft, Motorkraft, usw.) oder nach ihrer Wirkung (Zugkraft, Druckkraft, Antriebskraft, Verformungskraft, usw.) benannt.

Tab. 2.3 Beispiele für Kräfte in Natur und Technik

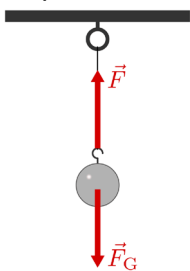
Kraft	Betrag der Kraft in N
Gewichtskraft einer Tafel Schokolade	1
Gewichtskraft von einem Liter Wasser	10
Gewichtskraft eines Menschen	ca. 700
Zugkraft eines PKW	ca. 5000
Zugkraft einer Lokomotive	ca. 15000
Anziehungskraft der Erde auf den Mond	$2 \cdot 10^{20}$

Das 3. Newtonsche Gesetz („Kraft und Gegenkraft“)

Zu jeder Kraft gehört eine gleich große Gegenkraft. Kraft und Gegenkraft haben entgegengesetzte Richtungen und wirken auf verschiedene Körper ein – sie können sich somit nicht gegenseitig aufheben.

$$F_{A \rightarrow B} = -F_{B \rightarrow A}$$

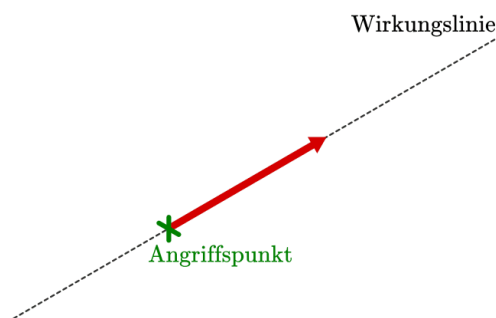
Beispiel:



Ein Gewicht hängt an einem Faden. Der Faden verhindert das Fallen des Probekörpers. In ihm wirkt eine Kraft, die so groß wie das Gewicht des Körpers ist. Beide Kräfte unterscheiden sich aber durch ihre Richtung. Die Kraft im Faden und das Gewicht haben entgegengesetzte Richtungen, sie heben sich in ihrer Wirkung auf. Kraft und Gegenkraft an einem hängenden Gewichtsstück
Schneidet man den Faden durch, so führt der Körper durch die Anziehungskraft der Erde eine geradlinige Bewegung mit konstanter Beschleunigung aus (Luftwiderstand wird vernachlässigt). Da alle Kräfte wechselseitig wirken, zieht der Körper auch die Erde an. Die Erde „fällt“ somit auch auf den Körper zu – die Wirkung ist allerdings so gering, dass wir davon nichts merken. (Abb. 2.15)

2.3.1.2 Betrag, Wirkungslinie und Angriffspunkt

Um die Wirkung einer Kraft vorhersagen zu können, muss man nicht nur die Größe (den „Betrag“) einer Kraft kennen, sondern auch wissen, an welchem Punkt sie angreift und in welche Richtung sie wirkt.



Ein Kraftvektor ist durch seinen Betrag, seine Wirkungslinie und seinen Angriffspunkt eindeutig definiert.

In Koordinatensystemen und Zeichnungen werden Kräfte meist durch Pfeile („Vektoren“) dargestellt (Abb.2.16).

Dabei gilt:

- Die Länge des Pfeils gibt in einem bestimmten Maßstab (z.B. $1\text{ N} = 1\text{ cm}$) den Betrag der Kraft an. Die Wahl des Maßstabs ist beliebig, muss aber für alle Kräfte einer Zeichnung gleichermaßen gelten.
- Der Anfangspunkt des Pfeils ist gleich dem Angriffspunkt der Kraft.
- Die Richtung des Pfeils entspricht der Wirkungslinie der Kraft.

Entlang der Wirkungslinie kann der Kraftvektor bei geeigneter Kraftübertragung beliebig verschoben werden, ohne dass sich an der physikalischen Wirkung der Kraft etwas ändert.

2.3.1.3 Kraftübertragung mit Seil, Stange und Kette

In vielen Fällen ist es nützlich, eine Kraft „aus der Entfernung“ wirken zu lassen, also ihren Angriffspunkt entlang ihrer Wirkungslinie zu verschieben.

- Mittels Seilen und Ketten lassen sich Zugkräfte auf einen anderen Körper übertragen,
- Mittels Stangen – und bedingt auch mit Drähten – können sowohl Zugkräfte als auch Druckkräfte auf einen anderen Körper übertragen werden.

In Getrieben werden üblicherweise Zahnräder und Zahnstangen zur Kraftübertragung verwendet.

2.3.1.4 Verformung und Elastizität

Kräfte können neben der Geschwindigkeit auch die Form eines Körpers verändern. Je nach Material des Körpers sind Verformungen auf zweierlei Arten möglich:

- **Elastische Verformung:**
Bei einem elastischen Vorgang bildet sich die Verformung eines Körpers zurück, wenn die verformende Kraft nachlässt. Ein typisches elastisches Material ist Gummi, doch auch viele Metalle (beispielsweise Stahl) wirken bei nicht zu großer Krafteinwirkung elastisch.

Beispiel: Ein Gummiball nimmt, wenn keine Kräfte mehr auf ihn einwirken, wieder seine ursprüngliche Form ein.

- **Plastische Verformung:**
Bei einem plastischen Vorgang bleibt die Verformung bestehen, wenn Kraft nicht mehr wirkt. Typische plastische Materialien sind Knetmasse, Wachs, Lehm, Blei, usw.

Beispiel: Die Verformung einer zusammengedrückten Kugel aus Wachs oder Knetmasse bleibt bestehen.

Es gibt keinen Stoff, der vollkommen elastisch oder vollkommen unelastisch ist. Wirken nur geringe Kräfte, so verhält sich beispielsweise Kupfer elastisch. Bei großen Kräften verhält es sich plastisch.

2.3.1.5 Kraftmessung



Zur mechanischen Kraftmessung wird häufig die verformende Wirkung der Kraft genutzt. Je stärker man beispielsweise eine Schraubenfeder verdreht oder sie auseinanderzieht, desto größer wird die Spannkraft, mit welcher die Feder sich der Verformung widersetzt. Ist an einer Feder eine geeignete Skala vorhanden, kann die auf sie wirkende Kraft somit direkt abgelesen werden. Da eine Feder nicht beliebig gedehnt werden kann, gibt es Federkraftmesser mit verschiedenen Federhärten und Skalen, die sich für verschiedene Messbereiche eignen.

Abb. 2.17 Beispiel eines Federkraftmessers

Bei sich bewegenden Körpern, beispielsweise Autos, kann man die Kraft anhand einer Geschwindigkeitsänderung des Körpers bestimmen – hierzu muss allerdings die Masse m des Körpers bekannt sein. Misst man die Geschwindigkeitsänderung Δv und die dafür benötigte Zeit Δt , so kann man die Beschleunigung $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ berechnen und erhält durch Einsetzen die wirkende Kraft F :

$$F = m \cdot a = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

2.3.1.6 Scheinkräfte

Mithilfe der Newtonschen Gesetze lässt sich die Bewegung eines Körpers in einem ruhenden oder sich mit konstanter Geschwindigkeit geradlinigen Bezugssystem („Inertialsystem“) hinreichend beschreiben. In einem beschleunigten Bezugssystem sind zur Beschreibung von Bewegungen jedoch sogenannte „Scheinkräfte“ zu berücksichtigen.

Befindet man sich beispielsweise in einem sich gleichmäßig bewegenden oder stehenden Eisenbahnwagen und wirft einen Ball senkrecht in die Luft, so landet dieser auch wieder in der eigenen Hand. Beschleunigt der Zug jedoch, nachdem der Ball die Hand verlassen hatte, so scheint dieser aus der

Perspektive des mit dem Zug beschleunigten Werfers im Lauf des Flugs von der Hand weg zu bewegen. Während sich also für einen außenstehenden Beobachter der Zug unter dem sich in horizontaler Richtung gleichförmig bewegendem Ball wegbewegt, muss ein Beobachter im Zug eine der Beschleunigung des Zugs entgegengesetzte Kraft auf den Ball hinzudenken, um die Bewegung des Balls richtig vorhersagen können.

Eine nur in einem beschleunigten Bezugssystem auftretende Kraft wird als Scheinkraft bezeichnet. Sie ist gleich dem Produkt aus der Masse m des beschleunigten Gegenstands und einer zur Beschleunigung des Bezugssystems a gleich großen, aber in entgegengesetzte Richtung wirkenden Beschleunigung $-a$:

$$\vec{F}_T = -m \cdot a$$

Eine wichtige Scheinkraft ist die Trägheitskraft F_T , die beispielsweise beim Beschleunigen oder Abbremsen von Fahrzeugen auftritt. Ein Sonderfall dieser Trägheitswirkung ist die Zentrifugalkraft bei einer kreisförmigen Bewegung. Trägheitskräfte werden auch in technischen Anwendungen genutzt, wenn durch ein schnelles Abbremsen eines Objekts eine große Kraft erzielt werden soll, beispielsweise beim Hämmern, Pressen, usw.

2.3.1.7 D'Alembertsches Prinzip

Befindet sich ein Beobachter gemeinsam mit dem beobachteten Objekt in einem beschleunigten Bezugssystem, so erfährt dieser die gleiche Beschleunigung a wie das Objekt selbst. Aus Sicht dieses Beobachters befindet sich das Objekt in Ruhe oder bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit; die auf das Objekt wirkenden Kräfte addieren sich aus Sicht des mitbeschleunigten Beobachters somit zu null.

Aus Sicht eines ruhenden Beobachters unterscheidet sich die Dynamik des Objekts (gegenüber der Perspektive eines mitbeschleunigten Beobachters) lediglich um die Trägheitskraft $F_T = -m \cdot a$. Somit muss in einem ruhenden Bezugssystem für die am Objekt wirkenden Kräfte gelten:

$$\sum_{i=1}^n F_i + F_T = \sum_{i=1}^n F_i - m \cdot a = 0$$

Diese Gleichung ist nach ihrem Entdecker benannt und wird allgemein als D'Alembertsches Prinzip bezeichnet. Es kann genutzt werden, um dynamische Vorgänge auf statische Gleichgewichtsbedingungen zurückführen und somit einfacher berechnen zu können.

2.3.2 Zusammenwirken mehrerer Kräfte

Wirken mehrere Kräfte auf einen Körper ein, so kann man sich diese als zu einer Gesamtkraft zusammengesetzt denken. Die Gesamtkraft F_{ges} hat auf den Körper die gleiche Wirkung wie die gemeinsame Wirkung der n einzelnen (Teil-)Kräfte:

$$\vec{F}_{ges} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

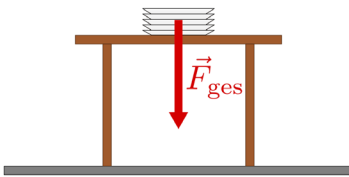
Will man die Wirkung mehrerer Kräfte auf einen Körper angeben, müssen Betrag und Richtung jeder Kraft bekannt sein.

2.3.2.1 Zusammenwirken mehrerer Kräfte mit gleicher Richtung

Wirken zwei Teilkräfte in die gleiche Richtung, so erhält man die Gesamtkraft, indem man die Beträge der Teilkräfte addiert. Die Gesamtkraft zeigt in die gleiche Richtung wie die einzelnen Teilkräfte.

Beispiel:

- Die Gewichtskraft, die ein Stapel Teller auf eine Unterlage ausübt, ist gleich der Summe der Gewichtskräfte der einzelnen Teller (Abb.2.18).

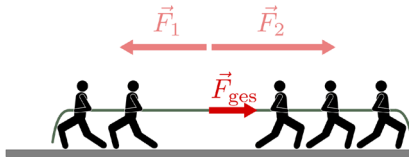


Kraftaddition mehrerer Teilkräfte zu einer Gesamtkraft.

Wirken zwei Teilkräfte in die entgegengesetzte Richtung, so erhält man die Gesamtkraft, indem man die Differenz aus den Beträgen der Teilkräfte bildet. Die Gesamtkraft zeigt in Richtung der größeren der beiden Teilkräfte.

Beispiel:

- Zieht beim Seilziehen eine Gruppe stärker als die andere, so bewegen sich alle Teilnehmer in die Richtung der stärkeren Kraft (Abb. 2.19).

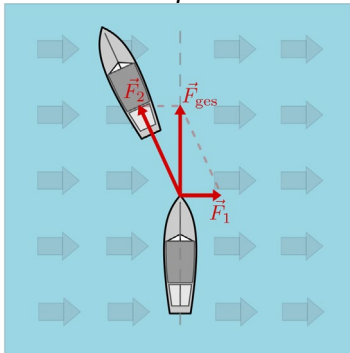


Die Gesamtkraft, mit der alle Teilnehmer beschleunigt werden, ist gleich dem Kraftunterschied beider Gruppen. (Ziehen beide Gruppen gleich stark, so sind beide Kräfte im Gleichgewicht, und kein Körper wird beschleunigt.)

2.3.2.2 Zusammenwirken mehrerer Kräfte mit unterschiedlicher Richtung

Wirken an einem Punkt mehrere Kräfte in unterschiedlicher Richtung, so sind für die Bestimmung der resultierenden Kraft die Beträge wie auch die Richtungen der einzelnen Teilkräfte zu berücksichtigen. In Zeichnungen lassen sich die wirkenden Teilkräfte wiederum als Vektorpfeile darstellen; dabei müssen die Längen der Vektoren zueinander in einem frei wählbaren Maßstab den Beträgen der einzelnen Kräfte entsprechen.

Abb. 2.20 Beispiel:



Soll ein Schiff von einem anderen ohne Abdrift über einen Fluss gezogen werden, so muss die Kraft des ziehenden Schiffes auch die Schubkraft des fließenden Wassers ausgleichen.

Die sich aus zwei Teilkräften ergebende Gesamtkraft kann zeichnerisch ermittelt werden, indem beide Vektorpfeile addiert werden, d.h. der Anfangspunkt des einen Vektors an die Spitze des anderen Vektors verschoben wird. Die Verbindungslinie vom gemeinsamen Angriffspunkt zum sich so ergebenden Endpunkt entspricht dann der resultierenden Gesamtkraft.

Rechnerisch erhält man die sich aus zwei Teilkräften $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ ergebende Gesamtkraft $\vec{F}_{ges}$, indem man die einzelnen Komponenten beider Kraftvektoren miteinander addiert:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \begin{pmatrix} F_{x,1} \\ F_{y,1} \\ F_{z,1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} F_{x,2} \\ F_{y,2} \\ F_{z,2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{x,1} + F_{x,2} \\ F_{y,1} + F_{y,2} \\ F_{z,1} + F_{z,2} \end{pmatrix}$$

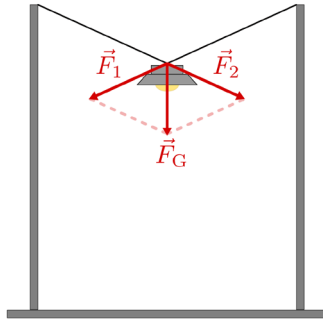
Der Betrag der wirkenden Gesamtkraft ist auch hierbei gleich dem Betrag des Ergebnisvektors, der sich gemäß folgender Formel berechnen lässt:

$$F_{ges} = |\vec{F}_{ges}| = \sqrt{F_{ges,x}^2 + F_{ges,y}^2 + F_{ges,z}^2}$$

2.3.2.3 Zerlegung einer Kraft in Teilkräfte

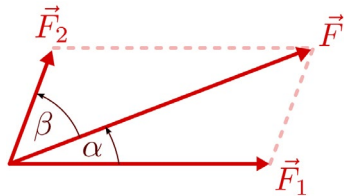
In gleicher Art und Weise, wie sich mehrere Kräfte zu einer Gesamtkraft addieren lassen, kann man eine Kraft auch in mehrere Teilkräfte aufteilen, die gemeinsam eine gleiche Wirkung hervorrufen.

Beispiel:



Eine Straßenlampe wird von zwei Halteseilen getragen. Diese können nur Zugkräfte vermitteln, d.h. die Teilkräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$ in den Seilen müssen entlang der Seilrichtungen verlaufen; die Summe beider Teilkräfte wiederum muss der Gewichtskraft $\vec{F}_G$ der Lampe entsprechen (Abb.2.21).

Kraftzerlegung einer Kraft in zwei Teilkräfte



Um eine Kraft in zwei gegebene Richtungen zu zerlegen, zeichnet man vom Anfangs- und Endpunkt der Kraft Parallelen zu diesen Richtungen.

Das entstehende Parallelogramm ergibt die gesuchten Teilkräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$.

Kraftzerlegung einer Kraft bei bekannten Winkeln α und β (Abb.2.22)

Kennt man die Winkel α und β zwischen der zu zerlegenden Kraft $\vec{F}$ und den beiden Teilkräften $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$, so gilt für die Beträge F_1 und F_2 der Teilkräfte:

$$F_1 = F \cdot \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$F_2 = F \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta)}$$

Betragsmäßig ist die Summe $F_1 + F_2$ der Teilkraftbeträge, sofern die Winkel α bzw. β nicht gleich null sind, stets größer als der Betrag F der zu zerlegenden Kraft.

2.3.3 Arten mechanischer Kräfte

Bei einer mechanischen Kraft denkt man häufig an Muskelkraft oder die Kraft eines Motors; weitere mechanische Kräfte, für die es jeweils eigene Formeln als Rechengrundlage gibt, sind im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

2.3.3.1 Gewichtskraft

Die Gewichtskraft eines Objekts ist diejenige Kraft, mit der es von der Erde angezogen wird.

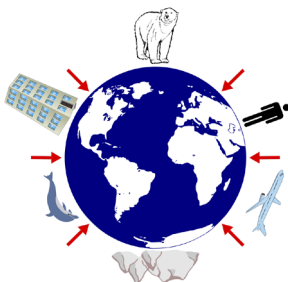


Abb. 2.23 Die Richtung der Gewichtskraft auf der Erde.

Je größer die Masse eines Objekts ist, desto stärker wird es von der Erde angezogen. Bei einer größeren Masse ist allerdings auch eine größere Kraft nötig, um sie zu beschleunigen; ohne Luftwiderstand werden daher alle Objekte, die sich im freien Fall befinden, gleich schnell zum Erdmittelpunkt hin beschleunigt.

Formel:

Der Wert der Gewichtskraft F_G , die ein Objekt der Masse m durch die Anziehungskraft eines Planeten erfährt, ist proportional zum so genannten Ortsfaktor $\vec{g}$:

$$\vec{F}_G = m \cdot \vec{g}$$

Auf der Erdoberfläche gilt für den Ortsfaktor, wie sich aus dem allgemeinen Gravitationsgesetz ableiten lässt, näherungsweise $g = |\vec{g}| = 9,81 \frac{N}{kg}$.

Beispiele:

- Ein Objekt mit einer Masse von $1,0 \text{ kg}$ hat auf der Erde eine Gewichtskraft von $F_{G,Erde} = m \cdot g = 1 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{N}{kg} = 9,81 \text{ N}$
- Ein Objekt mit einer Masse von 50 kg hat auf der Erde eine Gewichtskraft von $F_{G,Erde} = 50 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{N}{kg} = 490,5 \text{ N}$

Das Gewicht eines Objekts ist nicht an allen Stellen auf der Erde exakt gleich, sondern hängt vom Ort ab, an dem es sich befindet:

- Auf einem hohen Berg hat ein Objekt ein etwas geringeres Gewicht als auf Meereshöhe.
- An verschiedenen Stellen der Erde hat jedes Objekt – da die Erde keine ideale Kugelgestalt hat, sondern zu den Polen hin etwas „abgeflacht“ ist – ebenfalls ein geringfügig unterschiedliches Gewicht. Im Vergleich zu Mitteleuropa ist ein Objekt am Äquator etwas leichter, an den Polen etwas schwerer.
- Auf dem Mond oder auf anderen Planeten hängt die Gewichtskraft, die ein Objekt erfährt, von der Masse des jeweiligen Himmelskörpers ab: Je schwerer ein Planet ist, desto größer ist die Anziehungskraft, die er auf andere Massen ausübt.

Ort	Ortsfaktor in $\frac{N}{kg}$
Äquator	9,78
Pole der Erde	9,83
Mond der Erde	1,62
Sonne	274

Tab.2.4 Beispiele Gewichtskraft

Auf dem Mond hat ein Objekt der Masse 1 kg eine Gewichtskraft von $F_{G,Mond} = 1 \text{ kg} \cdot 1,62 \frac{N}{kg} = 1,62 \text{ N}$

Auf der Sonne erfährt ein Objekt der Masse 1 kg eine Gewichtskraft von $F_{G,Sonne} = 1 \text{ kg} \cdot 274 \frac{N}{kg} = 274 \text{ N}$

Im bekannten Universum haben Objekte überall die gleiche Masse, jedoch nicht das gleiche Gewicht.

2.3.3.2 Reibungskraft

Erfahrungsgemäß kommt jedes bewegte Objekt, das nicht angetrieben wird, nach einer gewissen Zeit zur Ruhe. Da seine Geschwindigkeit abnimmt, muss eine bremsende Kraft wirken. Eine derartige Kraft nennt man Reibungskraft F_R .

Reibungskräfte treten immer auf, wenn sich Objekte berühren und gegeneinander bewegen. Ursache dafür sind die unebenen Oberflächen der Objekte und Kohäsionskräfte, die zwischen den Molekülen der aneinanderreibenden Objekte wirken.

Haftreibung

Bei starker Vergrößerung gleicht selbst eine geschliffene Oberfläche einem kleinen Gebirge mit vielen Zacken und Spitzen. Haften zwei Objekte aneinander, so verhaken sich diese Spitzen ineinander. Versucht man die Objekte gegeneinander zu bewegen, so werden die Zacken etwas verformt; einer stärkeren Zugkraft wirkt eine stärkere Haftreibungskraft entgegen.

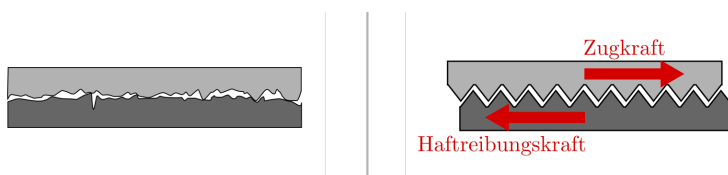


Abb.2.24 Stark vergrößerte Darstellung der Oberfläche von gleitenden Körpern und Modelldarstellung der Haftreibung.

Je stärker zwei Objekte aneinandergespresst sind, desto stärker ist die maximale Haftreibungskraft (als anschauliches Beispiel kann man zwei Bürsten ineinanderstecken und versuchen, sie gegeneinander zu bewegen).

Gleitreibung

Bewegen sich zwei Objekte gegeneinander, so schlitern die rauen Oberflächen übereinander hinweg. Sie können sich – anders als bei der Haftreibung – nicht völlig ineinander verhaken.

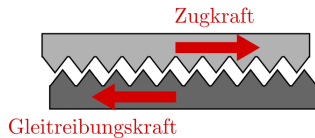


Abb. 2.25 Modelldarstellung der Gleitreibung

Rollreibung

Rollt ein Objekt auf dem anderen entlang, so können die Unebenheiten der Oberflächen deutlich leichter überwunden werden. Die Rollreibungskraft ist bei gleicher zusammenpressender (Gewichts-) Kraft wesentlich kleiner als die Gleitreibungskraft.

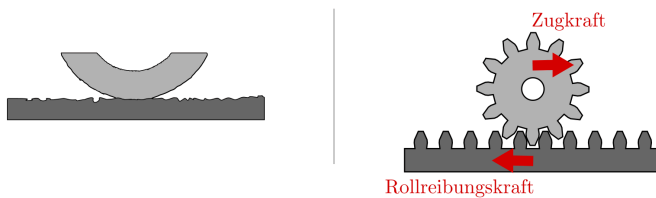


Abb.2.26 Stark vergrößerte Darstellung eines auf einer Unterlage abrollenden Rades und Modellvorstellung der Rollreibung.

Um unerwünschte Reibungskräfte zu verringern, verwendet man Schmiermittel (Fett, Öl). Dadurch wird der Raum zwischen den sich reibenden Flächen ausgefüllt, sodass sich die Unebenheiten der Körper nicht mehr so störend auswirken.

In sehr vielen Fällen sind Reibungskräfte allerdings unerlässlich: Ohne Reibungskräfte zwischen den Rädern von Fahrzeugen und der Straße wäre eine gezielte Fortbewegung unmöglich; die Räder würden durchdrehen. Um ihnen vielmehr eine möglichst gute Straßenlage zu geben, werden die Reifen aus Spezialgummi gefertigt und mit Profilen versehen. Ohne Reibung wären auch Bremsen oder gar Klebstoffe unmöglich.

Strömungswiderstand

Bewegt sich ein Objekt durch ein flüssiges oder gasförmiges Medium, so muss es stets einen Strömungswiderstand (beispielsweise Luftwiderstand) überwinden. Hierbei hängt die Größe der Widerstandskraft von der Dichte ρ des durchquerten Mediums, der Querschnittsfläche A des Körpers, dem Quadrat seiner Geschwindigkeit v^2 sowie einem so genannten „Widerstandsbeiwert“ c_w ab; letzterer gibt den Einfluss der Objektform an.

Beispielsweise gilt für die Luftwiderstandskraft F_L näherungsweise folgende Formel:

$$F_L = \frac{1}{2} c_w \rho_L A v^2$$

Die Dichte der Luft beträgt unter Normalbedingungen $\rho_{Luft} = 1,29 \frac{kg}{m^3}$.

Für die Berechnung der Wasserwiderstandskraft muss mit der entsprechend höheren Dichte von Wasser gerechnet werden: $\rho_{Wasser} = 1000 \frac{kg}{m^3}$

2.3.3.3 Spannkraft

Drückt man einen elastischen Gegenstand, beispielsweise eine Schraubenfeder, zusammen oder zieht ihn auseinander, so wirkt in ihm eine entgegengesetzt gerichtete Kraft, die versucht, ihn wieder auf ihre Länge zurück zu formen.

Formel:

Je weiter die Wegstrecke s ist, um die eine Schraubenfeder gestaucht oder gedehnt wird, desto stärker ist die rückstellende Spannkraft F_S der Feder. $\vec{F}_S = -D \cdot \vec{s}$

Die Federkonstante D ist dabei von der Form und dem Material der Feder beziehungsweise des elastischen Körpers abhängig. Die Federkonstante (und damit die Federhärte) einer Schraubenfeder ist beispielsweise umso größer, je dicker der Draht ist und je enger er gewickelt ist; sie wird im Allgemeinen in Newton je Meter (N/m) angegeben.

Das Minuszeichen in obiger Gleichung bedeutet, dass die Richtung der Auslenkung der Feder s von ihrer Ruhelage der Richtung der Federkraft entgegengesetzt ist. Zu Ehren ihres Entdeckers, Robert Hooke, wird sie auch als „Hookesches Gesetz“ bezeichnet.

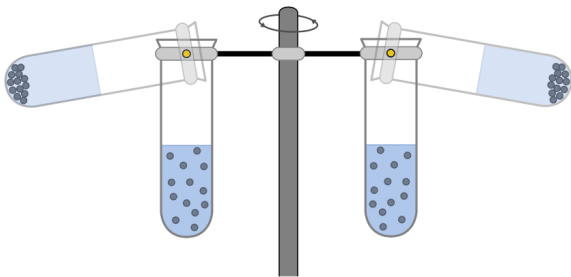
2.3.3.4 Radialkraft

Ein Körper bewegt sich aufgrund seiner Masse stets entlang einer geradlinigen Bahn, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt. Eine kreisförmige Bewegung ist somit nur möglich, wenn eine Kraft den Körper auf der Kreisbahn hält, also ihn kontinuierlich zum Kreismittelpunkt hin beschleunigt. Diese Kraft wird Radialkraft beziehungsweise Zentripetalkraft genannt.

Für den Betrag der Radialkraft gilt ebenfalls das Kraftgesetz $F = m \cdot a$.

Mit der Radialbeschleunigung $a = \frac{v^2}{r}$ folgt für die Radialkraft F_{rad} $F_{rad} = m \cdot \frac{v^2}{r}$

Befindet man sich als Beobachter selbst auf einer Kreisbahn, so nimmt man hingegen die entsprechende Gegenkraft („Zentrifugalkraft“) wahr.



Sitzt man beispielsweise in einem Fahrzeug, das nach links lenkt, so scheint eine Kraft zu wirken, die den eigenen Körper zur rechten Seite hin beschleunigt (Scheinkraft). In Wirklichkeit versucht man sich aufgrund der Trägheit geradeaus zu bewegen und wird erst durch die zum Kreismittelpunkt hinwirkende Radialkraft auf die Kreisbahn gezwungen.

Abb. 2.27 Modell einer einfachen Zentrifuge.

Technisch wird die Radialkraft beispielsweise in Zentrifugen genutzt. Dabei wird ein zu trennendes Gemisch an Substanzen, die sich beispielsweise in einem Reagenzglas befinden, in eine Kreisbewegung mit hoher Winkelgeschwindigkeit und kleinem Bahnradius versetzt. Das Stoffgemisch wird dabei gemäß seiner Dichteanteile aufgetrennt, die „schwereren“ Substanzen bewegen sich dabei aufgrund ihrer Trägheit nach außen und lagern sich so am Boden des rotierenden Gefäßes ab. Diese Schichtung bleibt auch nach einem Abschalten der Zentrifuge bestehen, da letztlich nichts anderes als ein Sedimentationsvorgang stattgefunden hat – nur ein sehr schneller. Die durch die Radialkraft bewirkte Radialbeschleunigung kann mit Zentrifugen bzw. Ultrazentrifugen ein 100- bis 250000-faches der Erdbeschleunigung g betragen.

2.4 DREHMOMENT UND GLEICHGEWICHT

2.4.1 Drehmoment

Wirkt eine Kraft auf einen starren Körper, so kann sie sowohl eine Verschiebung (Translation) als auch eine Drehung (Rotation) bewirken. Für die Drehbewegung des Körpers ist dabei nur derjenige Anteil der Kraft von Bedeutung, dessen Wirkungslinie senkrecht zur Linie zwischen Drehachse und Angriffspunkt der Kraft steht.

Definition:

Wirkt eine Kraft $\vec{F}$ im senkrechten Abstand $\vec{s}$ von einer festen Drehachse, so erzeugt sie ein Drehmoment $\vec{M}$, für das gilt:

$$\vec{M} = \vec{s} \times \vec{F}$$

$$\vec{M} = s \cdot F \cdot \sin \alpha$$

Hierbei bezeichnet α den Winkel zwischen der Krafrichtung und der Verbindungslinie vom Drehzentrum zum Angriffspunkt der Kraft. Das Drehmoment ist als Vektorprodukt seinem Betrag nach maximal, wenn die Kraft $\vec{F}$ senkrecht zur Strecke $\vec{s}$ zwischen Angriffspunkt und Drehachse auf den Körper einwirkt. Wirkt die Kraft entlang dieser Verbindungslinie, so ist der Betrag des Drehmoments gleich null.

Einheit:

Die Einheit des Drehmoments ist – gemäß seiner Definition – das Newtonmeter (Nm). Ein Newtonmeter entspricht demjenigen Drehmoment, das eine Kraft $F = 1\text{N}$ im senkrechten Abstand $s = 1\text{m}$ ihrer Wirkungslinie von der Drehachse erzeugt.

Das Kräftepaar

Ein Sonderfall eines Drehmoments tritt auf, wenn zwei gleich große, aber in entgegengesetzter Richtung wirkende Kräfte am gleichen Gegenstand angreifen. Bezeichnet man mit l den Abstand der zwei zueinander parallelen Wirkungslinien beider Kräfte F_1 und F_2 , so gilt für die resultierenden Drehmomente M_1 und M_2 :

$$M_1 = \frac{1}{2} \cdot l \cdot F_1$$

$$M_2 = \frac{1}{2} \cdot l \cdot F_2$$

Damit ergibt sich als Drehmoment insgesamt: $M = M_1 + M_2 = l \cdot F$

Das Drehmoment derartiger Kräftepaare ist beispielsweise für Schrauben, Windeisen, Kreuzschlüssel usw. von Bedeutung.

2.4.2 Gleichgewicht

Ein um eine Achse drehbarer Körper ist im Gleichgewicht, wenn sich alle an ihm wirkenden Drehmomente gegenseitig ausgleichen.

Definition:

Der Schwerpunkt ist der Punkt eines starren Körpers, bei dem sich alle durch sein Gewicht wirkenden Drehmomente $M_i = s_i \times F_i$ zu Null addieren:

$$\sum_{i=1}^n \vec{s}_i \times \vec{F}_i = 0$$

Die Kräfte F_i entsprechen dabei den Gewichtskräften der einzelnen fest miteinander verbundenen Massestücke („Massenpunkte“). Die Strecken s_i entsprechen den zugehörigen Abständen vom Schwerpunkt, sofern dieser als Koordinatenursprung angesehen wird.

Stabiles, labiles und indifferentes Gleichgewicht

Allgemein kann zwischen drei unterschiedlichen Gleichgewichtsarten unterschieden werden:

- Ein Körper im stabilen Gleichgewicht kehrt bei einer kleinen Auslenkung von selbst wieder in seine ursprüngliche Lage zurückführt.
- Ein Körper im labilen Gleichgewicht kippt bei einer minimalen Auslenkung um, entfernt sich also dauerhaft von der Ausgangslage.
- Ein Körper in indifferentem Gleichgewicht ist in keiner Lage stabiler als in einer anderen. Dies gilt beispielsweise für Kugeln, Walzen oder Räder.

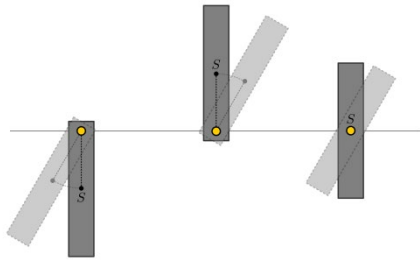


Abb. 2.28 Stabiles, labiles und indifferentes Gleichgewicht bei einer aufgehängten Holzleiste.

Kann sich ein Körper frei um eine Drehachse beziehungsweise einen Aufhängepunkt drehen, so nimmt sein Schwerpunkt die tiefst mögliche Stelle ein. In dieser Lage befindet sich der Schwerpunkt stets senkrecht unterhalb der Achse beziehungsweise des Aufhängepunktes. Sind Schwerpunkt, Aufhänge- und Drehpunkt identisch, so befindet sich der Körper in jeder Lage im indifferenten Gleichgewicht.

2.4.3 Schwerpunkt und Auflagefläche

Ein freistehender Körper, an dem keine äußeren Drehmomente wirken, kippt nicht um, solange sich sein Schwerpunkt oberhalb der Auflagefläche („Standfläche“) befindet. Der Grund dafür ist, dass bei einer kleinen Auslenkung der Schwerpunkt des Körpers zunächst angehoben wird. Bei einer weiteren Auslenkung überschreitet die vom Schwerpunkt aus senkrecht nach unten gezeichnete Lotlinie die Grenze der Auflagefläche. Sobald dies der Fall ist, kippt der Körper um und nimmt damit eine stabile Gleichgewichtslage mit tieferliegendem Schwerpunkt ein.

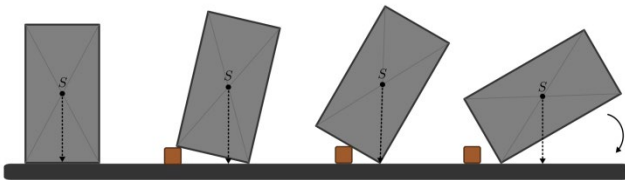


Abb. 2.29 Umkippen eines Körpers

Hat ein Gegenstand oder Körper mehrere Auflagepunkte, so entspricht die Auflagefläche der Fläche zwischen den einzelnen Auflagepunkten. Beispielsweise entspricht die Auflagefläche eines Schemels mit drei Beinen der dreieckigen Fläche, die von den Beinen des Schemels begrenzt wird.

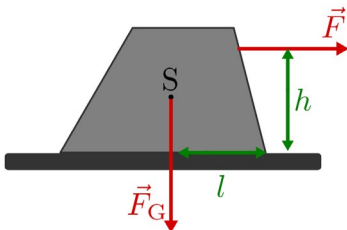


Abb. 2.30 Standfestigkeit eines Gegenstands

Wirkt eine Kraft $\vec{F}$ in einer Höhe h über der Standfläche waagrecht auf den Körper ein, so übt diese bezüglich der Kippkante ein sogenanntes Kippmoment $F \cdot h$ aus. Im entgegengesetzten Drehsinn bewirkt die im Schwerpunkt S wirkende Gewichtskraft des Gegenstands ein „Standmoment“ $F \cdot l$, wobei l den Abstand der Kippkante von der Wirkungslinie der Gewichtskraft angibt.

Im Gleichgewichtsfall gilt: $F \cdot h = F_G \cdot l$

Die zum Kippen des Gegenstands nötige Kraft beträgt also mindestens: $F = \frac{F_G \cdot l}{h}$

Die Standfestigkeit eines Gegenstands ist umso größer, je geringer seine Höhe h ist, je größer seine Gewichtskraft F_G ist und je größer der senkrechte Abstand l des Schwerpunkts zur Kippkante ist.

2.4.4 Das Trägheitsmoment

Wird ein Gegenstand durch ein äußeres Drehmoment so weit gekippt, dass sein Gleichgewicht einen instabilen Zustand annimmt, so beginnt dieser eine Rotationsbewegung auszuführen.

Bei Translationsbewegungen ist die Beschleunigung $\vec{a}$, die ein Körper durch eine äußere Kraft $\vec{F}$ erfährt, umgekehrt proportional zur Masse m des Körpers („Kraftgesetz“). Entsprechend ist bei Rotationsbewegungen die Winkelbeschleunigung $\vec{\alpha}$, die ein Körper durch ein äußeres Drehmoment $\vec{M}$ erfährt, umgekehrt proportional zum sogenannten Trägheitsmoment J des Körpers.

Es gilt also:

- Für Translationsbewegungen: $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$
- Für Rotationsbewegungen: $\vec{M} = J \cdot \vec{\alpha}$

Das Drehmoment zeigt in die gleiche Richtung wie die Winkelbeschleunigung, zeigt also in Richtung der Drehachse; der Betrag des Drehmomentvektors ist um den Faktor J vom Betrag der Winkelbeschleunigung α verschieden. Der Wert des Trägheitsmoment J eines Körpers hängt einerseits von der Lage der Drehachse, andererseits von der räumlichen Verteilung der rotierenden Masse ab. Massestücke, die weit von der Drehachse entfernt liegen, tragen stärker zum Trägheitsmoment bei als Massestücke, die sich in der Nähe der Drehachse befinden. Z.B. hat ein kleines Teilchen der Masse m , das auf einer Kreisbahn mit Radius r rotiert, ein Trägheitsmoment von $J = m \cdot r^2$.

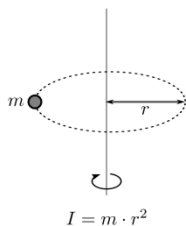


Abb. 2.31 Trägheitsmoment einer Punktmasse auf einer Kreisbahn.

Das Trägheitsmoment eines beliebig geformten Körpers kann rechnerisch bestimmt werden, wenn man ihn aus einer Vielzahl von einzelnen kleinen Massestücken m_i zusammengesetzt denkt, die jeweils im Abstand r_i von der Drehachse entfernt liegen. Das Trägheitsmoment des Körpers ist dann gleich der Summe der Trägheitsmomente aller einzelnen Teilstücke: $J = \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2$

Die Trägheitsmomente einiger regelmäßig geformter Körper, die in technischen Anwendungen häufig auftreten, sind in Formelsammlungen aufgelistet. Eine kleine Auswahl davon findet sich in Abbildung 2.32 Trägheitsmomente. Dabei ist zu beachten, dass der gleiche Körper bezüglich unterschiedlicher Rotationsachsen verschiedene Trägheitsmomente besitzen kann.

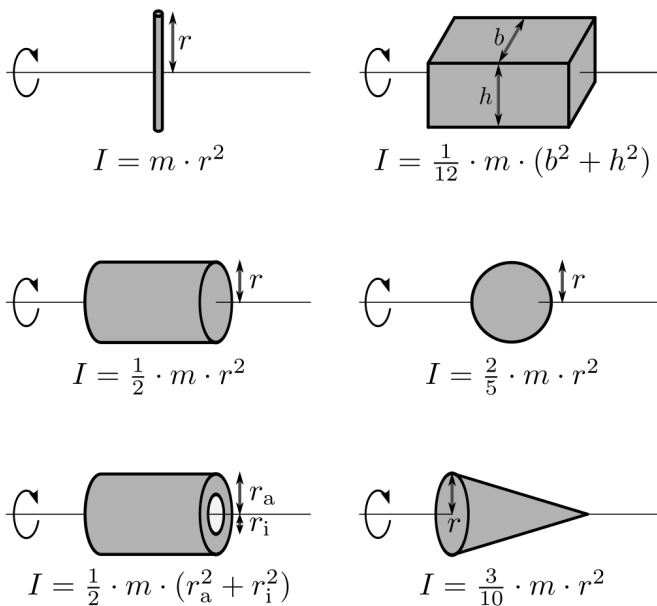
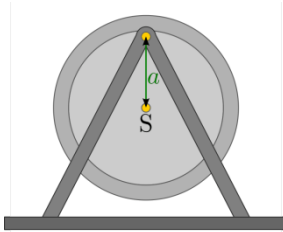


Abb. 2.32 Trägheitsmomente verschieden geformter Körper.

Experimentelle Bestimmung des Trägheitsmoments



Um das Trägheitsmoment eines beliebigen Objekts, beispielsweise einer rotierenden Scheibe oder eines Rades, experimentell zu bestimmen, kann man es beispielsweise mittels einer Halterung oberhalb seines Schwerpunkts frei drehbar aufhängen.

Abb. 2.33 Aufbau zur experimentellen Bestimmung des Trägheitsmomentes eines rotierenden Objekts.

Lenkt man diese Anordnung aus der Ruhelage aus, so beginnt es als physikalisches Pendel mit einer leicht messbaren Schwingungsdauer T um die Ruhelage zu schwingen. Für das Trägheitsmoment des Objekts um seinen Schwerpunkt gilt dann:

$$J = m \cdot a \cdot \left(\frac{T^2 \cdot g}{4 \cdot \pi^2 \cdot a} - 1 \right)$$

Hierbei bezeichnet $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$ die Erdbeschleunigung, m die Masse des schwingenden Gegenstands, und a den Abstand zwischen seinem Schwerpunkt S und dem Aufhängepunkt. Da alle anderen Größen in der obigen Formel entweder konstant oder ebenfalls leicht messbar sind, kann das Trägheitsmoment unmittelbar bestimmt werden.

2.5 KRAFTWANDLER UND GETRIEBE

Mithilfe einfacher Einrichtungen ist es möglich, die Richtung und/oder den Betrag von Kräften zu ändern. Wichtige Beispiele für solche „Kraftwandler“ sind Hebel, feste und lose Rollen, Flaschenzüge und geneigte Ebenen. In komplexeren Maschinen werden diese grundlegenden Techniken in vielfacher Weise miteinander kombiniert.

Zusätzlich werden in Maschinen häufig auch Getriebe („Drehmomentwandler“) eingebaut, insbesondere Zahnrad- und Riemengetriebe. Bei diesen Einrichtungen bleiben die Kräfte bei der Übertragung von einem Objekt zum nächsten unverändert. Die wirkenden Drehmomente ändern sich allerdings, da die rotierenden Objekte (normalerweise) unterschiedliche Radien aufweisen.

2.5.1 Hebel

Ein Hebel ist ein starrer, meist stabförmiger Körper, der sich um eine feste Achse drehen lässt (z.B. eine Wippe). Hebel werden beispielsweise dazu genutzt, um mit einer kleinen Kraft einen Körper mit großem Gewicht zu heben. Die Stelle, an der eine Kraft $\vec{F}$ am Hebel wirkt, heißt Angriffspunkt der Kraft, der Abstand ihrer Wirkungslinie zur Drehachse wird Kraftarm s genannt. Wirken auf einen Hebel zwei Kräfte $\vec{F}_1$ und $\vec{F}_2$, so ist der Hebel dann im Gleichgewicht, wenn das Produkt ersten Kraft $\vec{F}_1$ mit ihrem Kraftarm $\vec{s}_1$ gleich dem Produkt der zweiten Kraft $\vec{F}_2$ mit ihrem Kraftarm $\vec{s}_2$ ist: $\vec{s}_1 \times \vec{F}_1 = \vec{s}_2 \times \vec{F}_2$. Die obige Formel, die formal eine Gleichheit zweier Drehmomente beschreibt, wird auch als Hebelgesetz bezeichnet. Es gilt für alle Hebelformen gleichermaßen.



Abb. 2.34 Die Wippe als (zweiseitiger) Hebel: Nicht nur die wirkende Kraft, auch der Abstand zur Drehachse ist von Bedeutung.

2.5.1.1 Zweiseitige Hebel

An einem zweiseitigen Hebel liegen die Angriffspunkte der Kräfte, von der Drehachse aus betrachtet, auf verschiedenen Seiten des Hebels.

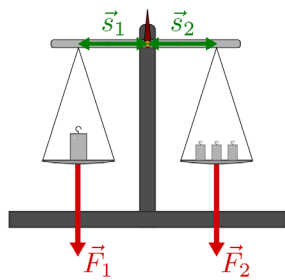


Abb. 2.35 Die Balkenwaage als zweiseitiger Hebel.

Der Hebel ist im Gleichgewicht, wenn das Drehmoment $\vec{s}_1 \times \vec{F}_1$ auf der linken Seite des Hebels dem Drehmoment $\vec{s}_2 \times \vec{F}_2$ auf der rechten Seite des Hebels entspricht. Ist das wirkende Drehmoment auf der einen Seite größer als auf der anderen, so führt die Hebelstange eine entsprechende Rotation um die Drehachse aus.

2.5.1.2 Einseitige Hebel

An einem einseitigen Hebel liegt die Drehachse am Rand der Hebelstange, sodass die Angriffspunkte aller wirkenden Kräfte, von der Drehachse aus betrachtet, auf der gleichen Seite des Hebels liegen.

Damit an einem einseitigen Hebel ein Gleichgewicht herrschen kann, muss wiederum die Summe der linksdrehenden Drehmomente gleich der Summe der rechtsdrehenden Drehmomente entsprechen. Dazu müssen die auf einen einseitigen Hebel einwirkenden Kräfte in entgegengesetzte Richtungen zeigen.

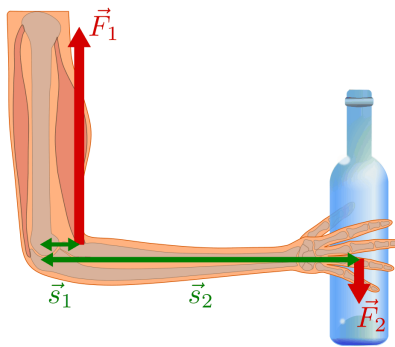


Abb. 2.36 Ein markantes Beispiel für einen einseitigen Hebel ist der menschliche Unterarm. Der Ellenbogen wirkt als Drehachse, die Gewichtskraft des zu tragenden Gegenstands wirkt nach unten, die Muskelkraft des Bizeps nach oben. Da der Bizeps um ein Vielfaches näher an der Drehachse am Unterarm ansetzt als das zu tragende Gewicht, muss die dort wirkende Kraft entsprechend größer sein.

2.5.1.3 Wellrad und Kurbel

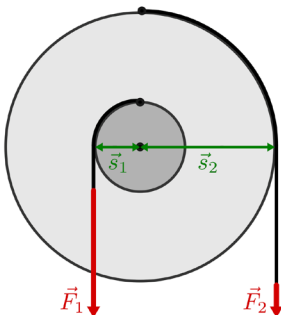


Abb. 2.37 Das Wellrad als Kraftwandler

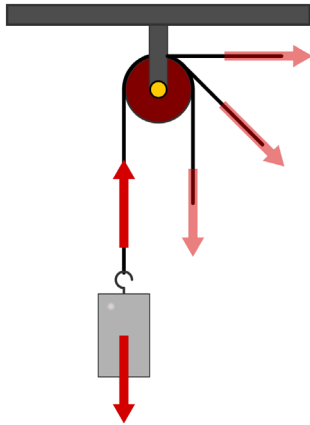
Ein Wellrad besteht aus (mindestens) zwei verschiedenen großen und miteinander verbundenen Rädern, die fest auf einer Achse („Welle“) sitzen. Die Felgen der Räder können dabei aus einem massiven Material bestehen oder über Speichen mit der Achse verbunden sein.

Prinzipiell handelt es sich auch bei einem Wellrad um einen Hebel, so dass im Gleichgewichtsfall wiederum das allgemeine Hebelgesetz gilt: $\vec{s}_1 \times \vec{F}_1 = \vec{s}_2 \times \vec{F}_2$

Dabei entsprechen die Wegstrecken $|\vec{s}_1|$ und $|\vec{s}_2|$ den Radien der beiden Räder. Betraglich ist die Kraftverstärkung, die bei einer Drehung des äußeren Rades gegenüber dem inneren Rad auftritt, gleich dem Verhältnis der Radien beider Räder. Eine kleine Kraft am großen Rad hat eine große Kraft am kleinen Rad zur Folge. Nach dem gleichen Prinzip funktioniert auch eine Kurbel. Diese kann man sich als einzelne, massive Speiche eines Wellrades vorstellen.

2.5.2 Flaschenzüge und Rollen

2.5.2.1 Die feste Rolle



Eine Rolle besteht aus einer Scheibe, entlang deren Umfang sich eine Rille zur Aufnahme eines Seils befindet. Die Rolle ist um eine Achse drehbar.

Wird eine Rolle so befestigt, dass sie sich drehen, aber nicht verschieben kann, so bezeichnet man sie als feste Rolle oder Umlenkrolle.

Hochziehen eines Gewichts mithilfe einer festen Rolle. Die Richtung der Zugkraft kann beliebig verändert werden, der Betrag der Zugkraft ändert sich nicht (Abb.2.38).

Durch eine feste Rolle wird die Richtung einer Kraft geändert, jedoch nicht ihr Betrag. Auf diese Weise wird zwar keine Kraft „gespart“, doch kann auf diese Weise beim Heben einer Last beispielsweise die eigene Gewichtskraft mit als Zugkraft genutzt werden. Ein weiterer Vorteil einer festen Rolle besteht darin, dass man beim Anheben einer Last nicht unbedingt in Zugrichtung (oberhalb der Last) stehen muss, sondern einen günstigeren Standort einnehmen kann.

2.5.2.2 Die lose Rolle

Mithilfe einer in einer Seilschlinge hängenden „losen“ Rolle kann zwar nicht – wie bei einer festen Rolle – die Richtung, dafür aber der Betrag der aufzubringenden Kraft geändert werden. Hierzu wird ein Ende des Seils an einem beliebigen Punkt oberhalb der Last befestigt.

Kann das Gewicht der Rolle gegenüber dem Gewicht der zu hebenden Last vernachlässigt werden, so wird durch die lose Rolle der Betrag der nötigen Zugkraft halbiert.

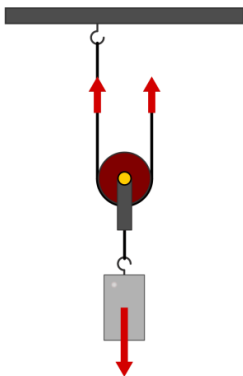


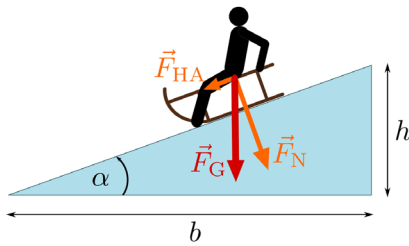
Abb. 2.39 Hochziehen eines Gewichts mithilfe einer losen Rolle. Der Betrag der Zugkraft wird halbiert, die Richtung der Zugkraft bleibt gleich.

2.5.3 Schiefe Ebenen

Wird ein Körper auf eine schiefe Ebene gestellt, so wird er aufgrund seiner Gewichtskraft F_G entlang der schiefen Ebene hangabwärts beschleunigt. Dies lässt sich erklären, wenn man die Gewichtskraft in zwei Teilkraften zerlegt, nämlich entlang der schiefen Ebene und senkrecht zu ihr:

- Die Kraft senkrecht zur schiefen Ebene wird Normalkraft F_N genannt. Dieser Kraftanteil würde ein Einsinken des Körpers in die schiefe Ebene bewirken, jedoch wirkt bei einem festen Untergrund der Boden aufgrund seiner Starrheit dagegen.

- Die Kraft parallel zur schiefen Ebene wird Hangabtriebskraft F_{HA} genannt. Dieser Kraftanteil bewirkt eine Beschleunigung des Körpers entlang der schiefen Ebene.



Ist die Hangabtriebskraft groß genug, um die zwischen Körper und schiefer Ebene wirkende Reibungskraft zu überwinden, so beginnt der Körper zu gleiten.

Abb. 2.40 Schlittenfahren auf einer schiefen Ebene.

Auf einer waagrechten Ebene ist die Gewichtskraft $\vec{F}_G$ gleich der Normalkraft $\vec{F}_N$, der Betrag der Hangabtriebskraft ist gleich null. Umgekehrt ist entlang einer vertikalen Wand die Hangabtriebskraft gleich der Gewichtskraft, und die (anpressende) Normalkraft ist gleich null. Bei einem beliebigen Winkel α der schiefen Ebene gelten für die Beträge der Normal- und Hangabtriebskraft folgende Zusammenhänge:

$$F_{HA} = F_G \cdot \sin \alpha$$

$$F_N = F_G \cdot \cos \alpha$$

Hierbei wurde die genutzt, dass der Winkel zwischen der Gewichtskraft F_G und Normalkraft F_N gleich dem Winkel α der schiefen Ebene ist, da es sich um zwei senkrecht zueinanderstehende Winkel handelt. Bezeichnet man zusätzlich mit l die Länge der schiefen Ebene, so ergibt sich aufgrund der Ähnlichkeit der beiden Kraftdreiecke und des Dreiecks der schiefen Ebene folgender Zusammenhang zwischen der Hangabtriebskraft und der Gewichtskraft des Schlittens:

$$\frac{F_H}{G} = \frac{h}{l}$$

Je länger also die schiefe Ebene ist, desto kleiner ist die entlang der Ebene wirkende Hangabtriebskraft. Aus diesem Grund werden in Gebirgen Straßen und Wege in Serpentin angelegt.

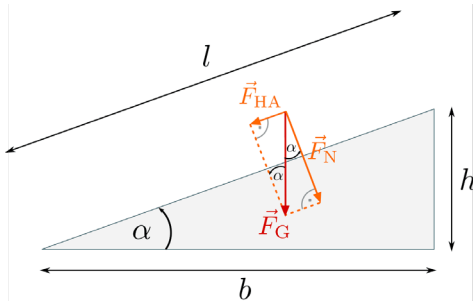


Abb. 2.41 Kraftzerlegung bei einer schiefen Ebene.

Die Größe des Winkels α lässt sich anhand des Verhältnisses der Höhe h zur (horizontalen) Breite b der schiefen Ebene berechnen. Hierbei gilt für den Winkel α :

$$\tan \alpha = \frac{h}{b} \Rightarrow \alpha = \arctan\left(\frac{h}{b}\right)$$

Je kleiner also der Winkel α ist, desto länger ist bei einer bestimmten Steighöhe h die horizontale Breite b beziehungsweise wegen $l = \sqrt{b^2 + h^2}$ auch die Länge l der schiefen Ebene.

Schiefe Ebenen mit μ

Wird ein Gegenstand auf eine schiefe Ebene gelegt, so wird er durch die Hangabtriebskraft F_{HA} entlang der schiefen Ebene nach unten beschleunigt. Kann die entgegengesetzt wirkende Reibungskraft zwischen dem Objekt und der schiefen Ebene nicht vernachlässigt werden, muss sie berücksichtigt werden.

$$F_R = \mu \cdot F_N = \mu \cdot F_G \cos \alpha$$

Befindet sich das Objekt auf der schiefen Ebene zunächst in Ruhe, so beginnt es dann zu gleiten, wenn die Hangabtriebskraft die maximale Haftreibungskraft übersteigt. Es gilt:

$$\mu_H = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha$$

Ist die Haftreibungszahl für das Materialpaar (Objekt – Schiefe Ebene) bekannt, kann man unmittelbar angeben, ab welchem Winkel α das Objekt zu rutschen beginnt:

$$\alpha_{max} = a \tan \alpha$$

Der Winkel α_{max} wird auch „maximaler Böschungswinkel“ genannt. Mit ihm kann beispielsweise ausgedrückt werden, bis zu welcher Steigung ein pulverartiges Schüttgut aufgehäuft werden kann, bevor ein Nachrutschen des Materials einsetzt.

Bewegt sich ein Objekt mit einer konstanten Geschwindigkeit eine schiefe Ebene hinab, so ist die Hangabtriebskraft gleich der Gleitreibungskraft.

2.6 ARBEIT, LEISTUNG UND ENERGIE

2.6.1 Mechanische Arbeit

Wirkt eine Kraft auf einen Körper ein und bewirkt dabei eine Verformung, eine Beschleunigung oder ein Anheben des Körpers, so wird physikalische Arbeit verrichtet. Um die Größe der verrichteten Arbeit zu bestimmen, müssen der Betrag der Kraft und die Länge des Weges, entlang dessen die Kraft wirkt, bekannt sein.

Definition:

Die Arbeit W ist das Produkt aus der in Richtung des Weges wirkenden Kraft F und der zurückgelegten Wegstrecke Δs : $W = F \cdot \Delta s$

Einheit:

Die Einheit der Arbeit ist nach obiger Gleichung das Produkt der Einheiten von Kraft und Weg. Sie wird nach James Prescott Joule kurzerhand Joule (J) genannt.

$$1J = 1N \cdot 1m$$

Beispiele:

- Die Gewichtskraft F_G einer Tafel Schokolade ($m = 100g$) entspricht in guter Näherung $1N$. Hebt man eine Tafel Schokolade einen Meter weit an (egal von welcher Position aus), so verrichtet man dabei eine Arbeit von $W = F_G \cdot s = 1N \cdot 1m = 1J$.
- Hebt man 2,3,4, ... Tafeln Schokolade einen Meter weit an, so verrichtet man jeweils eine Arbeit von 2,3,4, ... J. Mit der gleichen Arbeit könnte man jeweils auch *eine* Tafel Schokolade um 2,3,4, ... m anheben.
- Um zwei Tafeln Schokolade zwei Meter weit anzuheben, muss man eine Arbeit von $2N \cdot 2m = 4N \cdot m = 4J$ verrichten.

2.6.1.1 Arten mechanischer Arbeit

Bei mechanischen Prozessen sind die folgenden Arten mechanischer Arbeit von entscheidender Bedeutung.

Hubarbeit

Erfahrungsgemäß ist es einfacher, einen leichten Körper hochzuheben als einen schweren. Doch auch beim Heben zweier gleich schwerer Körper gibt es Unterschiede: Je weiter man einen Körper hochheben muss, desto mehr Arbeit ist dafür nötig.

Definition:

Die Hubarbeit W_{hub} ist proportional zur Gewichtskraft F_G eines angehobenen Körpers und zur Hubhöhe h .

Die Hubarbeit kann mit Hilfe der Formel für die Gewichtskraft ($F_G = m \cdot g$) auch als $W_{Hub} = m \cdot g \cdot h$ geschrieben werden.

Reibungsarbeit

Um einen Körper auf einer waagrechten Ebene gleichförmig zu bewegen, muss der Reibungskraft eine gleich große Gegenkraft entgegenwirken.

Definition:

Die Reibungsarbeit W_{Reib} ist proportional zur Reibungskraft F_R und zur zurückgelegten Wegstrecke Δs .

Beim gleichzeitigen Auftreten mehrerer Reibungskräfte (beispielsweise Rollreibung und Luftwiderstand) entspricht F_R der Summe aller auftretenden Reibungskräfte.

Spannarbeit

Die Spannkraft, die ein elastischer Körper (beispielsweise eine Schraubenfeder) einer Stauchung oder Streckung entgegengesetzt, ist nicht konstant, sondern nimmt gleichmäßig mit der Auslenkung zu:

- Die anfängliche Spannkraft der Feder in der Ruhelage ist Null.
- Wird die Feder um eine Wegstrecke Δs ausgelenkt, so beträgt die Spannkraft der Feder $\Delta F_S = -D \cdot \Delta s$.

Entlang der Strecke Δs muss im Durchschnitt nur die Hälfte der (maximalen) Spannkraft F_S am Auslenkungspunkt aufgewendet werden.

Definition:

Die zur Verformung eines elastischen Körpers (beispielsweise einer Schraubenfeder) nötige Spannarbeit W_{Spann} ist proportional zur durchschnittlichen Spannkraft $\bar{F}_S = \frac{1}{2} \cdot F_S$ und der dazugehörigen Auslenkung s .

Beschleunigungsarbeit

Zur Überwindung der Trägheit ist eine Kraft notwendig. Die zugehörige Arbeit, die bei einer Beschleunigung entlang einer Strecke s auftritt, heißt Beschleunigungsarbeit.

Definition:

Die Beschleunigungsarbeit W_B eines zunächst ruhenden Körpers der Masse m ist proportional zum Quadrat der Endgeschwindigkeit v , die dieser erreicht:

$$W_B = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Besitzt der Körper bereits eine Anfangsgeschwindigkeit v_1 und wird auf eine Endgeschwindigkeit v_2 beschleunigt, so beträgt die Beschleunigungsarbeit:

$$W_B = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

Rotationsarbeit

Zur Überwindung der Trägheit ist für eine Rotation ein Drehmoment notwendig. Die zugehörige Arbeit heißt Rotationsarbeit.

Definition:

Die Rotationsarbeit W_{rot} eines zunächst ruhenden Körpers mit Trägheitsmoment J ist proportional zum Quadrat der Winkelgeschwindigkeit ω , die dieser erreicht:

$$W_{rot} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

Besitzt der Körper bereits eine Anfangsgeschwindigkeit ω_1 und wird auf eine Endgeschwindigkeit ω_2 beschleunigt, so muss in obiger Gleichung anstelle ω die Differenz $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1$ beider Winkelgeschwindigkeiten eingesetzt werden.

2.6.1.2 Goldene Regel der Mechanik

Während Kräfte durch entsprechende Hilfsmittel in ihrer Richtung oder ihrem Betrag geändert werden können, kann die für einen mechanischen Prozess nötige Arbeit nicht verringert werden; die Menge an Arbeit bleibt erhalten.

Bei Verwendung eines Kraftwandlers ist die aufgenommene Arbeit stets gleich der abgegebenen Arbeit (Reibung wird vernachlässigt):

$$F_1 \cdot \Delta s_1 = F_2 \cdot \Delta s_2$$

$$W_1 = W_2$$

Abgesehen von Reibungsverlusten bleibt das Produkt aus Weg und Kraft (entlang des Weges) stets konstant. Eine umgangssprachliche Formulierung für das Prinzip der Kraftwandlung („die goldene Regel der Mechanik“) lautet daher:

„Was an Kraft eingespart wird, muss an Weg zugesetzt werden.“

Beispiele:

- Bei einer festen Rolle ist die zum Heben aufgewendete Kraft F_1 gleich der wirksamen Kraft F_2 . Der Weg der Kraft F_1 ist gleich dem Weg der Kraft F_2 . Somit gilt: $F_1 \cdot s_1 = F_2 \cdot s_2$
- Bei einer losen Rolle ist die zum Heben aufgewendete Kraft F_1 gleich der Hälfte der wirksamen Kraft F_2 . Der Weg der Kraft F_1 ist allerdings doppelt so groß wie der Weg der Kraft F_2 . Insgesamt gilt:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot F_2$$

$$s_1 = 2 \cdot s_2$$

$$F_1 \cdot s_1 = \frac{1}{2} \cdot F_2 \cdot 2 \cdot s_2 = F_2 \cdot s_2$$

- Um einen Körper mit einer Gewichtskraft F_G auf eine Höhe h zu heben, ist die Hubarbeit $W_{Hub} = F_G \cdot h$ nötig. Verschiebt man ihn hingegen entlang des längeren Weges l einer schiefen Ebene nach oben, so ist die nötige Kraft F um das Verhältnis h/l geringer. Es gilt: $F \cdot l = F_G \cdot h$

2.6.2 Wirkungsgrad

Sofern bei einem mechanischen Prozess die stets auftretende Reibung sehr klein gehalten werden kann, so ist es möglich, sie bei der Formulierung von physikalischen Gesetzen unberücksichtigt zu lassen. Bei genauer Betrachtung zeigt sich allerdings, dass die von einer mechanischen Einrichtung aufgenommene Arbeit stets größer ist als die von ihr abgegebene Arbeit. Es scheint also Arbeit verloren gegangen zu sein, der Satz von der Erhaltung der mechanischen Arbeit scheint somit seine Geltung zu verlieren.

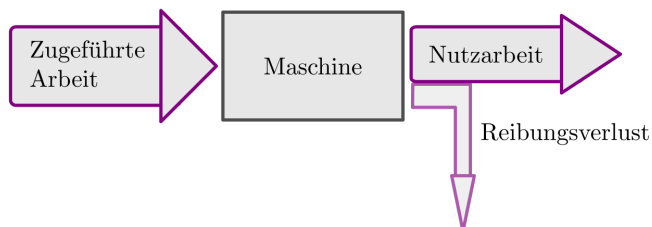


Abb.2.42 Wirkungsgrad eines mechanischen Prozesses („Energiefluss-Diagramm“)

Tatsächlich verschwindet die verrichtete Arbeit allerdings nicht, sondern es wird stets eine entsprechend große Menge an Reibungsarbeit verrichtet. Das Gesetz von der Erhaltung der mechanischen Arbeit kann (unter Berücksichtigung der Reibung) somit folgendermaßen formuliert werden:

$$\text{Aufgenommene Arbeit} = \text{Abgegebene Arbeit} + \text{Reibungsarbeit}$$

Einheit:

Als Verhältniszahl hat der Wirkungsgrad keine Einheit. Er ist umso größer, je geringer die Reibungsarbeit ist. Ist überhaupt keine Reibung vorhanden, so ergibt sich der Wert $\eta = 1$, da in diesem Fall der Zähler und der Nenner auf der rechten Seite der Gleichung übereinstimmen.

Da sich (abgesehen von in Vakuum stattfindenden Prozessen) Reibung niemals komplett beseitigen lässt, gibt es keine mechanische Einrichtung mit einem Wirkungsgrad $\eta = 1$. Durch gutes Ölen und Schmieren ist es allerdings möglich, diesen Wert zumindest annähernd zu erreichen. Ein Wirkungsgrad, der nur geringfügig kleiner als 1 ist, bedeutet, dass der größte Teil der aufgenommenen Arbeit als abgegebene mechanische Arbeit wirksam ist.

2.6.3 Mechanische Leistung

Mechanische Arbeit kann unterschiedlich schnell verrichtet werden. Die mechanische Leistung (umgangssprachlich auch „Arbeitstempo“ genannt) gibt an, wie schnell mechanische Arbeit verrichtet wird.

Definition:

Die Leistung P ist gleich dem Verhältnis aus der Arbeit W und der Zeit t , in der sie verrichtet wird. $P = \frac{W}{t}$

Einheit:

Die Leistung wird (zu Ehren des Ingenieurs James Watt) in Watt (W) angegeben. Eine Leistung von einem Watt entspricht einer in einer Sekunde geleisteten Arbeit von einem Joule: $1W = \frac{1J}{1s}$

Beispiel:

Zwei Kräne ziehen jeweils eine Palette mit Steinen, die einer Gewichtskraft $F_G = 4000N$ entspricht, auf ein $5m$ hohes Gerüst. Der eine Kran braucht für diese Arbeit eine Zeit von $t_1 = 10s$, der andere Kran benötigt hingegen $t_2 = 20s$. Damit können die Leistungen P_1 und P_2 der beiden Kräne berechnet werden:

$$P_1 = \frac{W_{Hub}}{t_1} = \frac{F_G \cdot h}{t_1} = \frac{4000N \cdot 5m}{10s} = \frac{20000J}{10s} = 2000W$$
$$P_2 = \frac{W_{Hub}}{t_2} = \frac{F_G \cdot h}{t_2} = \frac{4000N \cdot 5m}{20s} = \frac{20000J}{20s} = 1000W$$

Da der erste Kran die Arbeit in der halben Zeit verrichtet, ist seine Leistung (sein „Arbeitstempo“) doppelt so hoch wie die des zweiten Kranes.

Tab. 2.5 Beispiele für Leistungen in Natur und Technik

Mensch (Dauerleistung)	75 W bis 100 W
PKW	ca. 55000 W
Weltraum-Rakete	ca. 75000000000 W
Blitz	ca. 500000000000 W

Die mechanische Leistung, die ein Mensch über einen langen Zeitraum aufrechterhalten kann, liegt bei etwa 100W. Kurzzeitig kann ein gut trainierter Mensch auch eine Leistung in der Größenordnung von 1000W erreichen. Große Leistungsmengen werden nach wie vor häufig in Pferdestärken (PS) anstelle in Kilowatt (kW) angegeben.

$$1kW = 1000W$$

$$1PS \approx 735,5W$$

Eine weitere nützliche Formel erhält man, wenn man in der obigen Definition für die Arbeit $W = F \cdot s$ schreibt. Für die Leistung P gilt damit:

$$P = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot \frac{s}{t} = F \cdot v$$

Gemäß dieser Gleichung ist zum Beispiel eine höhere Leistung nötig, um einen Gegenstand bei einer konstant wirkenden Reibung mit höherer Geschwindigkeit zu ziehen.

2.6.3.1 Leistung von rotierenden Objekten

Vorgänge, bei denen Verschiebungen (Translationen) oder Drehungen (Rotationen) von Objekten stattfinden, lassen sich durch mathematisch ähnliche Gleichungen beschreiben. Das Äquivalent zur Kraft F ist bei Rotationen das Drehmoment M , das Äquivalent zur Geschwindigkeit v ist die Winkelgeschwindigkeit ω . Ersetzt man in der obigen Formel die jeweiligen Größen, so erhält man folgende Formel:

$$P = M \cdot \omega$$

Ein Motor kann somit eine bestimmte Leistung entweder durch eine große Drehzahl oder ein großes Drehmoment erreichen; ist die Winkelgeschwindigkeit ω gleich null, so ist auch die mechanische Leistung des Motors gleich null, egal wie hoch sein Drehmoment ist.

2.6.4 Mechanische Energie

Zum Heben oder Beschleunigen eines beliebigen Körpers oder zum Verformen eines elastischen Körpers (z.B. zum Spannen einer Feder) muss stets mechanische Arbeit verrichtet werden. Der Körper wird dadurch in einen neuen Zustand versetzt und ist dabei in der Lage seinerseits Arbeit verrichten zu können. Dieser Zustand wird durch die physikalische Größe „Energie“ beschrieben.

Definition:

Unter Energie versteht man die Fähigkeit eines Körpers, Arbeit zu verrichten. Energie ist damit mit „gespeicherter Arbeit“ identisch.

Einheit:

Die Energie wird in der gleichen Einheit wie die Arbeit, also in Joule (J), angegeben.

$$1 J = 1 N \cdot 1 m = 1 W \cdot s$$

Zur Beschreibung großer Energiemengen werden häufig die Einheiten Kilojoule und Megajoule genutzt. Darüber hinaus werden Energiemengen anhand des Zusammenhangs „Energie ist Leistung mal Zeit“ oftmals auch in (Kilo-) Wattstunden angegeben.

$$1 Wh = 1 W \cdot 3600 s = 3600 W \cdot s = 3600 J$$

$$1 kWh = 1000 Wh$$

2.6.4.1 Arten mechanischer Energie

Bei mechanischen Prozessen treten folgende Arten mechanischer Energie auf:

Die potentielle Energie („Höhenenergie“)

Um einen Körper entgegen der Schwerkraft anzuheben, muss Hubarbeit verrichtet werden. Diese ist dann in Form von „Höhenenergie“ im Körper gespeichert. Die Höhenenergie wird häufig auch als potentielle Energie bezeichnet, da sie durch den freien Fall des angehobenen Körpers wiedergewonnen werden kann.

Definition:

Die potentielle Energie E_{pot} ist gleich dem Produkt aus der Gewichtskraft $F_G = m \cdot g$ eines Körpers mit Masse m sowie der Höhe h , die dieser angehoben wird: $E_{pot} = F_G \cdot h = m \cdot g \cdot h$

Hierbei steht g für den Ortsfaktor. Auf der Erdoberfläche gilt $g \approx 9,81 \frac{N}{kg}$. Die potentielle Energie eines Körpers als Resultat einer verrichteten Hubarbeit lässt sich schwerlich als Absolutwert angeben. Steht beispielsweise ein Gegenstand auf einem Tisch, so hat er gegenüber dem Boden meist eine andere Höhenenergie als gegenüber der Meereshöhe. Bei Rechnungen legt man daher ein Nullniveau fest, auf das man dann die einzelnen potentiellen Energien bezieht.

Die Spannenergie

Beim Verformen eines elastischen Körpers wird die verrichtete Spannarbeit als Spannenergie im Körper gespeichert und bei einer Rückverformung wieder freigesetzt. Bekannte Beispiele hierfür sind das Spannen einer Schraubenfeder, das Zusammendrücken einer Druckfeder, das Hüpfenlassen eines Flummis, usw.

Definition:

Die Spannenergie E_{Spann} eines verformten Körpers mit der Federkonstanten D ist gleich dem Produkt aus der während der Verformung durchschnittlich wirkenden Spannkraft $\bar{F}_S = \frac{1}{2} \cdot F_S = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s$ und der Ausdehnung s aus der Ruhelage: $E_{\text{Spann}} = \bar{F}_S \cdot s = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$

Die gespeicherte Spannenergie nimmt somit, solange es sich um einen elastischen Prozess handelt, quadratisch mit der Verformung des Körpers zu.

Die kinetische Energie („Bewegungsenergie“)

Um einen Körper zu beschleunigen, also ihn auf eine bestimmte Geschwindigkeit v zu bringen, muss die Beschleunigungsarbeit W_B verrichtet werden. Diese ist dann in Form von Bewegungsenergie im Körper gespeichert.

Definition:

Die kinetische Energie E_{kin} ist gleich dem Produkt aus der Masse m eines Körpers und dem Quadrat seiner Geschwindigkeit v : $E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$

Die Bewegungsenergie eines Körpers nimmt somit quadratisch mit seiner Geschwindigkeit zu.

Die Rotationsenergie

Um einen Körper auf eine bestimmte Winkelgeschwindigkeit ω zu bringen, muss die Rotationsarbeit W_{rot} verrichtet werden. Diese ist dann in Form von Rotationsenergie im Körper gespeichert.

Definition:

Die Rotationsenergie E_{rot} ist gleich dem Produkt aus dem Trägheitsmoment J eines Körpers und dem Quadrat seiner Winkelgeschwindigkeit ω : $E_{\text{rot}} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$

Die kinetische Gesamtenergie eines rollenden Körpers ist gleich der Summe seiner Bewegungsenergie und seiner Rotationsenergie:

$$E_{\text{kin,ges}} = E_B + E_{\text{Rot}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$$

2.6.4.2 Der Energie-Erhaltungssatz

Bei rein mechanischen Vorgängen bleibt die Summe der mechanischen Energien (Höhen-, Bewegungs- und Spannenergie) konstant.

„Energie kann weder erzeugt noch vernichtet, sondern stets nur von einer Form in andere umgewandelt werden.“

Beispiel:

Bei einem schwingenden Pendel findet auf dem Weg von der maximalen Auslenkung zur Ruhelage eine kontinuierliche Umwandlung von Höhenenergie in Bewegungsenergie und umgekehrt statt; umgekehrt findet eine kontinuierliche Umwandlung von Bewegungsenergie in Höhenenergie statt, wenn sich der Pendelkörper vom Durchgang durch die Ruhelage in Richtung der maximalen Auslenkung bewegt. Ohne Luftwiderstand und Reibung setzen sich diese Energie-Umwandlungen beliebig oft fort.

In der Praxis treten allerdings meist nicht zu vernachlässigende Reibungseffekte auf, die mechanische Energie in Wärme umwandeln; diese zählt allerdings nicht zu den mechanischen Energieformen.

2.7 IMPULS UND DREHIMPULS

Neben der Energie gibt es zwei weitere Größen, die innerhalb eines abgeschlossenen Systems stets konstant bleiben; sie werden als Impuls und Drehimpuls bezeichnet. Die Impulsgesetze werden insbesondere bei der mathematischen Beschreibung von Stoßprozessen genutzt, Drehimpulse sind bei Kreisbewegungen und Rotationen von Bedeutung.

2.7.1 Der Impuls

Der Bewegungszustand eines Körpers ist neben seiner Geschwindigkeit auch durch seine Masse gekennzeichnet. Der Impuls eines Körpers kennzeichnet die Wucht, die dieser Körper bei einer Translationsbewegung hat.

Definition:

Der Impuls $\vec{p}$ eines Körpers ist gleich dem Produkt seiner Masse m mit seiner Geschwindigkeit $\vec{v}$:
 $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$

Einheit:

Die Einheit des Impulses ist gemäß der Definition $1\text{ kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Der Impuls $\vec{p}$ ist eine vektorielle Größe und zeigt in die gleiche Richtung wie die Geschwindigkeit $\vec{v}$. Der Impuls eines Körpers ändert sich, wenn sich entweder seine Geschwindigkeit ändert (in Betrag oder Richtung), oder wenn sich – beispielsweise bei einem Raketenstart – seine Masse ändert.

Mathematisch lässt sich die betragliche Änderung des Impulses somit folgendermaßen ausdrücken:

$$\Delta p = m \cdot \Delta v + \Delta m \cdot v$$

Diese Änderung des Impulses kann in Relation zum Zeitpunkt Δt gesetzt werden, in der die Änderung stattfindet. Damit folgt:

$$\frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta v + \Delta m \cdot v}{\Delta t} = \frac{m \cdot \Delta v}{\Delta t} + \frac{\Delta m \cdot v}{\Delta t}$$

Der Term $m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$ im ersten Teil dieser Summe kann aufgrund des Zusammenhangs $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ auch als $m \cdot a$ geschrieben werden. Dieser Term entspricht der üblichen Definition der Kraft ($F = m \cdot a$) und ist mit der Änderung des Impulses identisch, sofern die Änderung der Masse gleich Null ist. Andernfalls muss das 2. Newtonsche Gesetz („Kraftgesetz“) allgemeiner formuliert werden.

Newton selbst hat es in folgender Form angegeben:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = m \cdot \vec{a} + \frac{\Delta m}{\Delta t} \cdot \vec{v}$$

Eine Kraft kann somit als zeitliche Änderung des Impulses aufgefasst werden. Umgekehrt kann man sich eine Impulsänderung $\Delta \vec{p}$ als „Kraftstoß“ vorstellen, der sich ergibt, wenn eine Kraft $\vec{F}$ über einen Zeitraum Δt auf einen Körper einwirkt. Es gilt also: $\Delta \vec{p} = \vec{F} \cdot \Delta t$

2.7.1.1 Der Impulserhaltungssatz

Ein System aus mehreren miteinander wechselwirkenden Körpern hat einen Gesamtimpuls, der der Summe aller Einzelimpulse entspricht:

$$\vec{p}_{ges} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot \vec{v}_i = m_1 \cdot \vec{v}_1 + m_2 \cdot \vec{v}_2 + \dots + m_n \cdot \vec{v}_n$$

Wenn keine äußeren Kräfte auf das System wirken, dann ist der Gesamtimpuls konstant. Dieser empirisch gefundene Sachverhalt wird Impulserhaltung genannt und stellt neben der Erhaltung der Energie einen der wichtigsten Erhaltungssätze in der Physik dar.

Beispiel 1: Elastischer Stoß zweier Kugeln

Besteht ein System beispielsweise aus zwei Kugeln, die frontal und elastisch zusammenstoßen, so ist sowohl die Summe der Impulse wie auch die Summe der Bewegungsenergien vor und nach der Wechselwirkung gleich.

Betrachtet man einige Sonderfälle, so erhält man folgende vereinfachte Ergebnisse:

- Sind beide Kugeln gleich schwer ($m_1 = m_2$) und ist die zweite anfangs in Ruhe ($v_2 = 0$), so überträgt die erste Kugel beim Stoß ihren gesamten Impuls auf die zweite Kugel.
- Ist die erste Kugel sehr viel leichter als die zweite Kugel und ruht diese ($m_1 < m_2$ und $v_2 = 0$), so prallt die erste Kugel mit einer (nahezu) gleich großen, jedoch entgegengesetzt gerichteten Geschwindigkeit zurück.
- Ist die erste Kugel sehr viel schwerer als die zweite Kugel und ruht diese ($m_1 > m_2$ und $v_2 = 0$), so bewegt sich die erste Kugel mit nahezu gleicher Geschwindigkeit weiter; die zweite Kugel wird auf die doppelte Geschwindigkeit der ersten Kugel beschleunigt.

Beispiel 2: Unelastischer Stoß zweier Kugeln

Stoßen zwei Kugeln unelastisch aufeinander, so bewegen sich beide nach dem Stoß mit der gleichen Geschwindigkeit u entlang einer gemeinsamen Richtung hin fort. Die Richtung und der Betrag der Geschwindigkeit u kann anhand der Impulserhaltungs-Gleichung direkt berechnet werden:

$$u = \frac{m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2}{m_1 + m_2}$$

Der Energie-Erhaltungssatz gilt hingegen in diesem Fall nicht – durch die unelastische Verformung wird mechanische Energie in Wärme umgewandelt.

2.7.1.2 Teilelastische Stoßprozesse

In vielen Fällen handelt es sich bei Stößen weder einem komplett elastischen noch um einen komplett unelastischen Vorgang, sondern vielmehr um einen teilelastischen Prozess: Es wird dabei nur ein Teil der Verformungsarbeit wieder zurück in kinetische Energie gewandelt. Die Geschwindigkeiten der beteiligten Gegenstände sind nach einem teilelastischen Stoß folglich kleiner als bei einem elastischen Stoß.

2.7.2 Der Drehimpuls

In ähnlicher Weise, wie sich bei der Definition des Impulses der Beschreibung von Translationsbewegungen als hilfreich herausgestellt hat, so hat sich auch bei der Beschreibung von Rotationsbewegungen die Einführung eines so genannten Drehimpulses als nützlich erwiesen.

Der Drehimpuls eines Körpers ist von seinem Trägheitsmoment und von seiner Winkelgeschwindigkeit abhängig und kennzeichnet die Wucht, die dieser Körper bei einer Rotationsbewegung aufweist.

Definition:

Der Drehimpuls $\vec{L}$ eines Körpers ist gleich dem Produkt aus seinem Trägheitsmoment J und seiner Winkelgeschwindigkeit $\vec{\omega}$: $\vec{L} = J \cdot \vec{\omega}$

Der Drehimpuls ist eine vektorielle Größe und zeigt in die gleiche Richtung wie die Winkelgeschwindigkeit, also senkrecht zur Drehebene. Der Betrag des Drehimpuls eines rotierenden Körpers ändert sich, wenn sich entweder der Betrag seiner Winkelgeschwindigkeit oder seine Massenverteilung und somit sein Trägheitsmoment ändert.

Mathematisch lässt sich die betragliche Änderung des Drehimpulses folgendermaßen ausdrücken:

$$\Delta L = J \cdot \Delta \omega + \Delta J \cdot \omega$$

Ein Drehmoment kann allgemein als zeitliche Änderung des Drehimpulses aufgefasst werden.

2.7.2.1 Der Drehimpulserhaltungssatz

Ein System aus mehreren miteinander wechselwirkenden Körpern hat einen Gesamt-Drehimpuls, welcher der Summe aller einzelnen Drehimpulse entspricht.

Wenn keine äußeren Drehmomente auf das System wirken, dann ist der Gesamt-Drehimpuls konstant. Dieser empirisch gefundene Sachverhalt wird Drehimpulserhaltung genannt und stellt gemeinsam mit der Impulserhaltung und der Erhaltung der Energie einen der wichtigsten Erhaltungssätze der Mechanik dar.

2.8 MECHANIK DER FESTKÖRPER, FLÜSSIGKEITEN UND GASE

2.8.1 Mechanik der Festkörper

Als Festkörper werden alle Körper bezeichnet, die im festen Aggregatzustand, also in einer kristallinen Struktur vorliegen. Hierzu gehören beispielsweise Metalle, Salze, Eis und zahlreiche organische Verbindungen. Bei Metallen und Salzen bestehen die einzelnen Bausteine des Kristallgitters aus Atomen, bei Eis und organischen Verbindungen aus Molekülen.

Die Festigkeit eines Kristalls hängt sowohl von den Bindungskräften zwischen den Atomen beziehungsweise Molekülen als auch von der räumlichen Anordnung ab:

- Diamant besteht beispielsweise ebenso wie Graphit aus reinem Kohlenstoff; die Kohlenstoffatome sind allerdings im Diamantkristall anders angeordnet.
- Salze bestehen aus positiv und negativ geladenen Ionen. Die starken Bindungskräfte des Ionengitters haben eine große Härte und Festigkeit der Salzkristalle zur Folge.
- In Metallen sind die einzelnen Kristalle mikroskopisch klein und unregelmäßig angeordnet; sie sind jedoch bei mikroskopischer Betrachtung der Bruchflächen eines Metallstücks deutlich erkennbar.

Bei polykristallinen Materialien, wie beispielsweise Metallen, sind die Größen und Strukturen der einzelnen Teilkristalle unterschiedlich; das Material im Ganzen besitzt daher üblicherweise in alle Raumrichtungen gleiche Eigenschaften. Im Vergleich dazu bestehen monokristalline Stoffe aus einer einzelnen Kristallstruktur, so dass sich die mechanischen, thermischen und elektrischen Eigenschaften in den verschiedenen Raumrichtungen unterscheiden.

Für alle Festkörper mit kristalliner Struktur gilt, dass sie bei einer ganz bestimmten Temperatur (der „Schmelztemperatur“) in den flüssigen Aggregatzustand übergehen. Bei manchen Stoffen, die umgangssprachlich ebenfalls als feste Stoffe bezeichnet werden, ist eine strikte Trennung zwischen festem und flüssigem Aggregatzustand nicht möglich. Diese Materialien (z.B. Glas, Wachs, Teer und viele Kunststoffe) haben keinen kristallinen Aufbau und werden daher als „amorphe“ Stoffe bezeichnet.

2.8.1.1 Dehnung und Stauchung

In Festkörpern sind die Abstände zwischen den einzelnen Atomen sehr gering; sie haben daher ein bestimmtes Volumen und lassen sich kaum komprimieren. Allerdings lässt sich die Gestalt eines Festkörpers ändern, z.B. kann ein Metalldraht unter Verwendung durch Einwirken einer Zugkraft gedehnt werden. Ob die Gestalt des Festkörpers in ihre alte Form zurück geht, wenn die einwirkende Kraft nachlässt („elastische Verformung“) oder ob sie bestehen bleibt („plastische Verformung“), ist vom Material und der Größe der verformenden Kraft abhängig.

Dehnung von Festkörpern

Im Allgemeinen kann jeder Festkörper zu einem gewissen Grad elastisch gedehnt werden; dabei vergrößert sich seine Länge l um ein bestimmtes Stück Δl . Wird der Festkörper weiter gedehnt, so bildet sich die Verformung bei einem Nachlassen der Zugkraft nur noch teilweise oder sogar überhaupt nicht mehr zurück; die Verformung bleibt also bestehen („plastische Verformung“).



Abb. 2.43 Richtungen der einwirkenden Kräfte bei einer Dehnung.

Im elastischen Bereich ist die relative Längenänderung $\frac{\Delta l}{l}$ häufig proportional zur einwirkenden Kraft F . In diesem Fall kann das Hookesche Gesetz in einer allgemeinen Form dargestellt werden:

Formel:

Eine elastische Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ ist proportional zur einwirkenden Zugspannung σ :

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \frac{\Delta l}{l}$$

Hierbei bezeichnet F die Größe der (senkrecht) einwirkenden Kraft und A die Fläche, auf welche die Kraft einwirkt. Der Proportionalitätsfaktor E wird als „Elastizitätsmodul“ bezeichnet und ist eine Materialkonstante. Die Zugspannung σ sowie das Elastizitätsmodul E werden in der Einheit Pascal angegeben. Stellt man die von der Dehnung $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ abhängige Zugspannung σ in einem Diagramm dar, so verläuft die Kurve im Hookeschen Bereich linear. Die Steigung dieser Kurve ist $\tan(\alpha) = \frac{\sigma}{\varepsilon}$, was nach obiger Gleichung gerade dem Elastizitätsmodul E entspricht.

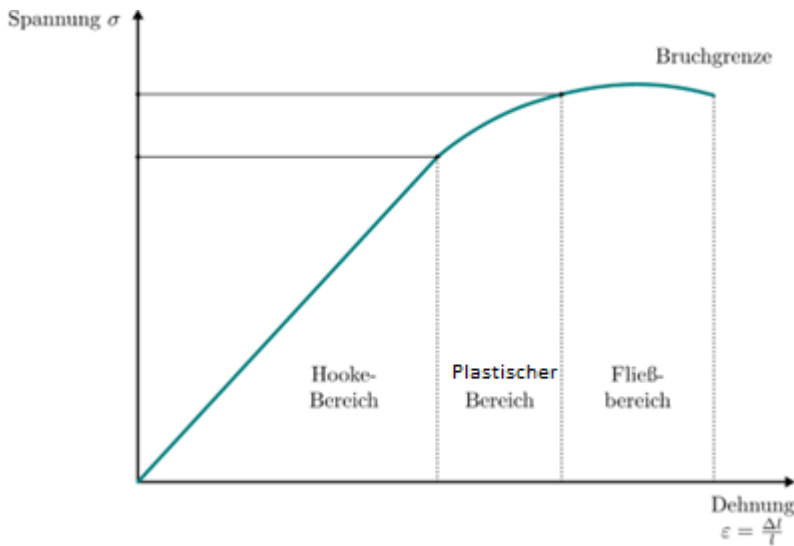


Abb. 2.44 Diagramm der Dehnung eines metallischen Festkörpers in Abhängigkeit von der einwirkenden Zugspannung.

In der Praxis wird die Grenze des elastischen Bereichs üblicherweise bestimmt, indem geprüft wird, ab welcher Zugspannung eine 0,01%-ige Dehnung bestehen bleibt. Viele Materialien, beispielsweise Metalldrähte, beginnen schließlich bei einer ausreichend großen Krafteinwirkung zu „fließen“, bis sie bei der so genannten Bruchspannung zerreißen. Spröde Materialien wie Glas hingegen brechen bereits nach Überschreiten ihrer Elastizitätsgrenze.

Wird ein Zugversuch sehr schnell durchgeführt, die Belastung also eher schlagartig erfolgt, so zeigt die Kurve im $\sigma(\varepsilon)$ -Diagramm sich oftmals erhebliche Abweichungen. Auch die Temperatur hat einen Einfluss auf die Elastizität eines Materials: Beispielsweise ähneln die Eigenschaften eines weichen Stahls unter tiefen Temperaturen denen eines härteren Stahls.

Stauchung von Festkörpern

Bei einer Stauchung wirken Kräfte senkrecht auf die Oberflächen eines Körpers ein. Dabei verkürzt sich die Länge des Materials, auf die der Druck einwirkt; bei ausreichend großen Drücken lässt sich auch eine geringfügige Abnahme des Volumens feststellen. Der Probekörper kann sich bei einer Stauchung (je nach Form und Festigkeit) auch verbiegen oder umknicken, wenn die maximale Belastbarkeit überschritten wird. Typische Beispiele für Stauchungen sind das Zusammenpressen einer Schuhsohle oder eines Brückenpfeilers unter der einwirkenden Gewichtskraft.



Abb. 2.45 Richtungen der einwirkenden Kräfte bei einer Stauchung

Auch bei einer Stauchung wird die Formänderung des Materials durch eine (Druck-)Spannung beschrieben. Die Druckspannung ist ebenso wie die Zugspannung definiert als Verhältnis der einwirkenden Kraft F zur Querschnittsfläche A des Materials. Das Symbol für die stauchende Spannung ist wiederum σ , die Einheit ist ebenfalls Pascal.

Die Druckspannung entspricht formal der Zugspannung, hat jedoch aufgrund der entgegengesetzten Richtung der Kraft ein negatives Vorzeichen; ebenso ist in diesem Fall die „Stauchung“ $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ negativ.

Biegung

Eine Biegung, beispielsweise eines Balkens, entsteht durch eine Krafteinwirkung auf das eine Ende des Gegenstands, während das andere Ende fest eingespannt ist. Das Produkt aus der Länge l des Gegenstands und der Kraft F entspricht dem wirkenden Drehmoment M .

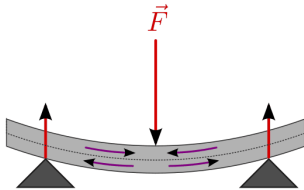


Abb. 2.46 Richtungen der im Material entstehenden Spannungen bei einer Biegung.

Kennzeichnend für eine Biegung ist eine „neutrale Faser“ in der Mitte des Gegenstands. Oberhalb dieser neutralen Faser steht der Gegenstand unter Zugspannung und wird gedehnt, unterhalb der neutralen Faser steht der Gegenstand unter Druckspannung und wird gestaucht.

Auf Höhe der neutralen Faser wechselt die Spannung und Dehnung das Vorzeichen von positiv (Zugspannung) zu negativ (Druckspannung). Wird die Elastizitätsgrenze des Materials auf der Zug- oder Druckseite überschritten, so geht die Biegung in eine Knickung über.

2.8.1.2 Kompression

Wird auf einen Körper zunehmend ein allseitiger Druck ausgeübt, beispielsweise durch den hydrostatischen Druck in einer Flüssigkeit, so verkleinert sich sein Volumen. Der Zusammenhang zwischen der auftretenden Druckänderung Δp und der resultierenden relativen

Volumenänderung $\frac{\Delta V}{V}$ kann mittels des so genannten Kompressionsmoduls K beschrieben werden:

$$\Delta p = -K \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

Die Einheit des Kompressionsmoduls K ist Pascal, wie auch die Einheit des Drucks. Das negative Vorzeichen in der obigen Gleichung ergibt sich daraus, dass bei einem von außen einwirkendem, positivem Druck das Volumen kleiner wird, also in diesem Fall ΔV negativ ist.

Eine Abnahme des Volumens V bei einer Kompression ist gleichbedeutend mit einer Zunahme der Dichte ρ des Gegenstands. Während also das Volumen bei einer Kompression abnimmt (negatives Vorzeichen), nimmt die Dichte zu. Je größer der Wert des Kompressionsmoduls K ist, desto größer ist der nötige Druck, um eine bestimmte relative Volumenänderung zu erreichen. Die Werte von K von Festkörpern und Flüssigkeiten sind üblicherweise um mehrere Größenordnungen höher als die von Gasen. Ist der Kompressionsmodul eines Materials hoch, so bedeutet dies, dass das Material einer Kompression einen hohen Widerstand entgesetzt, sich also nur schwer komprimieren lässt.

2.8.2 Mechanik der Flüssigkeiten

In der Hydrodynamik werden die mechanischen Eigenschaften von Flüssigkeiten, insbesondere von Wasser, untersucht.

2.8.2.1 Druck in Flüssigkeiten

Flüssigkeiten lassen sich durch mechanische Belastung (fast) nicht zusammenpressen („komprimieren“). Dies gilt sowohl für von außen wirkende Kräfte wie auch für den so genannten „Schweredruck“, der sich aus dem Eigengewicht der Flüssigkeit ergibt.

Kolbendruck

Übt man mit einem Kolben eine Kraft auf eine Flüssigkeit aus, die sich in einem geschlossenen Behälter befindet, so bleibt das Volumen der Flüssigkeit unverändert; allerdings baut sich im Inneren der Flüssigkeit ein „Gegendruck“ auf, der die von außen einwirkende Kraft ausgleicht.

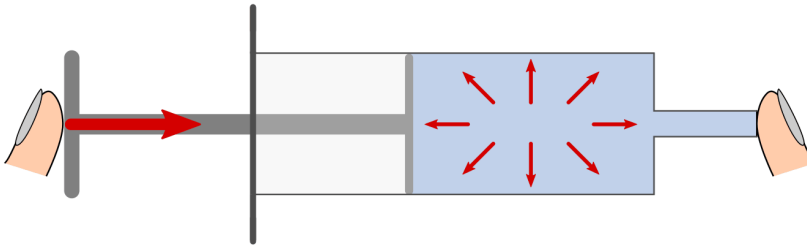


Abb. 2.47 Druck in Flüssigkeiten am Beispiel des Kolbendrucks in einer Spritze.

In einer Flüssigkeit oder in einem Gas wirkt der Kolbendruck stets in alle Raumrichtungen gleich stark („Pascalsches Prinzip“). Wird beispielsweise von links Druck auf Wasser ausgeübt, das sich in einem durchlöcherchten Schlauch oder einem so genannten „Druckfortpflanzungs-Apparat“ befindet, so tritt das Wasser an den allen Öffnungen senkrecht zur Oberfläche aus.

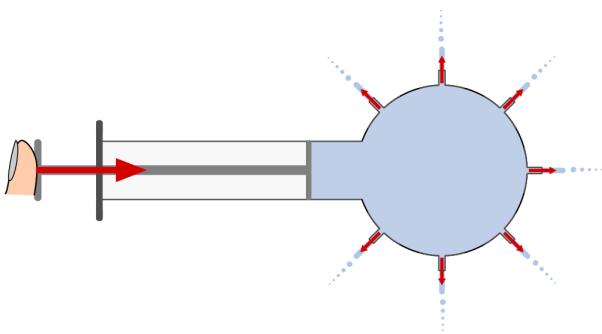


Abb. 2.48 Druckausbreitung am Beispiel eines Druckfortpflanzungs-Apparates.

Definition:

Als Druck bezeichnet man allgemein das Verhältnis einer Kraft F zu einer Fläche A , auf welche die Kraft senkrecht einwirkt. $p = \frac{F}{A}$

Beim Kolbendruck p_K wird die Kraft F auf einen Kolben mit der Fläche A ausgeübt.

Einheit:

Die Grundeinheit des Drucks, die sich aus der obigen Formel ergibt, ist nach Blaise Pascal benannt. Für ein Pascal (1Pa) gilt folgender Zusammenhang: $1\text{Pa} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

Größere Drucke, wie sie in der alltäglichen Praxis häufig anzutreffen sind, werden häufig in der Einheit „Bar“ (bar) angegeben. Ein Bar entspricht auf der Erde in etwa der Größe des Luftdrucks in Bodennähe.

Dabei gilt: $1\text{ bar} = 100000\text{ Pa}$

Der gegebenenfalls auf ein Fluid einwirkende Kolbendruck sowie der im nächsten Abschnitt behandelte Schweredruck werden in Summe auch als *statischer* Druck p_{Stat} bezeichnet. Diese Druckformen treten sowohl in ruhenden wie auch in sich bewegendenden Fluiden auf und wirken an einer gegebenen Stelle stets in alle Raumrichtungen gleichermaßen.

Schweredruck

Durch das Eigengewicht der Flüssigkeit wird innerhalb der Flüssigkeit ein mit zunehmender Tiefe immer größer werdender Schweredruck hervorgerufen; dieser wirkt in einer bestimmten Tiefe in alle Raumrichtungen gleich stark. Die Größe p_s des Schweredrucks lässt sich berechnen, wenn man das Volumen einer Flüssigkeitssäule mit einer Grundfläche A und einer Gewichtskraft $F_G = m_{\text{Fl}} \cdot g$ betrachtet.

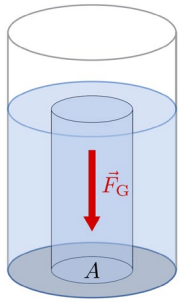


Abb. 2.49 Schweredruck einer Flüssigkeitssäule.

Der Schweredruck in einer Flüssigkeit hängt, da der Ortsfaktor g konstant ist, nur von der Dichte der Flüssigkeit und der Höhe der Flüssigkeitssäule ab.

Um Verwechslungen zu vermeiden, wird die Angabe des Schweredrucks in einer Flüssigkeit häufig um die Angabe (man.) ergänzt. Dieses Kürzel steht für „Manometer-Druck“ und soll darauf hindeuten, dass sich die Druckangabe relativ zum Luftdruck bezieht.

Addiert man beispielsweise zu dem Schweredruck von $p_s = 1\text{bar}$ (man.) noch den Luftdruck dazu, der ebenfalls $p_{\text{Luft}} = 1\text{bar}$ groß ist, so erhält man $p = 2\text{bar}$ (abs.) als „absoluten“ Druck, der in dieser Tiefe vorherrscht.

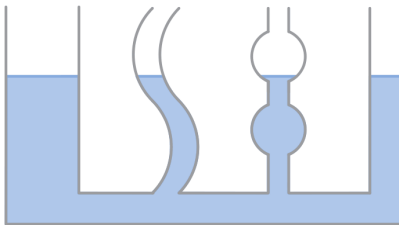
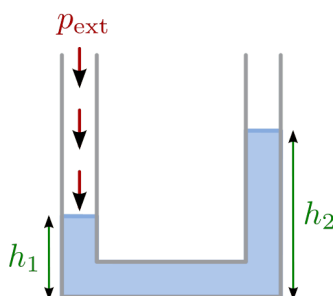


Abb. 2.50 Gleiche Wasserniveaus bei verbundenen Gefäßen unterschiedlicher Form (hydrostatisches Paradoxon).

Die Zunahme des Schweredrucks mit der Tiefe ist unabhängig von der Form der darüber liegenden Wassersäule. Dieses als „hydrostatisches Paradoxon“ bekannte Prinzip kann man beispielsweise mittels einer Anordnung von unterschiedlich geformten Glasgefäßen zeigen, die untereinander durch Wasserleitungen verbunden sind („kommunizierende Gefäße“). Bei einer solchen Anordnung ist das Wasserniveau in allen Gefäßen gleich hoch – ein höheres Wasserniveau in einem der Gefäße hätte einen höheren Wasserdruck auf die unteren Wasserschichten in diesem Gefäß zur Folge, wodurch wiederum Wasser von dort in die übrigen Gefäße gepresst würde. Dieses Prinzip wird nicht nur zur Konstruktion von Siphons als „Geruch Stopper“ verwendet (beispielsweise an Waschbecken), sondern ebenso, um mittels so genannter „Schlauchwaagen“ – ähnlich wie mit Wasserwaagen – über sehr große Entfernungen hinweg eine waagrechte Ausrichtung von Gegenständen zu erreichen.

2.8.2.2 Druckmessung



Die Zunahme des Schweredrucks mit der Höhe der Wassersäule wird bei so genannten „U-Rohr-Manometern“ zur Druckmessung genutzt. Als „Manometer“ bezeichnet man allgemein Druckmessgeräte, die einen externen, relativ zum Luftdruck vorherrschenden Druck p_{ext} messen.

Messung eines externen Drucks p_{ext} mit Hilfe eines U-Rohr-Manometers (Abb. 2.51).

Wird auf ein Ende eines mit einer Flüssigkeit gefüllten U-Rohrs ein externer Druck p_{ext} ausgeübt, so wird durch diesen die Flüssigkeit in die andere Hälfte des U-Rohrs verdrängt. Dies erfolgt so lange, bis sich in der anderen Hälfte durch die höhere Wassersäule ein hinreichend großer Schweredruck aufgebaut hat, der dem externen Druck p_{ext} entgegenwirkt.

Im Gleichgewichtsfall gilt:

$$p_{links} = p_{rechts}$$

$$p_{ext} + p_{s,1} = p_{s,2}$$

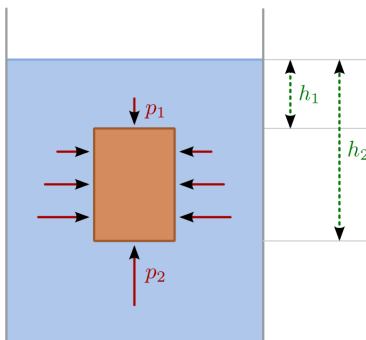
$$p_{ext} + \rho_{FI} \cdot g \cdot h_1 = \rho_{FI} \cdot g \cdot h_2$$

Zur Messung des externen Drucks p_{ext} muss somit lediglich der sich einstellende Unterschied der Füllhöhen, also eine Länge gemessen werden. Da der Zusammenhang direkt proportional beziehungsweise linear ist, kann durch eine Kalibrierung auf eine bestimmte Flüssigkeit auch eine entsprechende Skala mit Druckwerten angebracht werden. Für kleine zu messende Druckwerte verwendet man eine Flüssigkeit mit geringer Dichte, für hohe Drücke eine Flüssigkeit mit hoher Dichte, damit ein entsprechend großer Gegendruck durch die Schwere des Fluids zustande kommt.

Genau genommen muss bei der Herleitung des Druck-Gleichgewichts in einem U-Rohr auch noch der Luftdruck berücksichtigt werden. Dieser wirkt allerdings gleichermaßen auf beide Seiten des U-Rohrs ein und hat daher keinen Einfluss auf das Gleichgewicht. Wäre allerdings das rechte Ende des U-Rohrs oben abgeschlossen und luftleer, so müsste man den dann nur auf die linke Seite einwirkenden Luftdruck berücksichtigen; in diesem Fall spricht man von einem Barometer, das üblicherweise zur Messung des Luftdrucks verwendet wird.

2.8.2.3 Statischer Auftrieb in Flüssigkeiten

Ist ein Körper mit einem Volumen V von einer Flüssigkeit umgeben, so erfährt er durch diese eine Auftriebskraft F_A . Diese resultiert aus der Tatsache, dass der Schweredruck innerhalb einer Flüssigkeit mit der Tiefe zunimmt.



Die horizontalen Kräfte, die durch den Druck der umgebenden Flüssigkeit auf den Körper einwirken, sind jeweils paarweise gleich groß und heben sich in ihrer Wirkung gegenseitig auf (sofern der Körper nicht komprimierbar ist). Die nach unten bzw. oben gerichteten Kräfte F_1 und F_2 hingegen sind aufgrund der Druckdifferenz unterschiedlich groß (Abb.2.52).

Für die Auftriebskraft gilt folgende Formel:

$$F_A = \rho \cdot g \cdot V_k$$

Der Betrag der Auftriebskraft hängt somit ausschließlich von der Dichte ρ der Flüssigkeit und dem Volumen V_k des eintauchenden Körpers ab.

2.8.2.4 Archimedisches Prinzip und Dichtemessung

Jeder Festkörper verdrängt beim Eintauchen ebenso viel Volumen an Flüssigkeit wie er selbst an Volumen besitzt; dieser empirisch gefundene Sachverhalt wird nach seinem Entdecker Archimedes auch als „Archimedisches Prinzip“ bezeichnet. Da folglich $V_{Fl} = V_K$ gilt, kann man auf den Index verzichten und einfach V für das Volumen des eintauchenden Körpers beziehungsweise der verdrängten Flüssigkeit schreiben. Die Auftriebskraft F_A ist also gleich der Gewichtskraft $\rho \cdot V \cdot g = m \cdot g$ der verdrängten Flüssigkeit:

$$\frac{F_A}{F_G} = \frac{\rho_{FI} \cdot g \cdot V}{\rho_K \cdot g \cdot V} = \frac{\rho_{FI}}{\rho_K}$$

Eine andere Methode zur Bestimmung der Dichte von Festkörpern besteht darin, die Masse des jeweiligen Gegenstands mit Hilfe einer Waage zu ermitteln und mittels eines Messzylinders oder eines Überlaufgefäßes die scheinbare Volumenzunahme der Flüssigkeit beim Eintauchen des Festkörpers zu messen.

2.8.2.5 Schwimmen, Sinken und Schweben

Die Dichte ρ_K des Körpers hat keine Auswirkung auf die Auftriebskraft, entscheidet aber darüber, ob er in der Flüssigkeit aufsteigt (schwimmt), unverändert an gleicher Stelle bleibt (schwebt) oder sich nach unten bewegt (sinkt).

- Ist $\rho_K > \rho_{Fl}$, so ist die Gewichtskraft $F_G = \rho_K \cdot g \cdot V$ des Körpers größer als die Auftriebskraft $F_A = \rho_{Fl} \cdot g \cdot V$, die der Körper durch das Eintauchen in die Flüssigkeit erfährt. In diesem Fall sinkt der Körper nach unten.
- Ist $\rho_K = \rho_{Fl}$, so ist die Gewichtskraft F_G des Körpers gleich der Auftriebskraft F_A . In diesem Fall „schwebt“ der Körper, behält also seine Position bei.
- Ist $\rho_K < \rho_{Fl}$, so ist die Gewichtskraft F_G des Körpers kleiner als die Auftriebskraft F_A . In diesem Fall schwimmt der Körper an der Oberfläche beziehungsweise steigt nach oben.

2.8.2.6 Kontinuitäts- und Bernoulli-Gleichung

Fließt eine Flüssigkeit kontinuierlich durch ein Rohrleitungssystem ohne Speichermöglichkeiten, so strömt in jedes beliebige Volumenelement immer genauso viel Masse hinein wie auch wieder herausströmt („Kontinuitätsbedingung“). Kann die Reibung vernachlässigt werden und ist die Flüssigkeit inkompressibel, so muss damit an engen Stellen des Rohrsystems eine höhere Strömungsgeschwindigkeit auftreten als an Bereichen mit weitem Rohrquerschnitt.

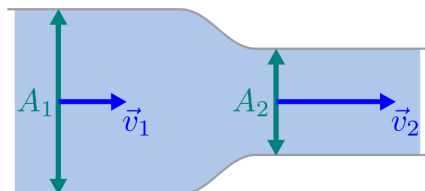


Abb. 2.53 Strömungsgeschwindigkeiten bei unterschiedlichen Rohrquerschnitten (Kontinuitätsbedingung).

Die Kontinuitätsgleichung

Dieser Effekt lässt sich durch eine Formel auch quantitativ bestimmen. Ist die Flüssigkeit inkompressibel, so ist ihre Dichte ρ an allen Stellen gleich. Wegen $m = \rho \cdot V$ gilt für den fließenden Masse-Strom

$\frac{\Delta m}{\Delta t} = \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$; soll der Masse-Strom konstant bleiben, so muss aufgrund der konstanten Dichte folglich auch der Volumen-Strom $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ an allen Stellen gleich sein:

$$\frac{\Delta m}{\Delta t} = konst \quad \xrightarrow{\rho=konst} \quad \frac{\Delta V}{\Delta t} = konst$$

Das Volumen V der Flüssigkeit wiederum lässt sich als Produkt der Querschnittsfläche A des betrachteten Rohrstücks und der durchlaufenen Strecke s beschreiben.. Bei einer reibungslosen Flüssigkeit verhalten sich die Strömungsgeschwindigkeiten umgekehrt proportional zum Rohrquerschnitt.

Die Bernoulli-Gleichung

Überprüft man mit einem Manometer an verschiedenen Stellen der Rohrleitung den statischen Druck p_{st} der Flüssigkeit, so zeigt sich, dass an den engen Stellen mit größeren Geschwindigkeiten *geringere* statische Druckwerte gemessen werden. Diese zunächst etwas verblüffend wirkende Tatsache wird als „hydrodynamisches Paradoxon“ bezeichnet.

Man kann dieses Phänomen dadurch erklärt, dass an allen Stellen der Flüssigkeit ein gleich großer Gesamtdruck p_{ges} vorliegt. Dieser Gesamtdruck wiederum ist gleich der Summe des statischen Drucks

$$p_{st} = \rho \cdot g \cdot h$$

und des dynamischen Drucks („Staudruck“) $p_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$ der Flüssigkeit:

$$p_{ges} = p_{st} + p_{dyn} = \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = konst$$

Dieser Zusammenhang wird als Bernoulli-Gleichung bezeichnet: Nimmt in einem geschlossenen Rohrsystem der dynamische Druck aufgrund einer zunehmenden Strömungsgeschwindigkeit zu, so muss gleichzeitig der statische Druck abnehmen.

Während der statische Druck p_{st} gleichmäßig in alle Richtungen wirkt, wirkt der dynamische Druck p_{dyn} ausschließlich auf Flächen, die senkrecht zur Strömungsrichtung stehen.

Formal hat die Bernoulli-Gleichung eine große Verwandtschaft mit dem Energie-Erhaltungssatz der Mechanik: Dieser besagt, dass in einem isolierten System ohne Reibungseffekte die Summe aus potentieller und kinetischer Energie erhalten bleibt:

$$E_{ges} = E_{pot} + E_{kin} = m \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = konst$$

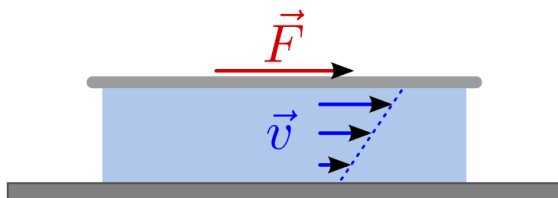
Tatsächlich erhält man die Bernoulli-Gleichung, wenn man in der obigen Gleichung zunächst $m = \rho \cdot V$ schreibt und anschließend die Gleichung durch V dividiert. Der Gesamtdruck in einem geschlossenen Rohrsystem entspricht somit einer Energiedichte.

Die Bernoulli-Gleichung wird in zahlreichen technischen Bereichen genutzt:

- Bei einer Wasserstrahlpumpe lässt man Wasser durch eine sich verengendes Rohrstück strömen. Mit der zunehmenden Wassergeschwindigkeit an der offenen Engstelle nimmt der ausschließlich in Strömungsrichtung wirkende dynamische Druck p_{dyn} zu, der allseitig wirkende statische Druck p_{st} hingegen ab. Als Folge davon wird Luft (oder ein anderes Fluid) durch den Seitenstutzen „angesaugt“.
- Zerstäuber in Sprayflaschen funktionieren auf ähnliche Weise: Vor der Düse sorgt eine schnelle Luftströmung für eine Reduzierung des statischen Luftdrucks und damit für ein „Ansaugen“ der Flüssigkeit in dem Zerstäuber Rohr.
- Mit einer so genannten Messblende kann die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids in einer Röhre bestimmt werden.

Das obige Bernoulli-Prinzip gilt nicht nur für Flüssigkeiten, sondern auch für Gase, wobei es für die Flugfähigkeit von Körpern von entscheidender Bedeutung ist („dynamischer Auftrieb“). In beiden Fällen müssen allerdings bei kleinen Rohrdurchmessern und/oder hohen Strömungsgeschwindigkeiten Reibungseffekte und Turbulenzen berücksichtigt werden.

2.8.2.7 Viskosität (innere Reibung)



Ist die Reibung innerhalb einer Flüssigkeit nicht vernachlässigbar, so ist eine Kraft beziehungsweise ein Druck nötig, um eine Flüssigkeit gegenüber einem Rohrsystem gleichmäßig zu bewegen. Wie groß die nötige Schubkraft ist, hängt von der Viskosität („Zähigkeit“) der Flüssigkeit ab.

Geschwindigkeitsprofil zweier aneinander gleitender Platten mit einer dünnen, viskosen Flüssigkeitsschicht (Abb.2.54).

Legt man beispielsweise ein Deckglas auf einen Flüssigkeitstropfen und verschiebt es auf der dünnen Flüssigkeitsschicht langsam und gleichmäßig entlang der Grundfläche, so ist zum Aufrechterhalten der Bewegung eine Kraft F erforderlich. Diese Kraft ist proportional zur Fläche A des Glases, zur Geschwindigkeit v der Bewegung und zur Viskosität η der Flüssigkeit; zudem ist die Kraft umgekehrt proportional zur Dicke s der Flüssigkeitsschicht. Insgesamt gilt also für diese zur Überwindung der Reibung nötige Kraft F :

$$F = \eta \cdot A \cdot \frac{v}{s}$$

Die obige Gleichung kann auch umgeformt werden, um ein Maß für die Viskosität einer Flüssigkeit zu erhalten:

$$\eta = \frac{F \cdot s}{A \cdot v}$$

Die Einheit der Viskosität kann nach der obigen Formel als „Pascalsekunde“ ausgedrückt werden:

$$[\eta] = \frac{N \cdot m}{m^2 \cdot \frac{m}{s}} = \frac{N \cdot s}{m^2} = Pa \cdot s$$

Viskositäten von Flüssigkeiten werden üblicherweise bei einer Temperatur von 20°C angegeben, da sie stark temperaturabhängig sind. Bei den meisten Flüssigkeiten nimmt die Viskosität mit zunehmender Temperatur stark ab, bei Gasen ist es umgekehrt.

Wasser hat bei 20°C eine Viskosität von nahezu exakt $\frac{1}{1000} Pa \cdot s = 1 m Pa \cdot s$. Da viele weitere Flüssigkeiten ähnliche Viskositätswerte aufweisen, wird die Viskosität in Tabellen allgemein oft in Millipascalsekunden angegeben.

Tab. 2.6 Viskositätswerte verschiedener Flüssigkeiten (bei 20°C)

Substanz	Viskosität η in $mPa \cdot s$
Benzol	0,65
Blut	≈ 4
Glycerin	1480
Olivenöl	≈ 80
Wasser (10°C)	1,30
Wasser (20°C)	1,00
Wasser (30°C)	0,80

Messung der Viskosität einer Flüssigkeit

Experimentell kann die Viskosität einer Flüssigkeit mit folgenden Methoden bestimmt werden:

- Bei Kugelfall-Viskosimetern lässt man eine Kugel mit einem Radius r_K und einer Dichte ρ_K in einem Behälter absinken, der mit der zu untersuchenden Flüssigkeit gefüllt ist.

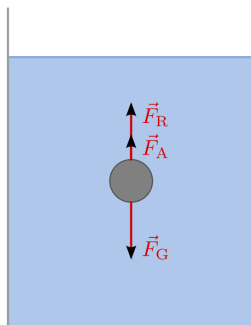


Abb. 2.55 Prinzip eines Kugelfall-Viskosimeters: Die Kugel sinkt aufgrund des Kräfte-Gleichgewichts mit konstanter Geschwindigkeit

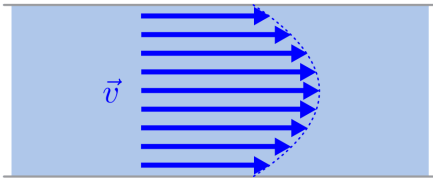
Die Kugel erfährt in diesem Fall eine von ihrer Geschwindigkeit v abhängige Reibungskraft, für die George Stokes folgende Formel fand. Mit einer zunehmenden Sink-Geschwindigkeit der Kugel wird auch die wirkende Reibungskraft größer, bis sich ein Kräfte-Gleichgewicht zwischen der Stokeschen Reibungskraft, der Gewichtskraft F_G der Kugel und der Auftriebskraft F_A einstellt.

Die Viskosität der Flüssigkeit kann also unmittelbar berechnet werden, wenn die Dichten der Flüssigkeit und der Kugel sowie der Kugelradius bekannt sind und die Geschwindigkeit der konstant sinkenden Kugel gemessen wird.

- Bei Rotationsviskosimetern wird ein Zylinder in ein ebenfalls zylindrisches Messgefäß mit einem etwas größeren Durchmesser getaucht. Zwischen beide Zylinderoberflächen wird die zu prüfende Flüssigkeit gefüllt; dann wird mit einem Motor üblicherweise der innere Zylinder gleichmäßig gegen den äußeren gedreht und das dafür nötige Drehmoment als Maß für die wirkende Reibungskraft und somit – da die Zylindermasse bekannt sind – für die Viskosität gemessen. Bei professionellen Laborgeräten erfolgt die Auswertung automatisch über einen Mikroprozessor, der den berechneten Viskositätswert zugleich über ein Display ausgibt.
- Bei Kapillarviskosimetern lässt man ein bestimmtes Volumen der zu prüfenden Flüssigkeit durch ein dünnes, senkrecht aufgehängtes Glasrohr fließen. Die Viskosität der Flüssigkeit kann durch

Messung der Durchlaufzeit t berechnet werden, indem man diese mit der Dichte ρ der Flüssigkeit und einer für den Apparat angegebenen Konstanten K multipliziert.

2.8.2.8 Laminare und turbulente Strömungen



Bei geringen Geschwindigkeiten treten häufig so genannte laminare Strömungen auf. Dabei bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen, als würden sie sich in übereinander geschichteten Lamellen befinden. Das Geschwindigkeitsprofil in einem zylindrischen Rohr ist dabei parabelförmig und nimmt zur Mitte des Rohres hinzu.

Geschwindigkeitsprofil einer laminaren Strömung in einer Rohrleitung (Abb. 2.56).

Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz

Für laminare Strömungen eines Fluids durch ein Rohr mit einem Radius r und einer Länge l haben Gotthilf Hagen und Jean Poiseuille folgende Formel entdeckt, die auch die Viskosität η der Flüssigkeit berücksichtigt:

$$\Delta p = \frac{8 \cdot \eta \cdot l}{\pi \cdot r^4} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t}$$

Berücksichtigt man die Viskosität η und somit Reibungseffekte zwischen der Flüssigkeit und den Gefäßwänden, so bleibt der Gesamtdruck in einem geschlossenen Rohrsystem nicht konstant, sondern sinkt mit zunehmender Länge l des Rohrsystems ab. Die obige Formel beschreibt den zusätzlichen Druck Δp zwischen dem Anfang und dem Ende des Rohrsystems, der zum Aufrechterhalten des Volumenstroms $\frac{\Delta V}{t}$ notwendig ist.

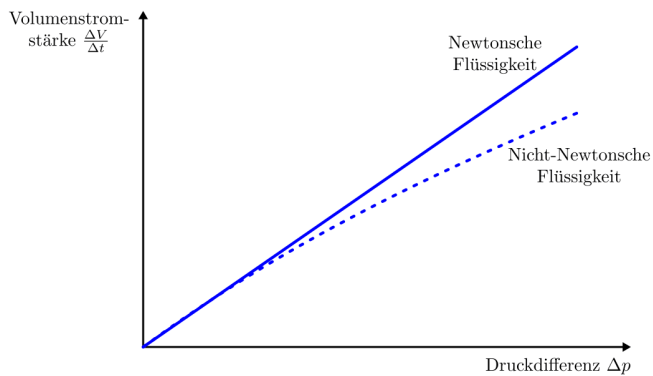
Das Hagen-Poiseuillesche Gesetz wurde unter Annahme der folgenden Bedingungen formuliert:

1. Der Rohrdurchmesser r ist konstant.
2. Es wirken keine äußeren Kräfte durch die Rohrwand hindurch.
3. Es treten ausschließlich Reibungskräfte, jedoch keine Trägheitskräfte auf. Dies ist der Fall, wenn die Flüssigkeit während der Bewegung im Rohr nicht beschleunigt wird. Man spricht in diesem Fall von einer „stationären“, also einer sich zeitlich nicht ändernden, Strömung.
4. Die Flüssigkeitsteilchen an der Rohrwand sind in Ruhe, für sie gilt also $v = 0$. Haftet die Flüssigkeit nicht an der Rohrwand, so wird dies vom Hagen-Poiseuilleschen Gesetz nicht berücksichtigt.
5. Die Dichte ρ_{Fl} der Flüssigkeit ist konstant, sie ändert sich also mit zunehmendem Druck nicht. Eine solche Inkompressibilität gilt in sehr guter Näherung für Flüssigkeiten, bei Gasen nur bei nicht zu hohen Strömungsgeschwindigkeiten.

In der Praxis wird das Hagen-Poiseuillesche üblicherweise für die Beschreibung von zähflüssigen Fluiden in engen Rohrsystemen genutzt, in denen die obigen Bedingungen zumindest näherungsweise erfüllt sind. Von besonderer Bedeutung ist, dass der zum Aufrechterhalten des Volumenstroms benötigte Druck mit indirekt proportional zur vierten Potenz des Gefäß-Radius zunimmt; dies bedeutet beispielsweise für den menschlichen Körper, dass eine zunehmende Verengung der Blutgefäße – insbesondere durch zu viel Cholesterin bei der Nahrungsaufnahme – mit Bluthochdruck und der Gefahr von Herzkrankheiten einhergeht.

Newtonsche Flüssigkeiten

Sind die Bedingungen für das Hagen-Poiseuillesche Gesetz erfüllt, so ist für eine Vergrößerung des Volumenstroms $\dot{V}$ eine proportional größere Druckdifferenz Δp nötig.



Trägt man die Volumenstromstärke als Funktion der Druckdifferenz aus, so ergibt sich eine Gerade. Fluide, auf die dieses Verhalten zutrifft, bezeichnet man als „Newtonsche Flüssigkeiten“.

Abb. 2.57 Volumenstromstärke-Druckdifferenz-Diagramm einer Newtonschen und einer Nicht-Newtonschen Flüssigkeit.

Da im Hagen-Poiseuilleschen Gesetz alle Größen bis auf η direkt messbar sind, kann es auch zur experimentellen Bestimmung der Zähigkeit eines Fluids genutzt werden.

2.8.2.9 Strömungswiderstand

Setzt man die Druckdifferenz Δp zwischen Anfang und Ende einer Rohrleitung in Relation zum Volumenstrom $\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t}$, so erhält man den so genannten Strömungswiderstand R_s . Es gilt also:

$$R_s = \frac{\Delta p}{\dot{V}}$$

Der Strömungswiderstand ist nicht nur abhängig von der Geometrie des Rohres, sondern auch noch von der Zähigkeit der durchströmenden Flüssigkeit. Der Kehrwert des Strömungswiderstands wird „Leitwert“ einer Kapillare genannt. Je geringer der Strömungswiderstand einer Newtonschen Flüssigkeit in einem Gefäß ist, desto steiler verläuft die Gerade im obigen Volumenstromstärke-Druckdifferenz-Diagramm. Da der Strömungswiderstand sowohl proportional zur Druckdifferenz Δp als auch proportional zur Länge l des Rohres ist, ergibt sich auch ein direkt proportionaler Zusammenhang zwischen Δp und ρ : Bei konstantem Durchmesser nimmt der Druck linear mit der Länge l des Rohres ab.

Muss eine Flüssigkeit mehrere Gefäße mit den Strömungswiderständen $R_1, R_2, \dots$ nacheinander durchlaufen, so ist der insgesamt auftretende Strömungswiderstand R_{Ges} gleich der Summe aller Teilwiderstände.

Für eine „Reihenschaltung“ mehrerer Strömungswiderstände gilt also: $R_{Ges} = R_1 + R_2 + \dots$

Können im umgekehrten Fall mehrere Kapillaren parallel durchlaufen werden, so addieren sich die Kehrwerte der Strömungswiderstände zum Kehrwert des Gesamtwiderstands. Da der Kehrwert des $\frac{1}{R}$ eines Strömungswiderstands mit dem Leitwert L identisch ist, können in diesem Fall also auch die Leitwerte addiert werden.

Für eine „Parallelschaltung“ mehrerer Strömungswiderstände gilt somit:

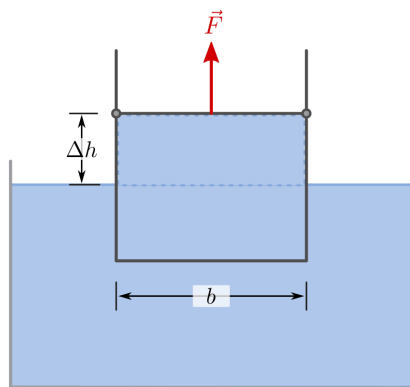
$$\frac{1}{R_{Ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad \text{bzw.}$$

$$L_{Ges} = L_1 + L_2 + \dots$$

Bei einer Reihenschaltung ist der Gesamt-Strömungswiderstand somit größer als der größte Teilwiderstand, bei einer Parallelschaltung geringer als der kleinste Teilwiderstand.

2.8.2.10 Oberflächenspannung und Kapillarität

Kräfte, die zwischen den Molekülen einer einzelnen Substanz wirken, bezeichnet man als Kohäsionskräfte.



Im Inneren einer Flüssigkeit heben sich durch das Zusammenwirken mehrerer Kräfte die einzelnen auf jedes Molekül wirkenden Kohäsionskräfte gegenseitig (weitgehend) auf. An der Oberfläche jedoch erfahren die Moleküle eine nach innen gerichtete, resultierende Kraft, welche beispielsweise die Moleküle einer Flüssigkeit in einem Tropfen zusammenhält.

Abb. 2.58 Kohäsionskräfte und resultierende Oberflächenspannung einer Flüssigkeit.

Durch die an der Oberfläche nach innen gerichteten Kohäsionskräfte ist die Oberfläche einer freien Flüssigkeit stets minimal. Einzelne Flüssigkeitstropfen besitzen eine Kugelform, da bei einem bestimmten Volumen die Kugel derjenige geometrische Körper mit der geringsten Oberfläche ist.

Möchte man ein Molekül von der Oberfläche einer Flüssigkeit „anheben“ oder herauslösen, so muss Arbeit gegen die Kohäsionskräfte verrichtet werden. Das Verhältnis aus der nötigen Arbeit W und der dadurch resultierenden Vergrößerung ΔA der Oberfläche wird spezifische Oberflächenenergie oder kurz Oberflächenspannung σ genannt:

$$\sigma = \frac{\Delta W}{\Delta A}$$

Die Oberflächenspannung eines Materials ist allgemein temperaturabhängig; am Gefrierpunkt ist sie am größten, mit zunehmender (absoluter) Temperatur wird sie geringer. Gelöste Stoffe oder Verunreinigungen können ebenfalls eine starke Verringerung der Oberflächenspannung bewirken, beispielsweise hat eine Seifenlösung eine deutlich geringere Oberflächenspannung als reines Wasser.

Um die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit experimentell zu bestimmen, kann man beispielsweise – ähnlich wie beim Seifenblasen-Machen – mittels eines Drahtbügels eine dünne Schicht aus der Flüssigkeitsoberfläche „herausziehen“.

2.8.2.11 Binnendruck

Betrachtet man eine Seifenblase im Querschnitt, so erkennt man, dass diese aus einer kreisförmigen und sehr dünnen Flüssigkeitsschicht besteht. Sowohl nach außen wie auch nach innen hin wird die Flüssigkeit durch eine Oberfläche begrenzt. Im Querschnitt kann der Umfang dieser beiden kreisförmigen Oberflächen jeweils mit $2 \cdot \pi \cdot r$ angegeben werden, da die Dicke der Seifenblasen-Haut gegenüber dem Radius r der Seifenblase selbst vernachlässigbar gering ist.

Die Oberflächenspannung wirkt kontraktiv, sie versucht also die Größe der Oberfläche zu minimieren; ohne eine weitere Kraft würde die Seifenblase kollabieren. Tatsächlich ist allerdings Luft in der Seifenblase enthalten, deren Druck p_i sich bei einer Kompression erhöht. Da dieser Druck nach außen hin auf die Oberfläche der Seifenblase einwirkt, stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der durch den Druck auf die Oberfläche ausgeübten Kraft $F_p = p_i \cdot A$ und der durch die Oberflächenspannung hervorgerufenen kontraktiven Kraft F_σ ein.

Der Druck p_i wird als „Binnendruck“ der Seifenblase bezeichnet; er gibt an, um wie viel größer der Druck der eingeschlossenen Luft gegenüber der Umgebungsluft ist. Der Binnendruck nimmt, wie sich aus der obigen Formel erkennen lässt, mit zunehmendem Radius ab. In großen Seifenblasen herrscht folglich ein kleinerer Binnendruck als in kleinen; treffen zwei Seifenblasen so aufeinander, dass ein Druckausgleich zwischen den eingeschlossenen Gasen möglich ist, so strömt die eingeschlossene Luft von der kleineren zur größeren Blase.

Für Flüssigkeitstropfen oder Luftblasen in einer Flüssigkeit gilt das gleiche Prinzip; da diese jedoch nur *eine* Oberfläche haben, ist der Binnendruck eines Tropfens nur halb so groß.

Arzneitropfen-Formel

Bei Tropf-Pipetten wird ebenfalls die durch die Oberflächenspannung bedingte Haltekraft ausgenutzt. Der untere, runde Glasrand der Pipette übernimmt dabei die Rolle des runden „Bügels“, mit dessen Hilfe die Oberfläche eines runden Tropfens vergrößert werden soll – allerdings wird hierbei nicht der Bügel gegen den Tropfen bewegt, sondern der am Pipettenrand hängende Tropfen bewegt sich aufgrund seiner während des Ausfließ-Vorgangs zunehmenden Gewichtskraft nach unten.

Im Grenzfall ist die durch die Oberflächenspannung bedingte Haltekraft F_σ exakt gleich groß wie die Gewichtskraft F_G des Tropfens. Die Tropfenmasse ist nur durch die Oberflächenspannung σ sowie den Radius r der Tropf-Pipette festgelegt. Da die Oberflächenspannung temperaturabhängig ist, muss allerdings mit geringfügigen Abweichungen vom Sollwert gerechnet werden.

Adhäsionskräfte und Benetzbarkeit

Kräfte, die zwischen den Molekülen einer flüssigen und einer festen oder zweier flüssiger beziehungsweise fester Substanzen wirken, bezeichnet man als Adhäsionskräfte. In Flüssigkeiten sind Adhäsionskräfte insbesondere an den Rändern des jeweiligen Gefäßes wirksam.



Abb. 2.59

Kohäsionskraft F_K und Adhäsionskraft F_A bei einer schlecht und einer gut benetzenden Flüssigkeit.

Je nachdem, ob die Kohäsions- oder die Adhäsionskräfte überwiegen, stellt sich zwischen der Gefäßwand und der Oberfläche der Flüssigkeit ein so genannter „Randwinkel“ ein:

- Ist der Randwinkel $\alpha > 90^\circ$, so überwiegen die Kohäsionskräfte; die Flüssigkeit ist schlecht benetzend.
- Ist der Randwinkel $\alpha < 90^\circ$, so überwiegen die Adhäsionskräfte und man bezeichnet die Flüssigkeit als benetzend.
- Bei einer ideal benetzenden Flüssigkeit ist $\alpha = 0^\circ$.

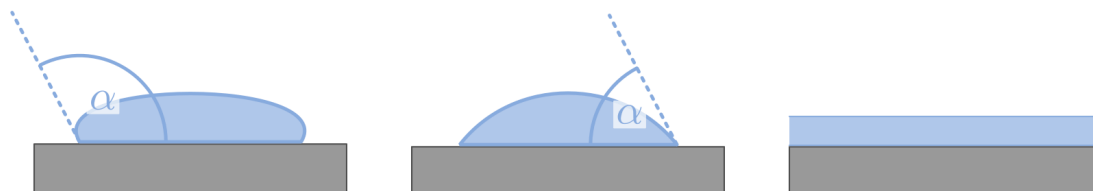


Abb. 2.60 „Tropfenform“ bei einer schlecht benetzenden, einer gut benetzenden und einer ideal benetzenden Flüssigkeit.

Kapillarität

Je enger ein Gefäß ist, desto deutlicher lassen sich Adhäsionskräfte beobachten. In sehr engen Röhren („Kapillaren“) kann der Effekt so stark sein, dass das Flüssigkeitsniveau je nach Benetzbarkeit höher oder niedriger sein kann als es bei miteinander verbundenen Gefäßen normalerweise der Fall wäre. Beispielsweise kann Wasser in einer Glasröhre mit einem Radius von 1,0mm bis zu 15mm nach oben gezogen werden, bei einem Radius von nur 0,5mm sind sogar Steighöhen von bis zu 30mm möglich.

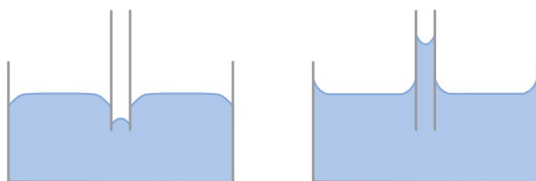


Abb. 2.61 Kapillardepression und Kapillaraszension bei nicht benetzenden beziehungsweise benetzenden Flüssigkeiten.

Bei dieser so genannten „Kapillarität“ herrscht nach der Benetzung der Randfläche durch die aufsteigende Flüssigkeit – ähnlich wie bei der Arzneitropfen-Formel – ein Gleichgewicht zwischen der Haltekraft F_σ durch die Oberflächenspannung und der Gewichtskraft F_G der zusätzlichen, zylinderförmigen Flüssigkeitssäule:

$$F_{\sigma} = \sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot r$$

$$F_G = \rho_{FI} \cdot V_{FI} \cdot g = \rho_{FI} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot g$$

Setzt man die Terme für diese beiden Kräfte gleich, so erhält man für die kapillare Steighöhe h :

$$\sigma \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \rho_{FI} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot g$$

$$\Rightarrow h = \frac{2 \cdot \sigma}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Bei dieser Herleitung wurde eine ideale Benetzung der Kapillarwand vorausgesetzt. Eine realistischere Formel für die kapillare Steighöhe erhält man, wenn man im Zähler des Bruchs durch einen zusätzlichen Faktor $\cos(\alpha) \leq 1$ eine gegebenenfalls nicht ideale Benetzbarkeit berücksichtigt:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\alpha)}{\rho \cdot g \cdot r}$$

Die maximale Steighöhe ergibt sich genau dann, wenn $\cos(\alpha) = 1$ beziehungsweise $\alpha = 0^\circ$ ist. Die Flüssigkeit ist in diesem Grenzfall ideal benetzend und wird somit quasi senkrecht an der Gefäßwand emporgezogen. Ist bei einer schlechten Benetzung der Randwinkel α hingegen größer als 90° , so ist $\cos(\alpha) < 0$; man erhält in diesem Fall folglich keine Kapillaraszension, sondern eine Kapillardepression.

Die kapillare Steighöhe ist neben der Oberflächenspannung und der Dichte als Materialkonstanten nur vom Radius der Gefäßröhre abhängig. Die obige Formel kann auch genutzt werden, um aus einer Messung der Steighöhe, des Röhrenradius und des Randwinkels die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit zu bestimmen.

2.8.3 Mechanik der Gase

In der Aerodynamik werden die mechanischen Eigenschaften von Gasen, insbesondere von Luft, untersucht.

2.8.3.1 Druck und Volumen

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Gasen und Flüssigkeiten besteht darin, dass Gase verhältnismäßig leicht komprimierbar sind; ihr Volumen V nimmt also ab, wenn von außen ein erhöhter Druck p auf einen verformbaren Gasbehälter (beispielsweise einen Luftballon) ausgeübt wird. Lässt der Druck wieder nach, so nimmt entsprechend auch das Volumen des Gases wieder zu.

Bleibt die Temperatur des Gases während eines Kompressions- beziehungsweise Expansionsvorgangs konstant, so gilt: $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$

Wichtig: Für p_1 und p_2 müssen bei Verwendung dieser Formel stets **absolute** Druckwerte eingesetzt werden; zu einem mittels eines Manometers gemessenen Druckwert muss also stets der Luftdruck (rund 1bar) hinzuaddiert werden.

Die Volumina eines Gases verhalten sich also indirekt proportional zu den jeweils vorherrschenden Druckwerten. Grafisch kann dieser Zusammenhang mittels eines $p(V)$ -Diagramms dargestellt werden.

Das Boyle-Mariottesche Gesetz beschreibt die indirekte Proportionalität zwischen Druck und Volumen.

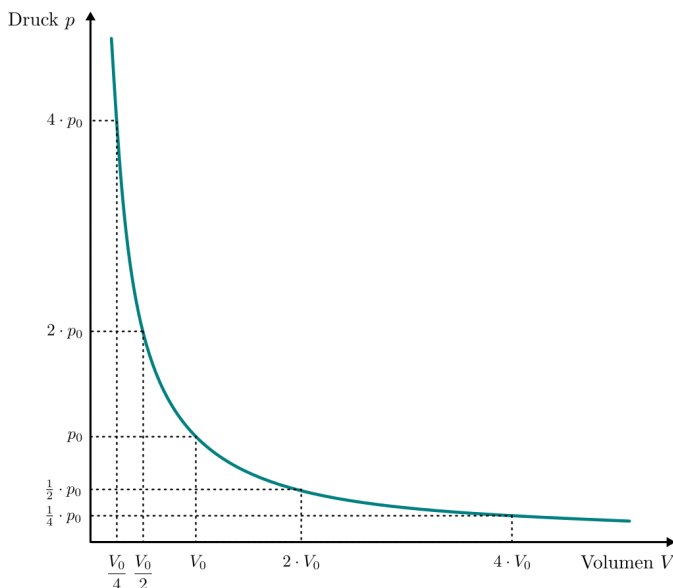


Abb. 2.62 Die Kurve im $p(V)$ –Diagramm wird durch eine Hyperbel beschrieben; man kann erkennen, dass das Volumen des Gases auch bei sehr hohem Druck nicht gleich Null werden kann, und umgekehrt durch eine zunehmende „Verdünnung“ der Luft ebenso immer ein Restdruck verbleibt.

Mittels sogenannter Vakuumpumpen, die im Gegensatz zu Kompressoren die Luft lediglich immer weiter verdünnen, kann somit kein echtes Vakuum erzeugt werden, sondern nur ein sich asymptotisch an $p = 0 \text{ Pa}$ annähernder Druckwert.

2.8.3.2 Luftdruck und Barometrische Höhenformel

Gase haben – im Verhältnis zu Flüssigkeiten – eine nur sehr geringe Masse. Während ein Liter Wasser ein Kilogramm schwer ist, wiegt ein Liter Luft unter Normalbedingungen gerade einmal knapp $1,3 \text{ g}$. Dennoch bewirkt auf unserem Planeten das Gewicht der Luft, ähnlich wie beim Schweredruck in Flüssigkeiten, einen so genannten Luftdruck, der umso größer ist, je weiter unten man sich in dem die Erde umgebenden „Luftmeer“ befindet.



Der „normale“ Luftdruck $p_0 \approx 1,0 \text{ bar}$ in Bodennähe resultiert aus dem Gewicht der darüber liegenden Luftschichten.

Da für $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ gilt, entspricht der durch die Luft ausgeübte Druck in Bodennähe rund einem Gewicht von 10 t je Quadratmeter beziehungsweise 1 kg je Quadrat-Zentimeter.

Abb. 2.63 Veranschaulichung der Größe des „normalen“ Luftdrucks (1 bar).

Bei Standardbedingungen, das heißt einem Luftdruck von $p_0 = 1,01325 \text{ bar}$ und einer Temperatur von $T_0 = 0^\circ \text{C}$ nimmt ein Mol eines beliebigen Gases ein Volumen von $V_0 = 22,4 \text{ l}$ ein („Normalvolumen“). Da die Masse eines Gases in einem geschlossenen System gleichbleibt, bewirkt eine Veränderung des Gasvolumens V neben einer Veränderung des Drucks auch eine Veränderung der Gasdichte ρ . Es gilt:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{p_1}{p_2}$$

Bei einem niedrigen Gasdruck nimmt das Volumen eines Gases zu, seine Dichte hingegen ab; in höheren Luftschichten ist daher die Luft „dünner“. Für den Luftdruck p gilt in Abhängigkeit von der Höhe h die so genannte „barometrische Höhenformel“:

$$p = p_0 \cdot e^{-\frac{h}{h_s}}$$

Hierbei ist p_0 der Luftdruck auf Meereshöhe und h_s eine so genannte „Skalenhöhe“, die angibt, ab wie vielen Metern der Druck auf $1/e \approx 36,8\%$ des ursprünglichen Werts p_0 abfällt.

Technisch wird der Zusammenhang zwischen Druck und Dichte beispielsweise in Vakuumpumpen genutzt, mit deren Hilfe das zu evakuierende Luftvolumen schrittweise verdünnt wird; im umgekehrten Fall kann

mittels Kompressoren oder Luftpumpen das Luftvolumen kontinuierlich verkleinert werden. Das Luftvolumen kann jedoch nicht unendlich vergrößert oder verkleinert werden.

2.8.4 Auftrieb in Gasen

Für die (statische) Auftriebskraft F_A in Gasen gilt die gleiche Formel wie für die Auftriebskraft in Flüssigkeiten:

$$F_A = \rho_G \cdot g \cdot V_K$$

Hierbei bezeichnet V_K das Volumen des Körpers, g die Erdbeschleunigung und ρ_G die Dichte des Gases. Da die Dichte von Luft $\rho_{Luft} \approx 1,3 \frac{kg}{m^3}$ unter Normalbedingungen rund 1000-mal kleiner ist als die Dichte von Wasser $\rho_{Wasser} \approx 1000 \frac{kg}{m^3}$, können in Luft nur Körper mit einer sehr geringen (durchschnittlichen) Dichte aufsteigen. Die Steighöhe beispielsweise von Ballonen wird zudem dadurch begrenzt, dass die Dichte der Luft mit zunehmender Höhe abnimmt.

2.9 SCHWINGUNGEN UND WELLEN

In der Natur und in technischen Anwendungen treten häufig zeitlich periodische Vorgänge auf.

2.9.1 Mechanische Schwingungen

Eine Schwingung entspricht allgemein einer zeitlich periodischen Änderung einer physikalischen Größe. Mechanische Schwingungen im Speziellen beschreiben Vorgänge, bei denen sich ein Körper regelmäßig um eine Gleichgewichtslage („Ruhelage“) bewegt.

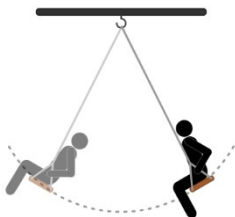
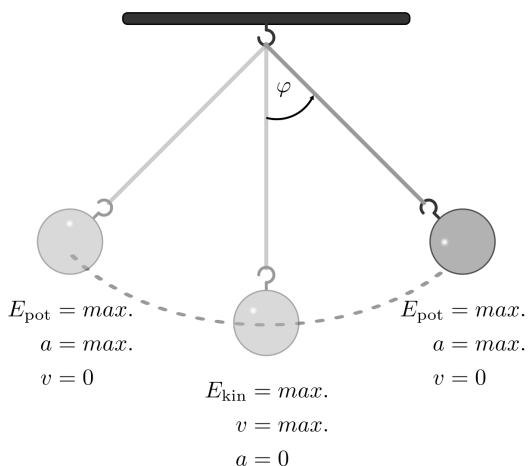


Abb. 2.64 Das Schaukeln als mechanische Schwingung.



Bei jedem Durchlauf ändern sich dabei der Abstand von der Gleichgewichtslage beziehungsweise der Auslenkwinkel φ , die Beschleunigung a , die Geschwindigkeit v und die damit verbundene Lage- und Bewegungsenergien E_{pot} und E_{kin} in regelmäßiger Weise.

Abb. 2.65 Periodische Veränderung physikalischer Größen beim Pendel.

Schwingungen treten auf, wenn ein schwingungsfähiger Körper (auch „Schwinger“ oder „Oszillator“ genannt) durch Energiezufuhr aus der Gleichgewichtslage („Ruhelage“) ausgelenkt wird. Zusätzlich ist stets eine zur Ruhelage rücktreibende Kraft vorhanden, die den schwingenden Körper daran hindert die Bahn zu verlassen.

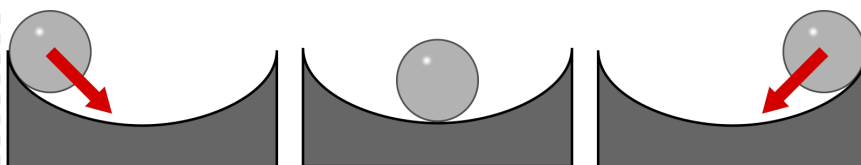


Abb. 2.66 Eine Kugel in einer „Half-Pipe“ erfährt bei Auslenkung eine zur Gleichgewichtslage rückwirkende Kraft.

Ohne wirkende Reibungskräfte wiederholt sich der Schwingungsvorgang (theoretisch) unendlich oft.

2.9.1.1 Amplitude, Schwingungsdauer und Frequenz

Der zeitliche Verlauf der Auslenkung eines schwingenden Körpers kann mittels eines Weg-Zeit-Diagramms dargestellt werden. Dabei ergibt sich ein für den jeweiligen Schwinger charakteristischer, periodischer Kurvenverlauf.

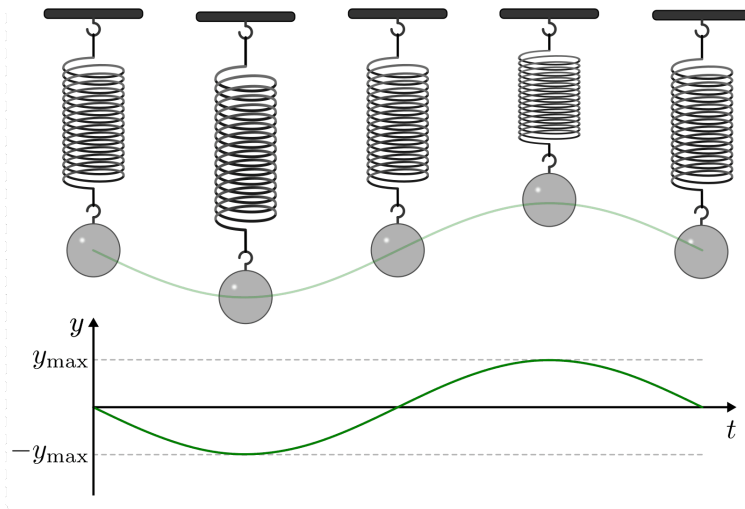


Abb. 2.67 Vertikale Schwingung eines an einer Schraubenfeder aufgehängten Gewichts.

Hat die Weg-Zeit-Funktion einer Schwingung die Form einer Sinus-Funktion, so bezeichnet man die Schwingung als harmonisch; andernfalls nennt man sie unharmonisch.

Jede Schwingung kann durch folgende Größen beschrieben werden:

- Die Auslenkung y (auch „Elongation“ genannt) gibt den momentanen Abstand des schwingenden Körpers von der Gleichgewichtslage an. Die maximale Auslenkung $y_{\max}$ wird als Amplitude bezeichnet.
- Die Schwingungsdauer T gibt an, wie viel Zeit der schwingende Körper für eine vollständige Hin- und Her-Bewegung („Periode“) benötigt.

Anstelle der Schwingungsdauer wird häufig auch mit der Frequenz f einer Schwingung gerechnet. Sie gibt die Anzahl an Schwingungen n an, die ein Körper in einer bestimmten Zeit t ausführt. Für einen einzigen Schwingungsvorgang ($n = 1$) benötigt ein schwingender Körper genau die Zeitdauer $t = T$. Somit gilt:

$$f = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}$$

Frequenzen werden in der nach Heinrich Hertz benannten Einheit „Hertz“ (Hz) angegeben. Eine Frequenz von $1 \text{ Hz} = \frac{1}{\text{s}}$ bedeutet, dass in einer Sekunde genau ein Schwingungsvorgang stattfindet.

2.9.1.2 Gedämpfte Schwingungen

Mechanische Schwingungen setzen sich, falls keine Reibungskräfte wirken, ungedämpft fort; ihre Amplitude bleibt also zeitlich konstant. Reale Schwingungen hingegen kommen, sofern ihnen nicht regelmäßig Energie zugeführt wird, nach einer gewissen Zeit zum Erliegen. Einen Vorgang, bei denen die Amplitude stetig abnimmt, bezeichnet man als gedämpfte Schwingung.

Ist die Dämpfung abhängig von der Geschwindigkeit, was beispielsweise bei Luftreibung der Fall ist, so nimmt die anfängliche Amplitude y_0 exponentiell mit der Zeit ab. Für die Amplitude y zum Zeitpunkt t gilt dabei in Abhängigkeit vom Dämpfungsgrad δ :

$$y(t) = y_0 \cdot e^{-\delta \cdot t}$$

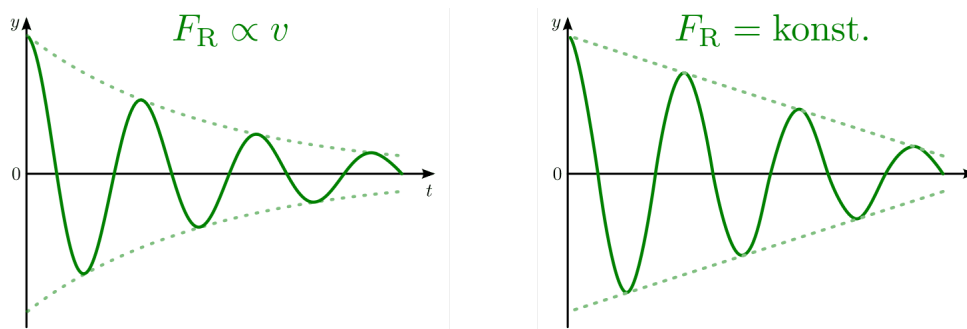


Abb. 2.68 Zeitlicher Verlauf einer Schwingung mit geschwindigkeitsabhängiger bzw. konstanter Dämpfung.

Ebenfalls möglich ist eine konstante dämpfende Kraft, beispielsweise infolge von (Gleit-)Reibung. In diesem Fall ist die Differenz zweier benachbarter Amplituden konstant, die Amplitude der Schwingung nimmt somit linear ab.

Jede Dämpfung bewirkt bei Schwingungen eine Verkleinerung der Frequenz beziehungsweise eine Vergrößerung der Schwingungsdauer.

2.9.1.3 Erzwungene Schwingungen und Resonanz

Wird ein schwingendes System einmalig angeregt und dann sich selbst überlassen, so führt es Schwingungen mit seiner Eigenfrequenz f_0 aus. Wird die Energie jedoch über einen längeren Zeitraum hinweg periodisch zugeführt, so führt das schwingende System – nach einer kurzen Übergangszeit – so genannte „erzwungene“ Schwingungen mit der Frequenz f_a des anregenden Systems aus.

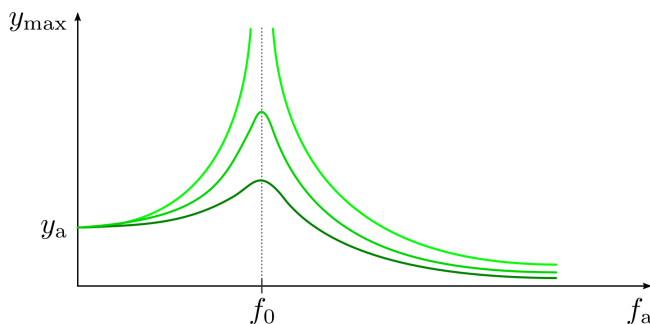


Abb. 2.69 Amplitude einer erzwungenen Schwingung in Abhängigkeit von der anregenden Frequenz. Hellere Kurven kennzeichnen eine schwächere Dämpfung.

Die Amplitude der angeregten Schwingungen ist von der Erregerfrequenz f_E abhängig. Stimmt diese mit der Eigenfrequenz f_0 des angeregten Systems überein, so spricht man von Resonanz. Die Amplitude A des angeregten Systems wird in diesem Fall maximal.

Trägt man die Amplitude A in Abhängigkeit der Erregerfrequenz auf, so erhält man eine so genannte „Resonanzkurve“. Das Resonanzmaximum ist umso ausgeprägter (schmäler und höher), je geringer der Dämpfungsgrad ist. Bei sehr schwachen Dämpfungen kann sich das angeregte System also zu sehr großen Amplituden „aufschaukeln“, was im technischen Bereich teilweise absichtlich genutzt, teilweise aber auch gezielt vermieden wird:

- Resonanzeffekte werden beispielsweise zur Entfernung von Nierensteinen genutzt; dabei werden diese mit hoch intensivem Ultraschall unterschiedlicher Frequenz behandelt. Die spröden Steine können dabei, wenn jeweils die richtige Frequenz getroffen wird, zu so großen Schwingungen angeregt werden, dass sie in kleinere, für den Körper nicht mehr gefährliche Teilstücke zerfallen.
- Resonanzeffekte werden möglichst immer vermieden, wenn damit mechanische Belastungen verbunden sind. Beispielsweise durchlaufen Wäscheschleudern am Anfang und am Ende eines Schleudergangs kontinuierlich eine Vielzahl an unterschiedlichen Frequenzen (Drehzahlen). Bei ungünstigen Frequenzwerten kommt es zu großen Schwingungsamplituden des an Schraubenfedern aufgehängten Schleuderbehälters. Durch Ausgleichsgewichte versucht man in diesem Fall die Unwucht und das damit verbundene hörbare „Klappern“ gering zu halten.

Bei Drehbewegungen wird die Resonanzfrequenz als kritische Drehzahl bezeichnet. Eine besondere Bedeutung hat der Resonanzeffekt zudem in der Akustik, beispielsweise, wenn mitschwingende Klangkörper eine Verstärkung eines bestimmten Tons bewirken sollen.

2.9.2 Mathematische Beschreibung harmonischer Schwingungen

Die mathematische Beschreibung eines harmonisch schwingenden Gegenstands („Oszillators“) wird häufig als Basis-Modell in der theoretischen Physik genutzt. In diesem Abschnitt wird daher das grundlegende mathematische Konzept kurz vorgestellt.

2.9.2.1 Schwingungsgleichungen

Ein Körper führt genau dann eine harmonische Schwingung aus, wenn auf ihn eine Kraft wirkt, die proportional zu seiner Auslenkung ist und stets in Richtung der Ruhelage zeigt; die Dämpfung der Schwingung sollte vernachlässigbar gering ist.

2.9.2.2 Das Federpendel

In guter Näherung werden diese Bedingungen von einem Pendelkörper, der an einer hängenden Schraubenfeder befestigt ist, erfüllt. Bei einer Auslenkung s aus der Ruhelage ist die rücktreibende Kraft gleich der Spannkraft F_s der Schraubenfeder. Diese hängt von der Federhärte D ab und ist der Auslenkung entgegengesetzt:

$$F = -D \cdot s$$

Die Kraft ruft im schwingenden Gegenstand eine Beschleunigung a hervor, die als $F = m \cdot a$ beschrieben werden kann, wobei m die Masse des Oszillators symbolisiert. Die Beschleunigung a entspricht nun gerade der zeitlichen Änderung der Geschwindigkeit, welche wiederum einer zeitlichen Änderung des Ortes beziehungsweise der Auslenkung entspricht.

Ein Ansatz für den zeitlichen Verlauf der Auslenkung s lautet: $s = \sin(\omega \cdot t)$

Dabei gibt ω die so genannte „Oszillator-Frequenz“ an. Sie erinnert an die Winkelgeschwindigkeit einer kreisförmigen Bewegung, denn multipliziert mit der Zeit t beschreibt sie den Ort, an dem sich der periodisch schwingende Körper gerade befindet.

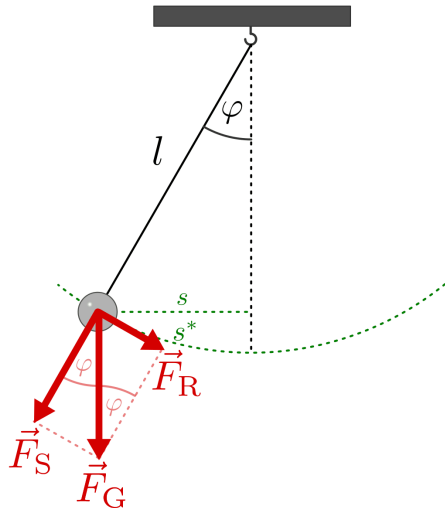
Die Oszillator-Frequenz des schwingenden Pendelkörpers ist umso größer, desto größer die Federkonstante („Härte“) D der Schraubenfeder ist. Andererseits schwingt der Oszillator umso schneller, desto geringer seine Masse m ist.

Die Weg-Zeit-Funktion $s = \sin(\omega \cdot t)$ kann auch graphisch als Diagramm dargestellt werden. Es ergibt sich der für harmonische Schwingungen typische sinusförmige Verlauf. Je schneller der Pendelkörper schwingt, desto schmaler werden die „Berge und Täler“ der Sinus-Kurve; je größer die maximale Auslenkung ist, desto höher bzw. tiefer liegen die Hoch- und Tiefpunkte.

Die Sinus-Funktion eignet sich als Ansatz, wenn der Pendelkörper zu Beginn in der Ruhelage ist und in dieser Position von außen „angestoßen“ wird. Ist der maximal ausgelenkt und wird von dieser Position aus losgelassen, so ist die Kosinus-Funktion als Ansatz besser geeignet.

Die oben hergeleiteten Ergebnisse lassen sich beispielsweise auch auf die Schwingungen eines gefederten Fahrzeugs oder einer gefedert gelagerten Maschine (z.B. Waschmaschine) übertragen.

2.9.2.3 Das Fadenpendel



Auch Schwingungen eines Fadenpendels haben – bei nicht zu großer Auslenkung des Pendelkörpers – annähernd einen sinusförmigen Verlauf. Ist die Masse des Fadens vernachlässigbar klein und die Größe des Pendelkörpers klein im Vergleich zur Fadenlänge, so spricht man von einem mathematischen Pendel.

Abb. 2.70 Schematischer Aufbau eines Fadenpendels.

Die rücktreibend wirkende Kraft einer Pendelschwingung lässt sich bestimmen, indem man die Gewichtskraft F_G des Pendelkörpers in zwei Teilkräfte (längs und quer zur Schwingungsrichtung) zerlegt: Die Teilkraft F_S in Seilrichtung hält den Faden gespannt, die Teilkraft F_R in Schwingungsrichtung entspricht der rücktreibenden Kraft. Ist der Auslenkungswinkel φ klein, so ist die Länge s^* des Kreisbogens näherungsweise gleich dem waagrechten Abstand s des Pendelkörpers von der Ruhelage.

Für die rücktreibende Kraft F_R gilt mit $\sin(\varphi) = \frac{s}{l}$:

$$F_R = F_G \cdot \sin(\varphi) = m \cdot g \cdot \frac{s}{l} = \frac{m \cdot g}{l} \cdot s$$

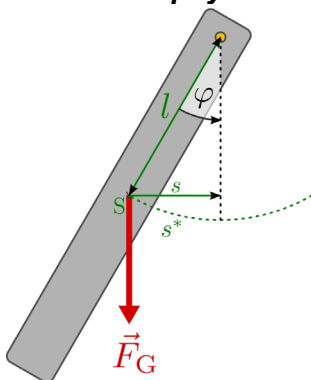
Der Term $\frac{m \cdot g}{l}$ hat somit die gleiche Bedeutung für das Fadenpendel wie die Federhärte D für das Federpendel. Man bezeichnet ihn daher auch als „Richtgröße“ D eines mathematischen Pendels.

Für die Oszillatorfrequenz eines mathematischen Pendels gilt: $\omega = \sqrt{\frac{g}{l}}$

Experimentell bestätigt sich, dass die Schwingungsfrequenz eines Fadenpendels zwar von der Länge l des Pendels, aber nicht von der Masse des Pendelkörpers abhängig ist. Bei kleinen Auslenkungen ($\varphi < 10^\circ$) ist die Frequenz bzw. Schwingungsdauer zudem unabhängig von der Amplitude.

Pendel, bei denen die obigen Bedingungen erfüllt sind, nennt man Fadenpendel oder auch mathematische Pendel. Im Gegensatz dazu bezeichnet man beliebige, drehbar aufgehängte Gegenstände als physikalische Pendel.

2.9.2.4 Das physikalische Pendel



Führt ein beliebiges, drehbar gelagertes Objekt Schwingungsbewegungen aus, so können diese bei nur kleinen Auslenkungen und bei Vernachlässigung des Luftwiderstands ebenfalls als harmonische Schwingungen beschrieben werden.

Abb. 2.71 Schematischer Aufbau eines Physikalischen Pendels.

Die rücktreibende Größe ist in diesem Fall das Drehmoment $\vec{M} = \vec{s} \times \vec{F}_G$ des Körperschwerpunkts bezüglich der Drehachse; dabei bezeichnet s den horizontalen Abstand des Schwerpunkts von der Ruhelage.

Für $\varphi \neq 0$ gilt für die Oszillator-Frequenz ω eines physikalischen Pendels:

$$J \cdot \omega^2 = m \cdot g \cdot l \quad \Leftrightarrow \quad \omega = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot l}{J}}$$

Die Oszillator-Frequenz ω eines physikalischen Pendels hängt somit von der Masse des schwingenden Objekts, der Lage seines Schwerpunkts sowie von seinem Trägheitsmoment bezüglich dem Aufhängepunkt ab. Bei dieser Frequenz sind ebenfalls Resonanz-Effekte am stärksten ausgeprägt.

2.9.2.5 Energiebilanz beim Feder- und Fadenpendel

Die Beziehung zwischen der Geschwindigkeit v des Pendelkörpers bei einer harmonischen Schwingung und der Winkelgeschwindigkeit („Kreisfrequenz“) ω einer ebenso „schnellen“ Rotationsbewegung kann auch ohne Differentialrechnung hergeleitet werden, wenn man die Energiebilanz der Schwingung betrachtet. Nach dem Energie-Erhaltungssatz ist die maximale kinetische Energie (beim Durchgang durch die Ruhelage) gleich der maximalen potentiellen Energie (am Umkehrpunkt). Bei einem Federpendel ist $E_{pot} = E_{spann} = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$, wobei D die Federhärte und s die Auslenkung bezeichnet. Es gilt also:

$$E_{kin,max} = E_{pot,max}$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot D \cdot s^2$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{D}{m}} \cdot s$$

Vergleicht man diesen Zusammenhang mit der Gleichung $v = \omega \cdot r$, so entspricht der Radius r der Kreisbewegung der Auslenkung s aus der Ruhelage. Der Term $\sqrt{\frac{D}{m}}$ hingegen entspricht der Winkelgeschwindigkeit ω .

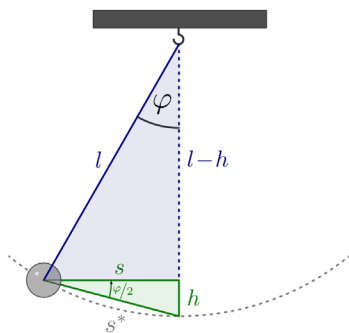


Abb. 2.72 Skizze zur Herleitung der Energiebilanz bei einem Fadenpendel.

Bei einem Fadenpendel ergeben sich harmonische Schwingungen in guter Näherung wiederum nur für kleine Winkel, für die die Näherung $\sin \varphi \approx \varphi$ gilt. In diesem Fall können, wie in der obigen Abbildung zu sehen, zwei Winkelbeziehungen verwendet werden:

$$\varphi \approx \sin(\varphi) = \frac{s}{l} \quad \text{und:} \quad \frac{\varphi}{2} \approx \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) \approx \frac{h}{s}$$

Löst man die zweite Gleichung nach φ auf, so erhält man $\varphi \approx \frac{2 \cdot h}{s}$. Dieser Ausdruck kann mit der ersten Gleichung gleichgesetzt werden. Aufgelöst nach h erhält man folgende Näherung:

$$\frac{s}{l} = \frac{2 \cdot h}{s} \quad \Leftrightarrow \quad h = \frac{1}{2} \cdot \frac{s^2}{l}$$

Setzt man diesen Ausdruck für h in die Energiegleichung ein, erhält man:

$$E_{kin,max} = E_{pot,max}$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot h$$

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = m \cdot g \cdot \frac{s^2}{2 \cdot l}$$

$$\Rightarrow v = \sqrt{\frac{g}{l}} \cdot s$$

Bei dieser entspricht nun der Term $\sqrt{\frac{g}{l}}$ der Winkelgeschwindigkeit ω ; die Näherung gilt allerdings nur für kleine Auslenkungen.

2.9.2.6 Zeitliche Änderung von Auslenkung und Geschwindigkeit

Sowohl die Auslenkung s wie auch die Geschwindigkeit v haben bei Schwingungsvorgängen sich periodisch ändernde Werte. Der zeitliche Verlauf hängt von der Anfangsbedingung ab. Befindet sich ein Pendel zum Zeitpunkt $t = 0$ in der Ruhelage und bewegt sich dabei mit einer Geschwindigkeit $v > 0$ auf einen Umkehrpunkt zu, so kann im Fall einer harmonischen Schwingung die Auslenkung zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt t mittels der Sinus-Funktion beschrieben werden:

$$s(t) = s_{max} \cdot \sin(\varphi) = s_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Hierbei ist wiederum die Vorstellung entscheidend, dass jede harmonische Schwingung mit einer Bewegung eines bestimmten Punktes auf einer Kreisscheibe verglichen werden kann. Beginnt die Schwingung nicht bei der Ruhelage, sondern an einem anderen Punkt, so muss zusätzlich eine „Phasenverschiebung“ um einen Winkel von φ_0 berücksichtigt werden. Es gilt also allgemein:

$$s(t) = s_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

Ist im Speziellen $\varphi_0 = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$, so ist die verschobene Sinus-Funktion mit der entsprechenden Cosinus-Funktion identisch:

$$\sin(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}) = \cos(\omega \cdot t)$$

Beginnt die Schwingung also zum Zeitpunkt $t = 0$ an einem Umkehrpunkt und hat hierbei die Geschwindigkeit $v(t_0) = 0$, so ist beispielsweise die Cosinus-Funktion für die Beschreibung der zeitlichen Änderung der Auslenkung besser geeignet.

Sowohl die Sinus- wie auch die Cosinus-Funktion haben eine Periode von 2π .

Löst man die Beziehung $\omega = \frac{2\pi}{T_0}$ nach der Schwingungsdauer T_0 auf, so erhält man für $t = T_0$ tatsächlich wieder den gleichen Wert wie für $t = 0$.

Beginnt die Schwingung beispielsweise an einem der Umkehrpunkte, so wird nach $\frac{1}{4} T_0$ zum ersten Mal die Ruhelage durchlaufen.

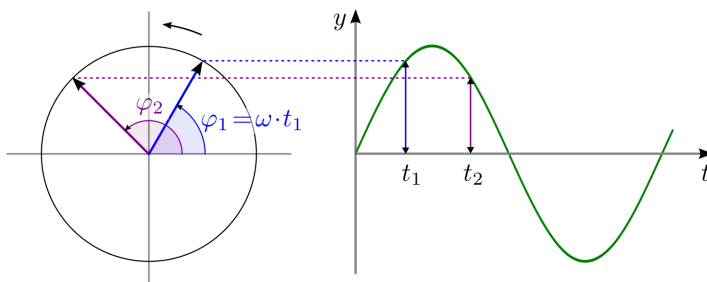


Abb. 2.73 Zeigerdarstellung einer sinusförmigen Schwingung.

In der obigen Abbildung ist der zeitliche Verlauf der Phasenwinkel für ein horizontal schwingendes Pendel im so genannten „Zeigerdiagramm“ dargestellt. Diese Darstellung ist insbesondere praktisch, um mehrere

Schwingungen gleichzeitig darzustellen: Unterschiedliche Zeigerlängen bedeuten verschiedene Amplituden, und unterschiedliche Winkelgeschwindigkeiten bedeuten verschiedene Frequenzen. Die einzelnen Schwingungszustände beziehungsweise Phasen sind zudem am Winkel des jeweiligen Zeigers zu erkennen.

2.9.3 Mechanische Wellen

Bestehen Wechselwirkungen zwischen einzelnen schwingenden Objekten, so kann sich der Schwingungszustand eines Oszillators jeweils auf die benachbarten Oszillatoren ausbreiten. Eine solche räumliche Ausbreitung eines Schwingungszustands infolge von Kopplungseffekten bezeichnet man als (mechanische) Welle. Durch Wellen wird also ausschließlich Energie, jedoch keine Materie übertragen.

Beispiele:

- Seilwellen entstehen, wenn ein Seil periodisch in Querrichtung hin und her bewegt wird.
- Schallwellen entstehen durch schnelle Schwingungen eines elastischen Körpers, beispielsweise einer Lautsprechermembran oder einer Stimmgabel.
- Wasserwellen entstehen meist dadurch, dass Wind über die ansonsten glatte Wasseroberfläche streift. Die Wasseroberfläche hebt und senkt sich dadurch in periodischen Abständen.

In Diagrammen wird bei Wellen – anders als Schwingungen – meistens nicht der zeitliche, sondern der räumliche Verlauf dargestellt. Fällt ein Stein ins Wasser, so entstehen um die Eintauchstelle kreisförmige Wellen, die sich nach allen Seiten ausbreiten. Von oben betrachtet ergeben sich in diesem Fall konzentrische Kreise mit zunehmendem Radius; in der Seitenansicht haben die Wellen näherungsweise einen räumlich periodischen Verlauf. Ist die Wellenform sinusförmig (beispielsweise bei Seilwellen), so nennt man die Welle harmonisch, andernfalls nennt man sie unharmonisch (beispielsweise Wasserwellen).

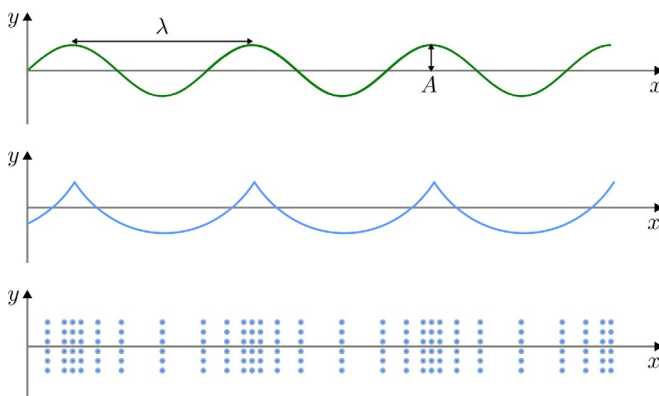


Abb. 2.74 Formen mechanischer Wellen: Seilwelle,

Wasserwelle und

Luftwelle (Schall).

Längswellen und Querwellen

Allgemein werden Wellen in so genannte Längs- und Querwellen unterteilt:

- Bei Längswellen verlaufen die Schwingungen parallel zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Dies ist beispielsweise bei Druck- oder Schallwellen in Luft der Fall.
- Bei Querwellen verlaufen die Schwingungen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Dies ist beispielsweise bei Seilwellen oder Schwingungen von Instrumentensaiten sowie bei elektromagnetischen Wellen bzw. Lichtwellen der Fall.

Längswellen sind grundsätzlich mit einer Ausbreitung von Verdünnungen und Verdichtungen des Trägermediums verbunden, so dass sie sich nur in komprimierbaren Materialien ausbreiten können. In manchen Fällen, beispielsweise bei Erdbebenwellen oder bei Schallwellen in Flüssigkeiten und Festkörpern, treten Längs- und Querwellen gleichzeitig auf.

2.9.3.1 Ausbreitung von Wellen

Zur physikalischen Beschreibung einer Welle werden die gleichen Größen wie zur Beschreibung von Schwingungen verwendet. Zusätzlich sind zwei weitere Begriffe für die Beschreibung von Wellen nützlich:

- Alle Punkte, die vom Ausgangspunkt einer Welle den jeweils gleichen zeitlichen Abstand haben, werden „Wellenfront“ genannt. Bei periodischen Wellen haben alle Punkte einer Wellenfront den gleichen Schwingungszustand („Phase“).

- Die so genannte Wellenlänge λ gibt die räumliche Periode einer Welle an, das heißt den räumlichen Abstand zweier Wellenfronten. Die Wellenlänge wird in Metern angegeben.
- Die Ausbreitungsrichtung von Wellen ist stets senkrecht zu den einzelnen Wellenfronten.

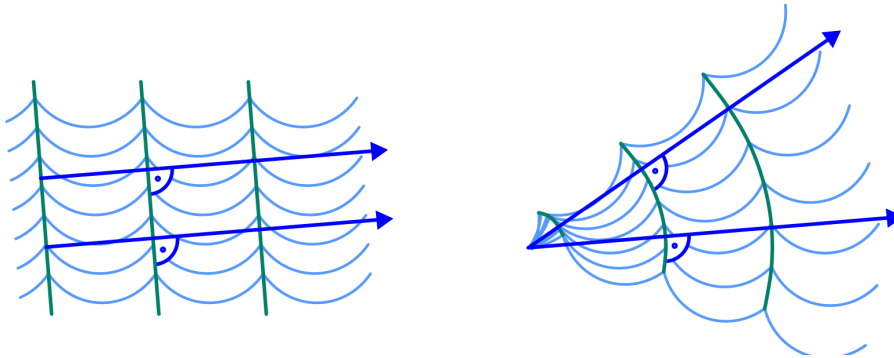


Abb. 2.75 Wellenfronten und Ausbreitungsrichtungen bei linearen und kreisförmigen Wellen.

Die Geschwindigkeit, mit der sich die einzelnen Wellenfronten ausbreiten, wird als Ausbreitungs- oder Phasengeschwindigkeit v der Welle bezeichnet. Die Richtung von v ist dabei stets senkrecht zur Wellenfront. In vielen Materialien, insbesondere in Luft, breiten sich die einzelnen Wellenfronten – nahezu unabhängig von der Frequenz der Wellen – mit der gleichen Ausbreitungsgeschwindigkeit fort. Zwischen der Frequenz f der Welle und der Wellenlänge λ gilt dabei folgender wichtiger Zusammenhang, der bisweilen auch „Wellenformel“ genannt wird:

$$v = \lambda \cdot f$$

Anschaulich kann man sich diese Gleichung vorstellen, wenn man sich die Wellenfronten unterschiedlicher Frequenz als zwei gemeinsam wandernde Spaziergänger mit unterschiedlicher Schrittlänge vorstellt. Da sich beide mit der gleichen Geschwindigkeit $v = \text{konst}$ fortbewegen, muss der Spaziergänger mit der kürzeren Schrittlänge eine entsprechend höhere Schrittfrequenz haben.

In der Akustik breiten sich entsprechend alle Schallwellen mit unterschiedlicher Frequenz (Tonhöhe) in den meisten Materialien gleich schnell aus, in der Optik breiten gilt das gleiche für Lichtwellen unterschiedlicher Frequenz (Farbe). Für die Schallgeschwindigkeit in Luft gilt dabei $c_0 = v_{\text{Schall}} \approx 330 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, für die Lichtgeschwindigkeit gilt $c_0 = v_{\text{Licht}} \approx 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Kennt man die Frequenz oder die Wellenlänge einer Licht- oder Schallwelle, so kann man mittels obiger Gleichung unmittelbar die zugehörige fehlende Größe berechnen.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit v von Wellen hängt von Materialeigenschaften des Wellenträgers ab.

Die Schallgeschwindigkeit in Luft nimmt mit zunehmender Temperatur ebenfalls zu, da die Dichte von Gasen bei gleichem Druck und steigender Temperatur abnimmt. Bei Musikinstrumenten hingegen ist vor allem die Spannkraft und die Querschnittsfläche der Saiten von Bedeutung: Tief klingende Saiten sind oftmals dicker, aus Materialien mit einer höheren Dichte gefertigt und/oder weniger stark gespannt.

In manchen Materialien ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit v zudem abhängig von der Frequenz f der Wellen. In diesem Fall laufen die einzelnen Wellen auseinander, man spricht von Dispersion. Dieser Effekt wird beispielsweise in der Optik zur Aufspaltung von weißem Licht in Spektralfarben mittels eines Prismas genutzt.

2.9.3.2 Superpositionsprinzip

Wellen können sich, ohne sich gegenseitig zu stören, zu einer resultierenden Welle überlagern. Sind die Frequenzen und Amplituden der einzelnen (Teil-)Wellen bekannt, so kann man daraus die resultierende Welle bestimmen.

Überlagern sich zwei sinusförmige Wellen mit gleicher Ausbreitungsrichtung und gleicher Frequenz, so entsteht wiederum eine sinusförmige Welle mit der gleichen Frequenz. Die Amplitude und Phase der resultierenden Schwingung ist von denen der einzelnen Wellen abhängig.

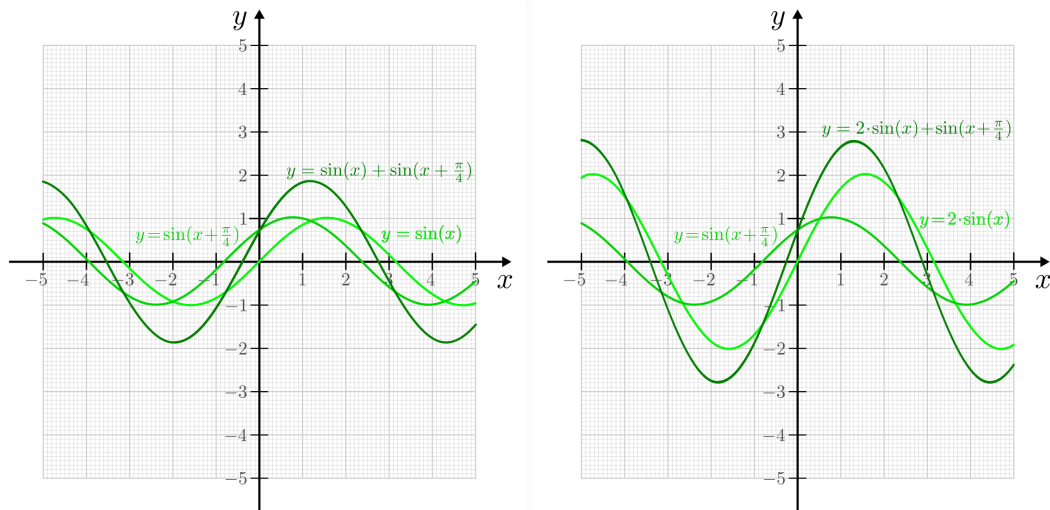


Abb. 2.76a Überlagerung zweier sinusförmiger Wellen gleicher Frequenz und gleichen bzw. unterschiedlichen Amplituden.

Überlagern sich zwei sinusförmige Wellen mit gleicher Ausbreitungsrichtung, aber unterschiedlicher Frequenz, so entsteht eine nicht-sinusförmige Welle. Die Amplitude und Form der resultierenden Schwingung ist wiederum von denen der einzelnen Wellen abhängig.

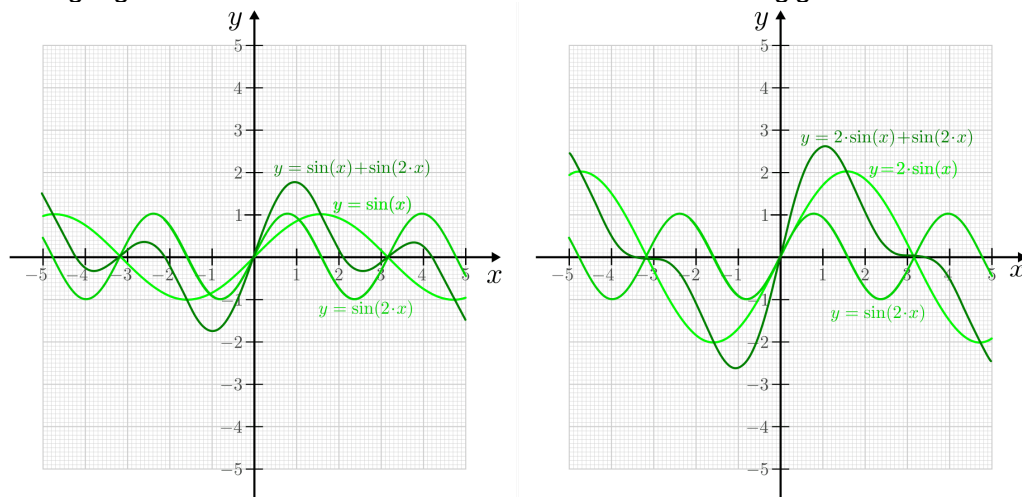


Abb. 2.76b Überlagerung zweier sinusförmiger Wellen unterschiedlicher Frequenz und gleichen bzw. unterschiedlichen Amplituden.

Unterscheiden sich zwei Wellen mit gleicher Phase und gleicher Amplitude nur geringfügig in ihrer Frequenz, so ergibt sich bei der Überlagerung beider Wellen eine so genannte Schwebung. Hierbei handelt es sich um eine Welle mit der mittleren Frequenz $f = \frac{1}{2}(f_1 + f_2)$ der beiden Einzelschwingungen, deren Amplitude periodisch zwischen Null und der maximalen Amplitude schwankt.

2.9.3.3 Interferenz-Effekte

Treffen an einer Stelle zwei oder mehrere Wellen aus unterschiedlichen Richtungen aufeinander, so findet dort wiederum eine Überlagerung der einzelnen Wellenamplituden statt:

- Haben die einzelnen Wellen eine gleiche momentane Auslenkung (beide in positive oder beide in negative Auslenkungsrichtung), so überlagern sich die Wellen „konstruktiv“, das heißt die resultierende Amplitude ist größer als die Amplituden der einzelnen Wellen.
- Haben die einzelnen Wellen hingegen unterschiedliche Auslenkungsrichtungen, so überlagern sich die Wellen „destruktiv“, die resultierende Amplitude ist hierbei geringer als die Beträge der einzelnen Amplituden. Auch eine völlige Auslöschung zweier Teilwellen ist in diesem Fall möglich.

An jeder Stelle der Welle sind somit die Auslenkungszustände der Teilwellen unter Berücksichtigung des Vorzeichens zu addieren. Vereinfacht gesagt: Trifft ein „Wellenberg“ auf einen anderen „Wellenberg“, so

ergibt sich ein höherer Wellenberg, trifft ein „Wellenberg“ auf ein „Wellental“, so löschen sich die Amplituden an dieser Stelle zumindest teilweise aus.

Handelt es sich bei den aufeinandertreffenden Wellen nicht nur um einen einzelnen Auslenkungszustand (Wellenberg bzw. Wellental, manchmal allgemein auch „Wellenpaket“ genannt), sondern um einen kontinuierlichen, nicht abbrechenden „Wellenzug“, so bezeichnet man das Ergebnis der Überlagerungen der Teilwellen als Interferenz.

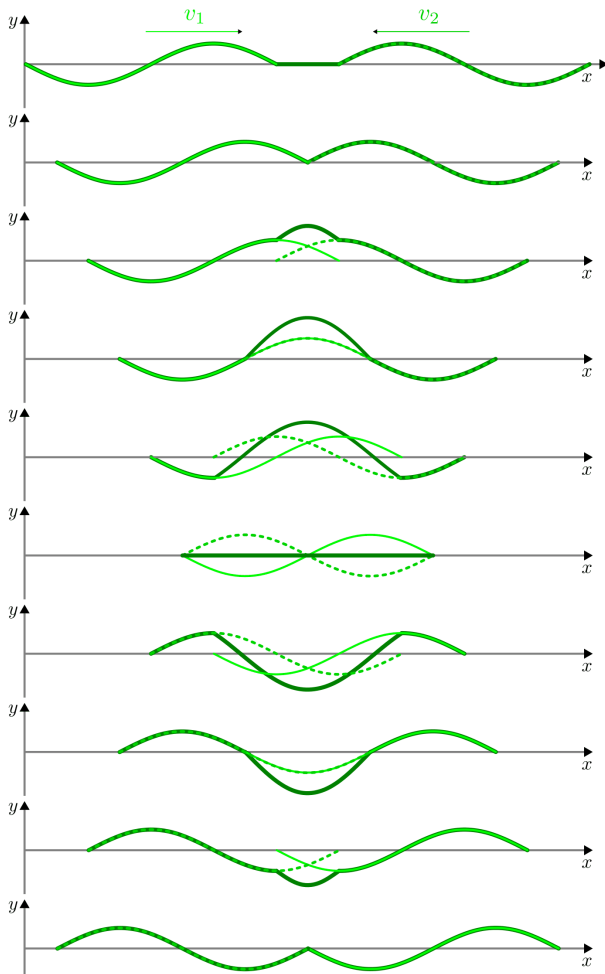


Abb. 2.77 Interferenz zweier Wellen mit gleich großer Amplitude und entgegengesetzt gleich großer Ausbreitungsgeschwindigkeit v .

Kohärenz und Gangunterschied

Dauerhaft bilden sich Interferenz-Effekte nur dann aus, wenn die sich überlagernden Wellen eine gleiche Frequenz und eine feste Phasenbeziehung zueinander haben.

Die Wellen müssen also von gleich schnell schwingenden Erregern ausgehen, die sich relativ zueinander in Ruhe befinden, sich also nicht voneinander entfernen oder aufeinander zubewegen. Erfüllen zwei oder mehrere Wellenzüge diese beiden Bedingungen, so bezeichnet man sie als kohärent.



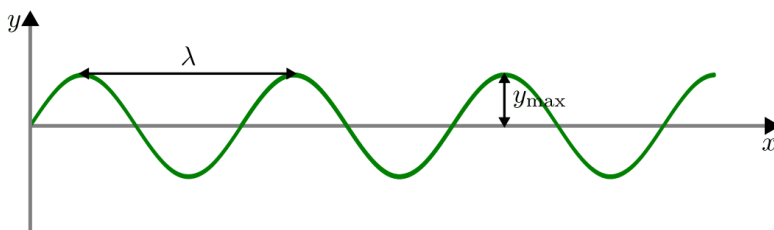
Abb. 2.78 Interferenz zweier kreisförmiger Wellen.

Werden beispielsweise, wie in der obigen Abbildung (Abb. 2.78) dargestellt, Wasserwellen durch zwei im gleichen Rhythmus eintauchende Stangen erzeugt, so kommen beide Teilwellen stets gleichzeitig an der Mittelsenkrechten zwischen den beiden Eintauchstellen an. Entlang dieser Linie überlagern sich beide Wellen somit stets konstruktiv, es treten dort also hohe Wellenberge auf, gefolgt von tiefen Wellentälern. Zusätzlich zur Mittelsenkrechten existieren noch weitere Linien, an denen es stets zu konstruktiver (oder auch destruktiver) Interferenz kommt.

Entscheidend dafür, ob es an einer Stelle zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz kommt, sind die beiden Weglängen s_1 und s_2 von den beiden Ausgangspunkten der Welle zur betreffenden Stelle. Haben beide Wellen zu Beginn den gleichen Auslenkungszustand (die gleiche Phase), so ergibt sich genau dann ein Interferenz-Maximum, wenn sich die beiden Weglängen um ein Vielfaches einer ganzen Wellenlänge unterscheiden.

2.9.4 Mathematische Beschreibung von Wellen

Im Folgenden werden Wellen betrachtet, die räumlich ein sinus-förmiges Ausbreitungsmuster haben. Beginnt die Welle am Koordinatenursprung $x_0 = 0$ mit der Auslenkung $y(x_0) = 0$, so ergibt sich ein Wellenausbreitung, wie sie in der folgenden Abbildung dargestellt ist. Räumliche Ausbreitung einer Welle zum Zeitpunkt t_0 (Abb.2.79):

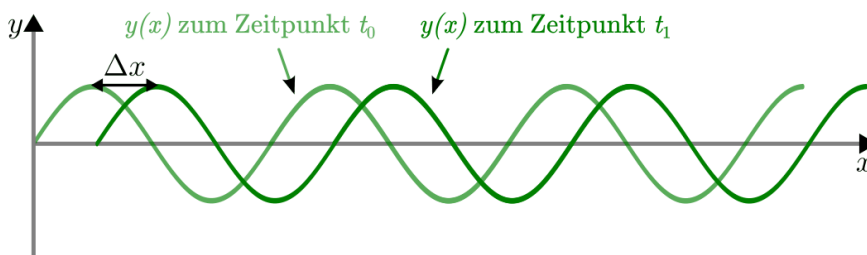


In einer Entfernung von einem ganzzahligen Vielfachen der Wellenlänge λ wiederholt sich jeweils das Wellenmuster. Die Welle hat aus räumlicher Sicht also eine Periode der Länge λ ; zugleich hat jede Sinusfunktion eine Periode von $2 \cdot \pi$. Die Welle kann somit durch folgende Formel charakterisiert werden:

$$y(x) = y_{\max} \cdot \sin\left(2 \cdot \pi \cdot \frac{x}{\lambda}\right)$$

Hierbei bezeichnet $y_{\max}$ die Amplitude der Welle. Ist x ein ganzzahliges Vielfaches von λ , so wird das Argument der Sinus-Funktion entsprechend zu einem ganzzahligen Vielfachen von $2 \cdot \pi$. Beginnt die Welle bei $x = 0$ mit dem Wert $y = 0$, so genügt bereits die obige Gleichung zur Beschreibung der Welle, ansonsten muss im Argument der Sinusfunktion noch ein anfänglicher Phasenwinkel φ_0 dazu addiert werden.

Abb.2.80 Räumliche Ausbreitung einer Welle zum Zeit t_1 .



Wellenmuster bleiben – abgesehen von stehenden Wellen – allerdings nicht an Ort und Stelle, sondern bewegen sich im Laufe der Zeit weiter. Bewegt sich die Welle beispielsweise in positiver x -Richtung, so wandert das Wellenmuster in der Zeit Δt um die Länge Δx weiter.

Die Kreiswellenzahl k gibt an, wie viele Wellen in eine bestimmte Längeneinheit (z.B. cm oder m) passen. Je kürzer also die Wellenlänge λ einer Welle ist, desto größer ist also ihr k -Wert. Für Mikrowellen ist beispielsweise k in der Größenordnung von etwa 10 je cm, bei Lichtwellen in der Größenordnung von über 10000 je cm.

3 OPTIK

In der Optik werden die vielfältigen Erscheinungen des Lichts und ihr Nutzen in optischen Hilfsmitteln untersucht.

3.1 AUSBREITUNG DES LICHTS

Als Licht werden elektromagnetische Wellen bezeichnet, die im Empfindlichkeitsbereich des menschlichen Auges liegen. Das für den Menschen sichtbare Licht besitzt eine Wellenlänge von circa 400 nm (violett) bis 780 nm (rot). (Anm.: In der Literatur variieren diese Grenzwerte etwas).

3.1.1 Lichtquellen

Objekte, die selbständig Licht erzeugen und aussenden, heißen selbstleuchtende Objekte oder Lichtquellen. Die meisten Objekte (in der Optik meist „Gegenstände“ genannt) erzeugen selbst kein Licht, sind aber trotzdem sichtbar. Sie werfen einen Teil des auf sie fallenden Lichts zurück. Man nennt sie reflektierende oder beleuchtete Gegenstände.

Gelangt Licht von einem leuchtenden oder beleuchteten Gegenstand in unser Auge, so wird dieser sichtbar. Licht, das nicht in unser Auge fällt, ist unsichtbar.

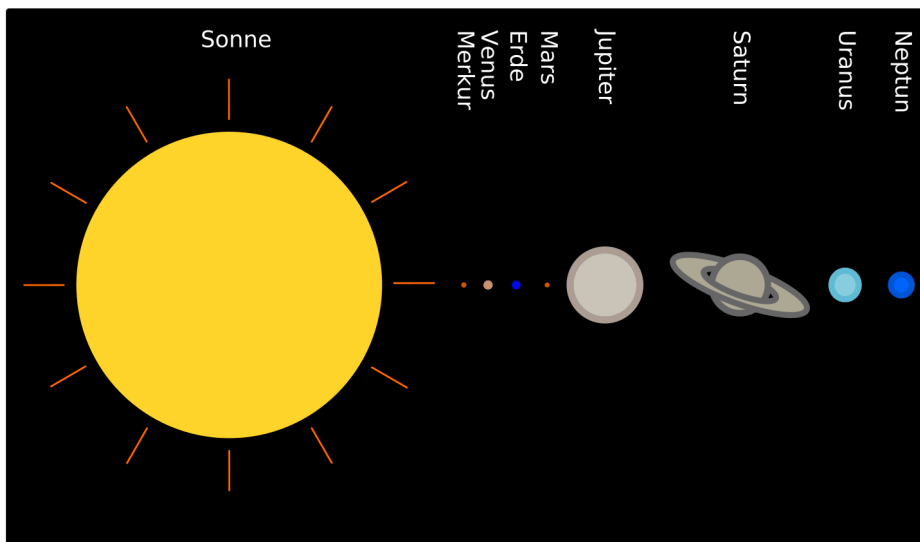


Abb. 3.1 Sonnenstrahlen als Lichtquelle unseres Universums

Beispiele:

- **Selbstleuchtende Objekte:**
Sonne, Sterne, Feuer, Glüh- und Leuchtstofflampen, Kerzen, Glühwürmchen, LEDs, ...
- **Beleuchtete Objekte:**
Erde und Mond, Planeten, Gegenstände (Satelliten, Reflektoren, Staubkörnchen, ...)

Das Licht breitet sich von der Lichtquelle (solange es auf kein Hindernis trifft) radial aus:

- Sonnenlicht erhellt alle Himmelskörper, egal in welcher Richtung von der Sonne sie sich befinden.
- Eine Kerze in der Mitte des Zimmers beleuchtet alle Wände sowie die Decke und den Fußboden.

3.1.2 Die Lichtgeschwindigkeit

In Vakuum (und näherungsweise auch in Luft) kann sich Licht mit etwa 300000 Kilometer je Sekunde ausbreiten („Lichtgeschwindigkeit“). In anderen lichtdurchlässigen Stoffen ist die Lichtgeschwindigkeit geringer, in Wasser kann sich Licht beispielsweise „nur“ mit etwa 225000 Kilometer je Sekunde ausbreiten.

Medium	Lichtgeschwindigkeit in $\frac{km}{s}$
Vakuum	300 000
Luft	300 000
Wasser	225 000
Quarz	194 000
Glas	190 000
Diamant	122 000

Tab. 3.1 Werte der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Stoffen

Könnten wir uns mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, so könnten wir die Erde (Umfang am Äquator: ca. 40000 km) in einer Sekunde 7,5-mal umkreisen. Im Universum hat das Licht allerdings so große Entfernungen zurückzulegen, dass man Weglängen teilweise auch in Lichtsekunden, Lichtminuten, Lichtstunden, Lichttagen oder sogar Lichtjahren angibt. Um von der Sonne auf die Erde zu gelangen, braucht ein Lichtstrahl rund 8,3 Minuten.



Abb. 3.2 Ein von der Erde ausgesandter Lichtstrahl erreicht den Mond rund eine Sekunde später.

3.1.3 Licht- und Beleuchtungsstärke

Um die Helligkeit verschiedener Lichtquellen vergleichen zu können, wurde die Lichtstärke als physikalische Größe eingeführt. Erscheint eine Lichtquelle aus gleicher Entfernung heller als eine andere, so besitzt sie eine größere Lichtstärke.

Definition und Einheit:

Die Lichtstärke I_v ist eine Basisgröße des internationalen Einheitensystems. Ihre Einheit ist Candela (cd).

Beispiele:

- Eine Kerzenflamme hat eine Lichtstärke von etwa 1 cd.
- Glühlampen haben eine Lichtstärke (je nach Bauart) von 15 cd bis 150 cd.
- Autoscheinwerfer haben eine Lichtstärke von rund 5000 cd.

Während die Lichtstärke I_v eine Eigenschaft der Lichtquelle ist, gibt die Beleuchtungsstärke E_v an, welcher Anteil des Lichts auf eine bestimmte Fläche trifft. Da sich das Licht gleichmäßig in alle Richtungen ausbreitet, verteilen sich die Lichtstrahlen auf immer größere Flächen. Die Beleuchtungsstärke nimmt in gleichem Maß ab, wie die Oberfläche der mit Licht durchfluteten (Kugel-) Fläche zunimmt.

Formel und Einheit:

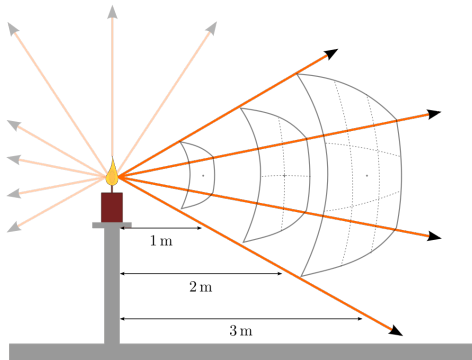
Die Beleuchtungsstärke E_v ist umso größer, je größer die Lichtstärke I_v der Lichtquelle ist. Gleichzeitig nimmt die Beleuchtungsstärke quadratisch mit dem Abstand r von der Lichtquelle ab. Insgesamt gilt:

$$E_v = \frac{I_v}{r^2}$$

Beispiele:

- Eine Kerzenflamme hat in 1m Abstand eine Beleuchtungsstärke von etwa 1 lx.
- Verkehrswege sollten eine Beleuchtungsstärke von mindestens 30 lx aufweisen.
- Die empfohlene Beleuchtungsstärke beträgt für Wohnräume 100 lx bis 200 lx; in Büros sind auch Beleuchtungsstärken von 500 lx nicht unüblich.
- Die empfohlene Beleuchtungsstärke zum Lesen und Schreiben liegt bei 200 lx bis 300 lx.

- Sonnenlicht kann im Sommer eine Beleuchtungsstärke von bis 100000 lx hervorrufen, an einem trüben Wintertag nur etwa 2000 lx bis 4000 lx. Das Licht eines Vollmondes bei klarer Nacht hat lediglich eine Beleuchtungsstärke von rund 0,3 lx.



Die Beleuchtungsstärke wird in Lux (lx) angegeben.

Je nach Tätigkeit werden unterschiedliche Beleuchtungsstärken als angenehm empfunden.

Abb. 3.3 Die Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit des Abstands von der Lichtquelle.

3.1.4 Die Lichtdurchlässigkeit

Licht durchlässige Gegenstände gibt es auf zweierlei Arten:

- Durchsichtige Objekte (z.B. Fensterglas) lassen Licht so hindurch, dass Gegenstände hinter ihnen zu erkennen sind.
- Durchscheinende Objekte (z.B. Mattglas) lassen Licht so hindurch, dass Gegenstände hinter ihnen nicht scharf zu erkennen sind.

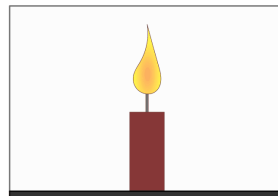


Abb. 3.4 Eine Kerze hinter einer durchsichtigen bzw. durchscheinenden Scheibe.

Die Lichtdurchlässigkeit eines Objekts hängt vom Material und von der Schichtdicke ab. Wasser beispielsweise ist in dünnen Schichten Licht durchlässig, in dicken nicht; in großen Meerestiefen herrscht völlige Dunkelheit. Licht undurchlässige Gegenstände (beispielsweise Metall, Karton usw.) lassen kein Licht hindurch, sie sind undurchsichtig – vorausgesetzt, dass sie eine ausreichende Materialstärke aufweisen. Beispielsweise sind sehr dünne Papierschichten durchscheinend, obwohl Papier an sich undurchsichtig ist.

3.1.5 Blenden und Schatten

Durch Licht undurchlässige Gegenstände kann die Ausbreitung des Lichts begrenzt werden.

Die Blende

Eine Blende ist eine kleine, meist runde Öffnung in einem ansonsten undurchsichtigen Gegenstand. Durch eine Blende gelangt nur ein Teil des Lichts, ein „Lichtbündel“, hindurch. Dieses Lichtbündel kann zeichnerisch durch die Bündelachse und Randstrahlen dargestellt werden.

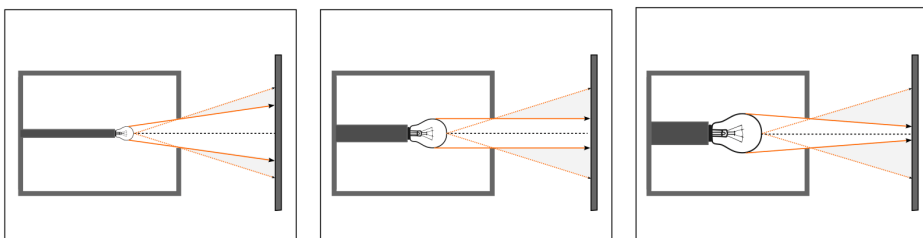


Abb. 3.5 Entstehung von Lichtbündeln durch eine Blende.

3.1.5.1 Der Schlagschatten

Wird ein undurchsichtiger Gegenstand von einer kleinen (punktförmigen) Lichtquelle beleuchtet, so entsteht auf der von der Lichtquelle abgewandten Seite ein Schatten.

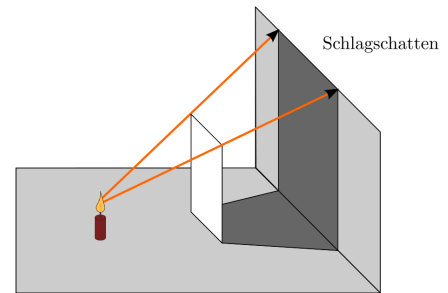


Abb. 3.5 Entstehung eines Schlagschattens.

3.1.5.2 Kern- und Halbschatten

Wird ein undurchsichtiger Gegenstand von zwei punktförmigen Lichtquellen beleuchtet, so bilden sich zwei Schattenzonen aus: Ein Kernschatten und ein Halbschatten. Eine ausgedehnte Lichtquelle erzeugt hinter einem Licht undurchlässigen Gegenstand ebenfalls einen Kern- und einen Halbschatten. Bei einer „diffusen“ Beleuchtung kommt das Licht aus vielen Richtungen. Die einzelnen Schatten-bereiche heben sich dabei gegenseitig auf; es ist kein Schatten erkennbar. Da manche Menschen (insbesondere kleine Kinder) schreckhaft auf Schatten reagieren, wird in Wohn- und Aufenthaltsräumen häufig eine indirekte Beleuchtung eingesetzt. Diese wird mittels diffuser Reflexion erreicht, indem eine helle, matte Oberfläche von einer verdeckten Lampe angestrahlt wird.

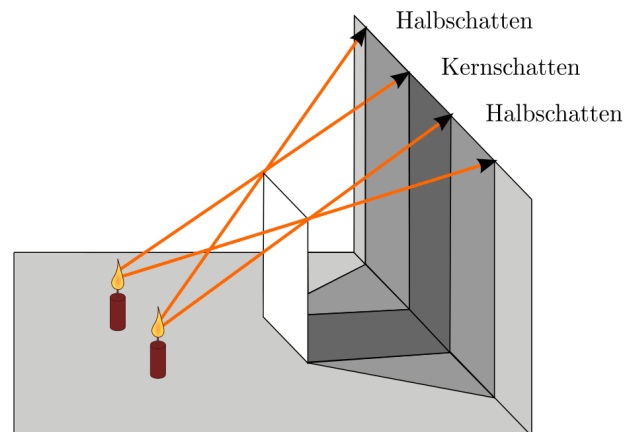


Abb. 3.7 Entstehung des Kern- und Halbschattens.

3.2 REFLEXION VON LICHT

Gegenstände können, je nach Material und Art der Oberfläche, einen Teil des auf sie fallenden Lichts zurückwerfen. Diesen Vorgang nennt man Reflexion.

Wird (fast) das gesamte auf einen Gegenstand fallende Licht reflektiert, so spricht man von einer Spiegelung. Je nach Form und Struktur der spiegelnden Oberfläche unterscheidet man zwischen ebenen und gewölbten sowie zwischen glatten und rauen Spiegeln.

3.2.1 Der ebene Spiegel

Jede glatte, ebene Fläche (beispielsweise eine glatte Metallplatte, eine ruhige Wasseroberfläche, eine Fensterscheibe usw.) wirkt wie ein ebener Spiegel. Während eine blank polierte Metalloberfläche das gesamte einfallende Licht zurückwirft, wird von Glas oder Wasser nur einen Teil des einfallenden Lichts reflektiert. Spiegel aus Glas sind daher gewöhnlich auf der Rückseite schwarz lackiert oder mit einer Lichtundurchlässigen, dunklen Schicht versehen.

Das Reflexionsgesetz

Für ebene Spiegel gilt das Reflexionsgesetz:

Jeder auftreffende Lichtstrahl verlässt den Spiegel im gleichen Winkel, wie er aufgetroffen ist. Der Einfallswinkel α und der Reflexionswinkel α' werden dabei ausgehend von der Senkrechten zum Spiegel angegeben. Mathematisch lässt sich das Reflexionsgesetz damit folgendermaßen formulieren:

$$\alpha = \alpha'$$

Vertauscht man an einem ebenen Spiegel den Ort des Auges mit dem Ort der Lichtquelle, so ändert sich das Versuchsergebnis nicht. Allgemein gilt in der Optik: Jeder Lichtstrahl kann seinen Weg stets auch in umgekehrter Richtung durchlaufen.

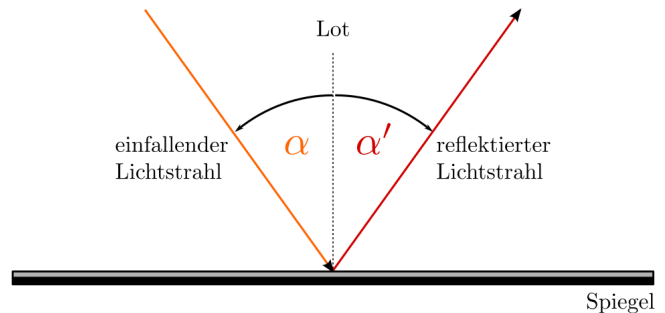


Abb. 3.8 Reflexion eines Lichtstrahls an einem ebenen Spiegel.

Bildentstehung am ebenen Spiegel

In einem Spiegel zeigt sich ein Bild der Gegenstände, die sich vor dem Spiegel befinden. Die entstehende Bild lässt sich zeichnerisch anhand des Reflexionsgesetzes (am besten mit Lineal und Winkelmesser) konstruieren. Lichtstrahlen, die von einem Punkt des Gegenstandes G , ausgehen, treffen unter verschiedenen Einfallswinkeln auf den Spiegel und werden nach dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Ein Teil der Strahlen gelangt in das Auge des Beobachters. Verlängert man diese Strahlen geradlinig nach hinten, so schneiden sie sich in einem Bildpunkt B hinter dem Spiegel. Für den Betrachter scheint das ins Auge fallende Licht von diesem Punkt auszugehen.

Insgesamt gilt somit für ebene Spiegel:

- Der Gegenstand und sein Bild liegen symmetrisch zur Spiegelfläche.
- Das Bild ist ebenso groß wie der Gegenstand.

Jeder Bildpunkt B liegt daher ebenso weit hinter dem Spiegel, wie der passende Gegenstandspunkt G vor ihm liegt.

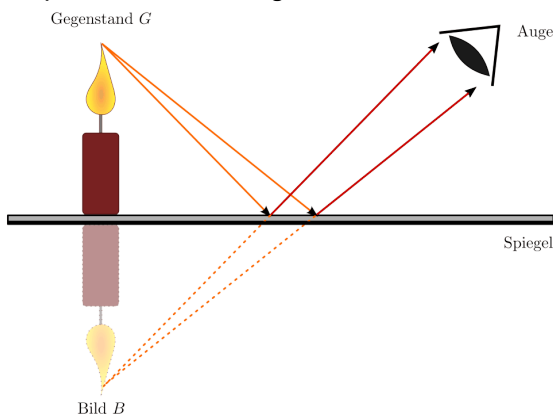


Abb. 3.9 Bildentstehung an einem ebenen Spiegel.

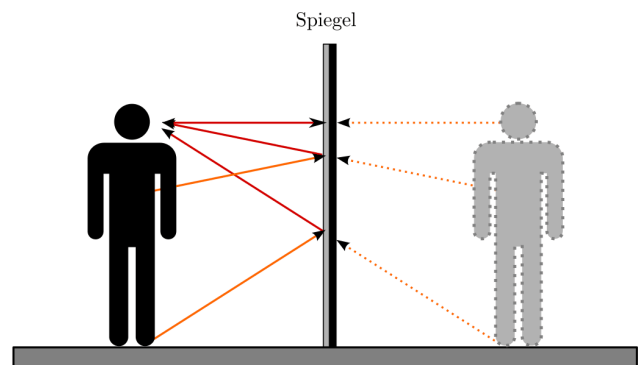


Abb. 3.10 Gegenstandsgröße und Bildgröße an einem ebenen Spiegel.

Direkte und diffuse Reflexion

Die Reflexion von Lichtstrahlen an einem ebenen, glatten Spiegel wird direkte Reflexion genannt. Treffen Lichtstrahlen allerdings auf einen ebenen Spiegel mit einer rauen Oberfläche, so spricht man von einer diffusen Reflexion: Das Licht wird, wie in Abbildung Direkte und diffuse Reflexion (rechtes Bild) nach dem Reflexionsgesetz in verschiedene Richtungen zurückgeworfen („gestreut“).

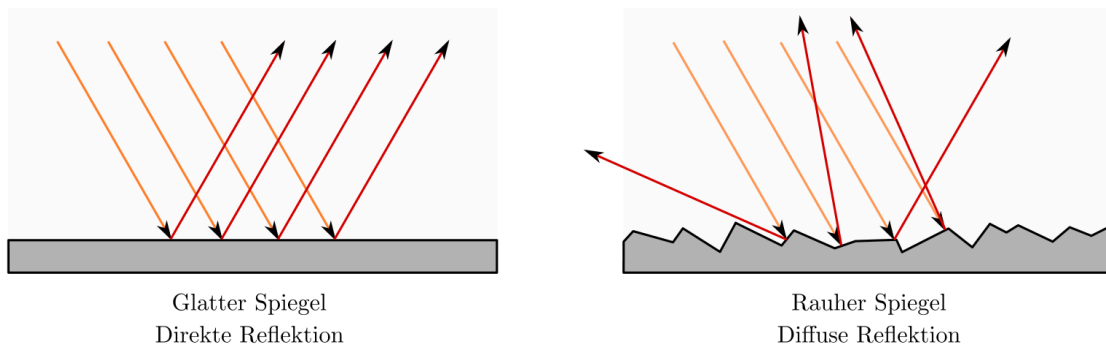


Abb. 3.11 Verlauf der Lichtstrahlen bei direkter und diffuser Reflexion.

Ein bekanntes Beispiel für diffuse Reflexion ist der matte Glanz von nicht blank polierten Metalloberflächen; fein verteilte Wassertropfen in der Luft (Wolken, Nebel) oder Eiskristalle im Schnee haben einen ähnlichen Effekt. Je kleiner die einzelnen Spiegelflächen einer rauen Oberfläche sind, desto stärker wird das Licht gestreut – häufig ist dabei überhaupt kein Spiegelbild mehr erkennbar.

3.2.2 Gekrümmte Spiegel

Ist die Spiegelfläche gekrümmt, so gilt das Reflexionsgesetz für jede einzelne Stelle des Spiegels. Eine gute Vorstellung für einen gekrümmten Spiegel bietet eine Disko-Kugel, die mit zahlreichen kleinen Spiegelflächen das einfallende Licht kugelförmig in den Raum reflektiert.

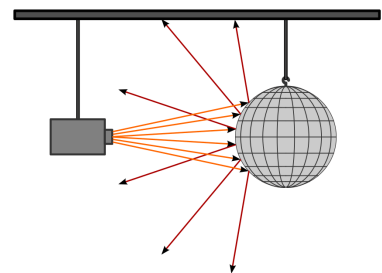


Abb. 3.12 Eine Disko-Kugel als Wölbspiegel.

Um die Entstehung der Bilder an einem gekrümmten Spiegel beschreiben zu können, verwendet man folgende Begriffe:

- **Optische Achse:**
Die Gerade, die senkrecht zur Spiegelebene verläuft und durch den Scheitelpunkt geht, heißt optische Achse. Alle Strahlen, die parallel zur optischen Achse verlaufen, werden Parallelstrahlen genannt.
- **Brennpunkt (Fokus):**
Alle auf den Spiegel treffenden Parallelstrahlen werden so reflektiert, dass sie sich in einem Punkt schneiden. Dieser Punkt liegt auf der optischen Achse und heißt Brennpunkt (Fokus) F .
Der Abstand des Brennpunkts zum Scheitelpunkt wird Brennweite f genannt. Bei einem kugelförmigen Hohlspiegel ist die Brennweite f gleich der Hälfte der Strecke zwischen dem Mittelpunkt M und dem Scheitelpunkt S : $f = \frac{\overline{MS}}{2}$
- **Mittelpunkt:**
Der Mittelpunkt M des Kreises, aus dem man sich den Wölbspiegel herausgeschnitten denken kann, liegt ebenfalls auf der optischen Achse. Strahlen, die auf der Innenseite des Kreises durch den Mittelpunkt gehen, werden stets auf sich selbst abgebildet.

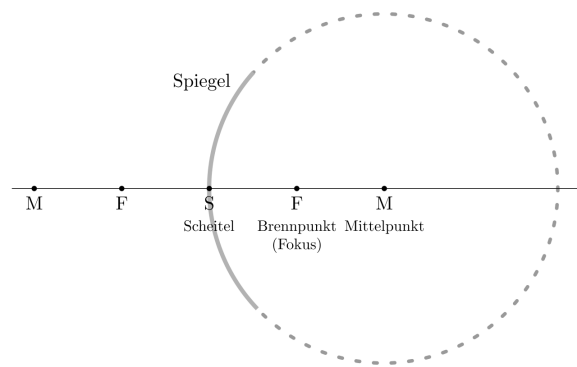


Abb. 3.13 Markante Punkte für die Bildentstehung an einem gekrümmten Spiegel.

Je nachdem, welche Seite eines gekrümmten Spiegels dem Licht zugewandt ist, unterscheidet man zwischen einem Wölb- und einem Hohlspiegel.

Bildentstehung an einem Wölbspiegel

Ein Wölbspiegel (auch „Konvexspiegel“ genannt) erzeugt stets aufrechte, verkleinerte Bilder. Nähert man einen Gegenstand an die Spiegelfläche an, so wird das Bild des Gegenstands größer, bleibt dabei jedoch kleiner als das Original. Gegenstände werden von Wölbspiegeln so abgebildet, als würden sie in kleinerem Maßstab im Inneren des Spiegels befinden. Um den Ort eines Bildpunktes zu bestimmen, zeichnet man die vom entsprechenden Gegenstandspunkt ausgehenden Bildstrahlen auf der Rückseite des Spiegels weiter. Dabei muss man beachten, dass parallel einfallende Strahlen stets zum Brennpunkt F hin abgelenkt werden und Strahlen durch den Mittelpunkt M den Spiegel geradlinig durchlaufen. Die Lage des Bildes, das sich bei Betrachtung des Wölbspiegels ergibt, entspricht dem Schnittpunkt des Brennpunkt- und Mittelpunktstrahls.

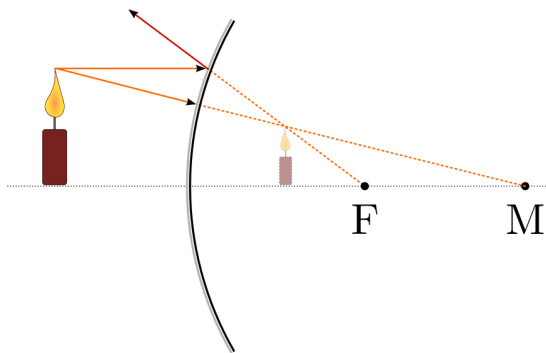


Abb. 3.14a Bildentstehung an einem Wölbspiegel.

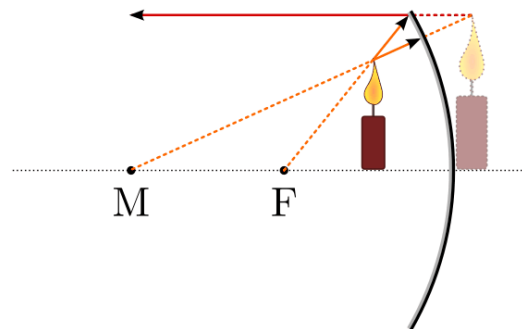


Abb. 3.14b Bildentstehung an einem Hohlspiegel (Gegenstand innerhalb der Brennweite).

Da die Abbildungen eines Wölbspiegels nicht nur aufrecht und verkleinert, sondern auch seitenrichtig sind, werden sie häufig (beispielsweise im Straßenverkehr) zum Überblicken eines größeren Raumbereichs eingesetzt. Sie erlauben dabei sogar einen „Blick um die Ecke“: Egal ob man in Abbildung Bildentstehung an einem Wölbspiegel von schräg oben oder unten auf den Spiegel blickt, die Lichtstrahlen scheinen immer vom verkleinerten Bild der Kerze auf der Rückseite des Spiegels zu stammen.

Bildentstehung an einem Hohlspiegel

Bei einem Hohlspiegel („Konkavspiegel“) hängen der Ort und die Größe des erscheinenden Bildes von der Entfernung des Gegenstands zum Scheitelpunkt des Spiegels ab: Nähert man einen Gegenstand vom Brennpunkt her einem Hohlspiegel, so nähert sich auch das Bild dem Hohlspiegel. Hohlspiegel erzeugen vergrößerte, aufrechte und seitenvertauschte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich innerhalb der Brennweite befinden.

Zur Konstruktion des Bildes zeichnet man die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Bildstrahlen in der umgekehrten Richtung weiter. Dabei muss man beachten, dass Brennpunktstrahlen zu Parallelstrahlen werden und Mittelpunktstrahlen stets senkrecht auf den Spiegel treffen und somit auf sich selbst abgebildet

werden. Die Lage des Bildes entspricht dem Schnittpunkt des verlängerten Parallel- beziehungsweise Mittelpunktstrahls auf der Rückseite des Spiegels.

Aufgrund ihrer vergrößernden Wirkung werden flache Hohlspiegel (mit einer großen Brennweite) unter anderem als Kosmetikspiegel verwendet.

Nähert man einen Gegenstand einem Hohlspiegel aus weiter Entfernung, so entfernt sich das Bild vom Hohlspiegel: Hohlspiegel erzeugen umgekehrte, seitenvertauschte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich außerhalb der Brennweite befinden.

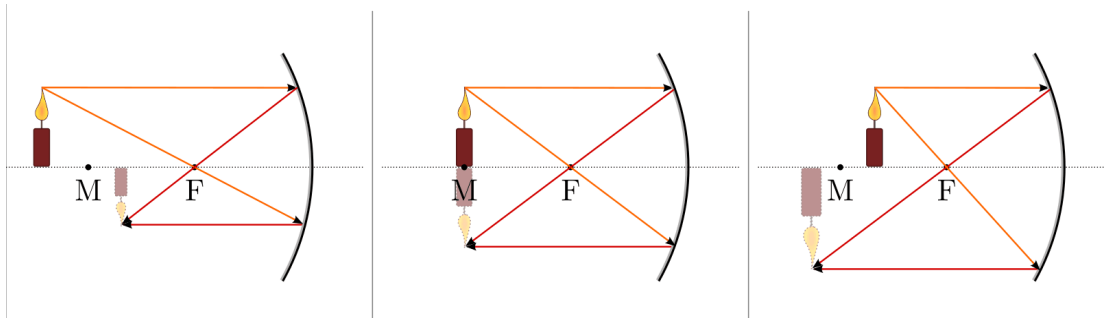


Abb. 3.15 Bildentstehung an einem Hohlspiegel (Gegenstand außerhalb der Brennweite).

Zur Konstruktion des Bildes genügen wiederum die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Brennpunkt- und Parallelstrahlen, die durch den Hohlspiegel wiederum auf Parallel- bzw. Brennpunktstrahlen abgebildet werden. Der Schnittpunkt der reflektierten Strahlen entspricht der Lage des Bildes.

3.3 LICHTBRECHUNG

Trifft Licht auf die Grenzfläche zweier Stoffe, so wird es zum Teil reflektiert, zum Teil verändert es an der Grenze beider Stoffe seine Richtung. Senkrecht auftreffendes Licht ändert seine Richtung nicht.

3.3.1 Das Brechungsgesetz

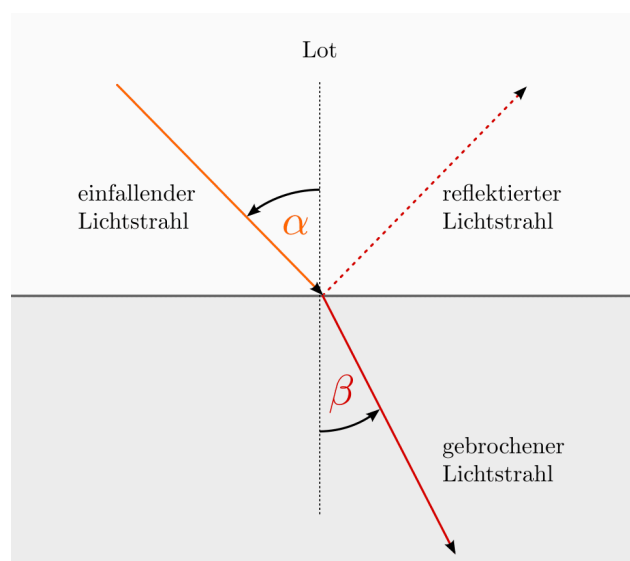
Um das Brechungsgesetz zu formulieren, zeichnet man an der Stelle, an der das Licht auftrifft, eine Gerade senkrecht zur Grenzfläche. Der Winkel zwischen dieser Senkrechten und dem einfallenden Strahl wird Einfallswinkel α , der Winkel zwischen der Senkrechten und dem gebrochenen Strahl Brechungswinkel β genannt.

3.3.1.1 Brechzahl und Brechungsgesetz

Die Sinus-Werte der Einfallswinkel und Brechungswinkel, $\sin \alpha$ und $\sin \beta$, stehen im gleichen Verhältnis zueinander wie die Geschwindigkeiten c_1 und c_2 , die das Licht in den jeweiligen Stoffen erreichen kann. Breitet sich das Licht zunächst in Luft bzw. Vakuum aus und trifft auf ein transparentes Material, so ergibt das Verhältnis der Winkelgrößen einen konstanten, vom Material abhängigen Wert, der als (absolute) Brechzahl n bezeichnet wird:

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Die (absolute) Brechzahl n gegenüber dem Vakuum ist eine für jeden Stoff charakteristische Materialeigenschaft. Sie gibt gleichzeitig das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum



$c_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$ zur Lichtgeschwindigkeit c im jeweiligen Stoff an:

$$n = \frac{c_0}{c}$$

Abb. 3.16 Lichtbrechung beim Übergang eines Lichtstrahls von einem optisch dünnen in ein optisch dickes Medium.

Für die Brechzahl von Vakuum gilt nach der obigen Formel $n_0 = 1$, für die Brechzahl von Luft in sehr guter Näherung ebenfalls. In allen optischen Medien breitet sich das Licht mit geringerer Geschwindigkeit aus, so dass die (absoluten) Brechzahlen aller Materialien $n \geq 1$ gilt.

Die unterschiedlichen Brechzahlen verschiedener Materialien, die in vielen Lehrbüchern und in tabellarischer Form abgedruckt sind, können bei optischen Versuchen zur Materialbestimmung genutzt werden.

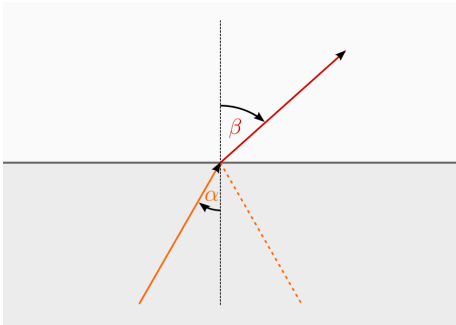


Abb. 3.17 Lichtbrechung beim Übergang eines Lichtstrahls von einem optisch dichten in ein optisch dünnes Medium.

Stoff	Brechzahl n_0
Eis	1,31
Wasser	1,33
Quarzglas	1,46
Plexiglas	1,49
Flintglas	1,70
Diamant	2,4

Tab. 3.2 Brechzahlen gegenüber Vakuum für verschiedene Stoffe.

Tritt ein Lichtstrahl von einem Stoff mit der Brechzahl n_1 in einen anderen Stoff mit einer höheren Brechzahl n_2 über, so wird er zur Senkrechten hin gebrochen. Tritt ein Lichtstrahl von einem optischen Medium mit hoher Brechzahl n_1 in einen anderen Stoff mit niedriger Brechzahl n_2 über, so wird er von der Senkrechten weggebrochen; der Brechungswinkel β ist in diesem Fall größer als der Einfallswinkel α .

3.3.1.2 Die Totalreflexion

Bei einem bestimmten, von den beiden Materialien abhängigen Einfallswinkel α_{max} nimmt der Brechungswinkel $\beta = 90^\circ$ an. In diesem Fall kann der einfallende Lichtstrahl nicht mehr aus dem optisch dichteren Medium in das optisch dünnere Medium übergehen, sondern wird reflektiert beziehungsweise verläuft längs der Grenzfläche beider Medien. Ist der Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel $\alpha > \alpha_{max}$, so wird der Lichtstrahl an der Grenzfläche vollständig gemäß dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Diese Eigenschaft wird zur Konstruktion von optischen Glasfaser- bzw. Kunststoffaskabeln als so genannte „Lichtleiter“ genutzt. Damit der Einfallswinkel an der Längswand stets groß genug ist, muss ein Lichtleiter möglichst dünn sein und darf nicht zu stark gebogen werden. Eine einzelne Faser eines Lichtleiter-Bündels hat meist einen Durchmesser von etwa $0,01mm$.

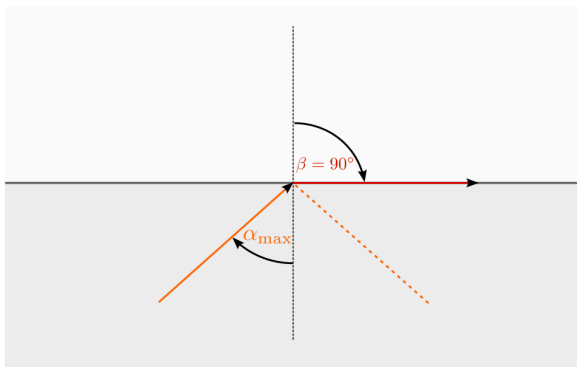


Abb. 3.18a Totalreflexion beim Übergang eines Lichtstrahls von einem optisch dichten in ein optisch dünnes Medium.

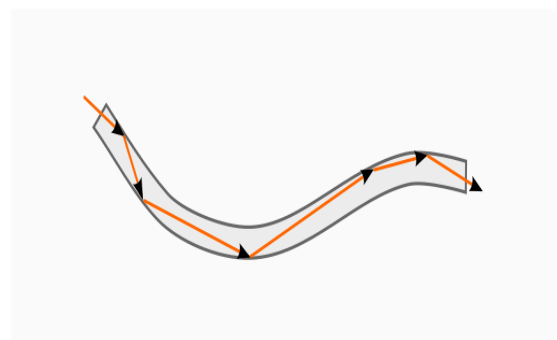


Abb. 3.18b Totalreflexion in einem Lichtleiter.

3.3.1.3 Doppelte Lichtbrechung an einer ebenen Platte

Beim Durchgang durch eine ebene Platte, beispielsweise eine Glasscheibe, wird ein Lichtstrahl zweimal gebrochen: Beim Eintritt wird der Strahl zur Senkrechten hin, beim Austritt von der Senkrechten weggebrochen. Da die Brechzahlen und somit die Ablenkungen in beiden Fällen gleich sind, erfährt der Lichtstrahl insg. nur eine parallele Verschiebung. In vielen Fällen, insbesondere bei dünnen Scheiben, kann der Effekt vernachlässigt und der doppelt gebrochene Lichtstrahl durch einen einzelnen, geraden Lichtstrahl ersetzt werden. Eine Totalreflexion kann in diesem Fall nicht auftreten, da der Austrittswinkel des Lichtstrahls gleich dem Eintrittswinkel ist und für diesen (von der Senkrechten aus gemessen) stets $\alpha < 90^\circ$ gilt.

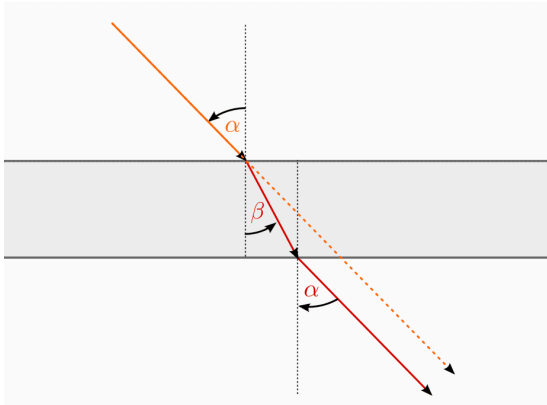


Abb. 3.19a Lichtbrechung an einer ebenen Platte.

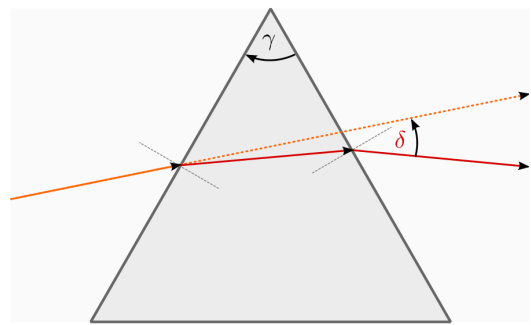


Abb. 3.19b Lichtbrechung an einem Prisma.

3.3.1.4 Doppelte Lichtbrechung an einem Prisma

Fällt ein Lichtstrahl auf ein Prisma, so wird er ebenfalls zweimal gebrochen – einmal beim Eintritt in das Prisma (Übergang Luft → Glas) und ein weiteres Mal beim Austritt aus dem Prisma (Übergang Glas → Luft). Da die beiden Grenzflächen gegeneinander geneigt sind, wird der Lichtstrahl insgesamt zum dickeren Ende des Prismas hin abgelenkt. Umso größer der Keilwinkel γ des Prismas ist (d.h. je stumpfer das Prisma ist), desto stärker ist der Winkel δ , um den der einfallende Lichtstrahl abgelenkt wird.

Bei sehr stumpfen Prismen kann sogar eine Totalreflexion des einfallenden Lichts an der dem Lichtstrahl gegenüberliegenden Fläche auftreten. Hierbei kann eine Ablenkung des Lichts um 90° bzw. 180° erreicht werden. Derartige „Umkehrprismen“ werden beispielsweise in Fernrohre oder Fotokameras eingebaut, um eine Umlenkung bzw. Vertauschung parallel einfallender Strahlen zu erreichen.

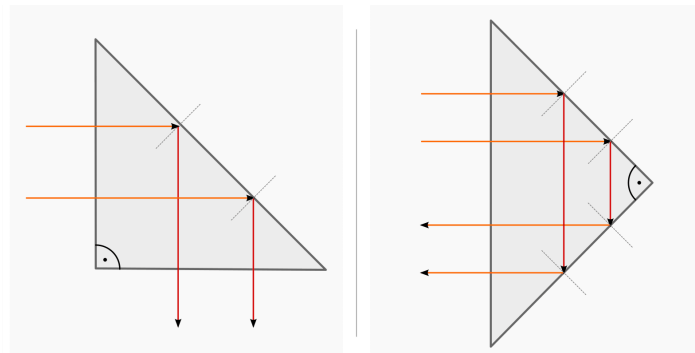


Abb. 3.20 Ablenkung von Lichtstrahlen um 90° bzw. 180° an rechtwinkligen Prismen.

3.3.1.5 Optische Linsen

Geschliffene Gläser können einfallende Lichtstrahlen – je nach Bauform – bündeln oder zerstreuen. Solche glasartigen Körper, die meist kreisförmig sind und eine bestimmte Krümmung aufweisen, werden als „optische Linsen“ bezeichnet. Ein bekanntes Beispiel ist die Lupe, mit deren Hilfe man ein vergrößertes Bild eines Gegenstandes erhalten kann.

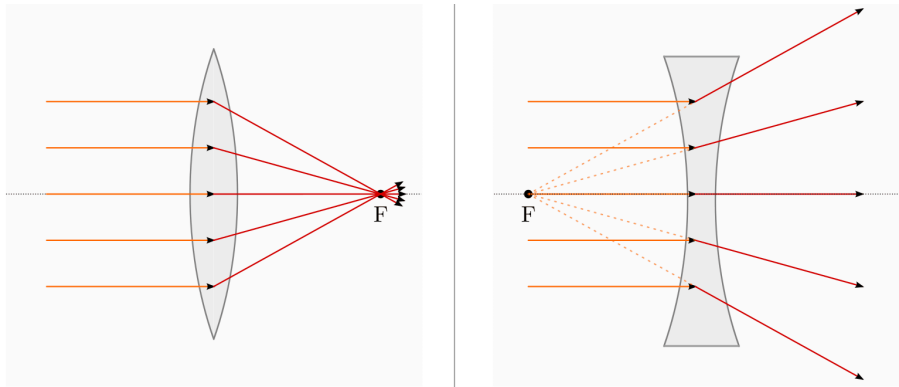


Abb. 3.21 Sammellinse (linkes Bild) und Zerstreuungslinse (rechtes Bild) als typische Formen optischer Linsen.

Um die Bildentstehung an einer optischen Linse zu erklären, verwendet man (weitestgehend) die gleichen Begriffe wie bei der Beschreibung von gekrümmten Spiegeln:

- **Optische Achse:**
Die Gerade, die durch die Mitte der Linse verläuft und senkrecht zur Linsenebene steht, heißt optische Achse.
- **Parallelstrahlen:**
Alle Strahlen, die parallel zur optischen Achse auf eine optische Linse treffen, heißen Parallelstrahlen. Sie werden durch die Linse gesammelt beziehungsweise zerstreut und schneiden sich in einem gemeinsamen Punkt hinter bzw. vor der Linse. Dieser Punkt auf der optischen Achse wird Brennpunkt F genannt. Der Abstand zwischen Linsenmittelpunkt und einem Brennpunkt wird Brennweite f genannt. Die Brennweite einer optischen Linse ist umso größer, desto flacher die Linse ist.
- **Brennpunktstrahlen:**
Alle Strahlen, die durch einen Brennpunkt einer optischen Linse verlaufen, werden durch die Linse so gebrochen, dass sie hinter der Linse parallel zur optischen Achse verlaufen.
- **Mittelpunktstrahlen:**
Strahlen, die durch den Linsenmittelpunkt verlaufen, werden beim Eintritt in das Linsenglas ebenso stark gebrochen wie beim Austritt. Mittelpunktstrahlen werden daher nur leicht parallel verschoben (bei dünnen Linsen kaum erkennbar). In guter Näherung durchlaufen Mittelpunktstrahlen die Linse somit unverändert.

Zeichnet man für einen beliebigen Gegenstandspunkt G zwei oder drei der oben genannten Strahlen ein, so erhält man den passenden Bildpunkt als Schnittpunkt der Strahlen.

Bildentstehung an einer Sammellinse

Bei der Abbildung eines Gegenstandes durch eine Sammellinse hängen Lage und Größe des Bildes von der Entfernung g des Gegenstands zur Linse und von deren Brennweite f ab.

Nähert man einen Gegenstand einer Sammellinse aus weiter Entfernung, so entfernt sich auch das Bild von der Sammellinse. Sammellinsen erzeugen umgekehrte, seitenvertauschte Bilder von Gegenständen, wenn sich diese außerhalb der Brennweite befinden.

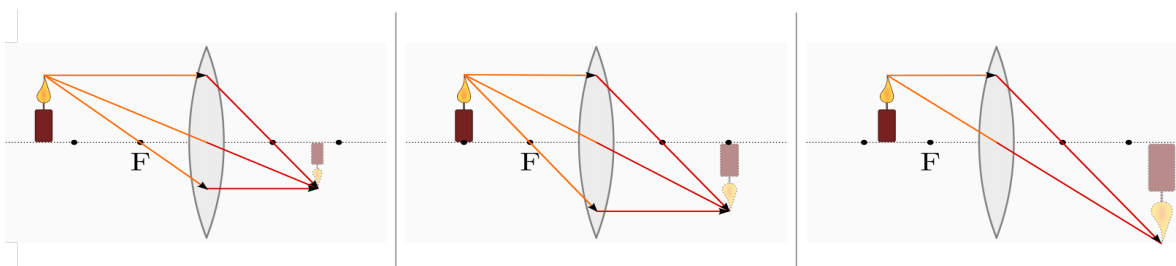


Abb. 3.22 Bildentstehung an einer Sammellinse (Gegenstand außerhalb der Brennweite).

Zur Konstruktion des Bildes genügen wiederum die von einem Gegenstandspunkt ausgehenden Brennpunkt- und Parallelstrahlen, die durch die Sammellinse wiederum auf Parallel- bzw. Brennpunktstrahlen abgebildet werden. Der Schnittpunkt der gebrochenen Strahlen entspricht der Lage des Bildes.

Nähert man einen Gegenstand vom Brennpunkt her einer Sammellinse, so nähert sich auch das Bild der Sammellinse. Sammellinsen erzeugen vergrößerte und aufrechte Bilder der Gegenstände, wenn sie sich innerhalb der Brennweite befinden (Lupeneffekt).

Zur Konstruktion des Bildes zeichnet man die einem Gegenstandspunkt ausgehenden Bildstrahlen hinter der Sammellinse weiter. Dabei ist zu beachten, dass Brennpunktstrahlen zu Parallelstrahlen werden und Mittelpunktstrahlen stets senkrecht auf die Linse treffen und diese somit ohne Lichtbrechung durchlaufen. Die Lage des Bildes entspricht dem Schnittpunkt der so verlängerten Parallel- bzw. Mittelpunktstrahlen hinter dem Gegenstand.

Aufgrund ihrer vergrößernden Wirkung werden flache Sammellinsen (mit einer großen Brennweite) unter anderem als Lupen und Objektive verwendet.

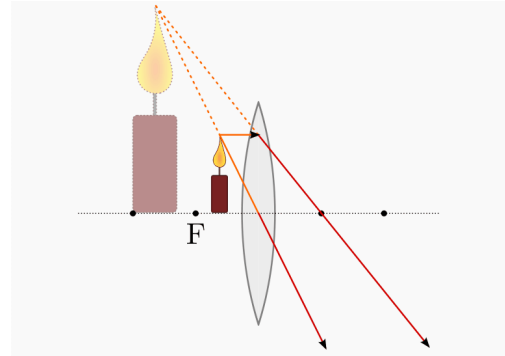


Abb. 3.23a Bildentstehung an einer Sammellinse (Gegenstand innerhalb der Brennweite).

Bildentstehung an einer Zerstreuungslinse

Eine Zerstreuungslinse erzeugt stets aufrechte, verkleinerte Bilder. Nähert man einen Gegenstand an die Linsenoberfläche an, so bewegt sich auch das Bild des Gegenstands auf die Linse zu und wird dabei größer; es bleibt jedoch stets kleiner als das Original. Zur Konstruktion des Bildes zeichnet man zu einem Gegenstandspunkt einen Parallel- und einen Brennpunktstrahl ein. Der Parallelstrahl wird durch die Zerstreuungslinse so gebrochen, dass die nach hinten gerichtete Verlängerung des Strahls durch den Brennpunkt verläuft. Das (stets verkleinerte) Bild befindet sich am Schnittpunkt des so verlängerten Parallelstrahls mit dem Mittelpunktstrahl zwischen dem Gegenstand und der Linse.

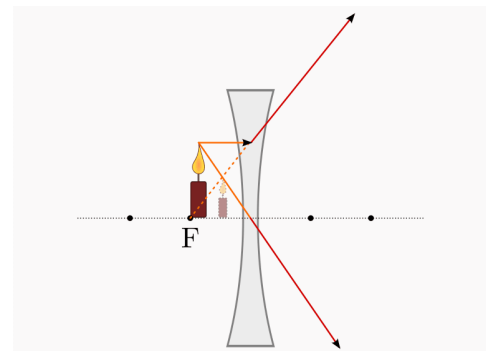


Abb. 3.23b „Bildentstehung“ an einer Streulinse.

3.4 LINSENSYSTEME

Häufig wird in optischen Geräten nicht nur eine einzelne, sondern vielmehr eine Kombination mehrerer Sammel- beziehungsweise Zerstreuungslinsen genutzt. Einige wichtige Eigenschaften, die sich bei derartigen Anordnungen auftreten, werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben.

3.4.1 Brennweite und Brechkraft eines Linsensystems

Soll die Brennweite f_{ges} eines solchen Systems mehrerer Linsen bestimmt werden, so kann man die Kehrwerte der Brennweiten aller Linsen addieren, um den Kehrwert der Gesamtbrennweite zu erhalten:

$$\frac{1}{f_{ges}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \dots = \sum \frac{1}{f_i}$$

Die Brennweiten von Sammellinsen werden dabei positiv, die von Zerstreuungslinsen negativ gezählt.

Kombiniert man eine Sammellinse mit einer Zerstreuungslinse (betragsweise) gleicher Brennweite, so ergibt sich $\frac{1}{f} = 0$ bzw. $f = \infty$. Ein solches System hat eine unendliche Brennweite, d.h. einfallende Lichtstrahlen werden durch diese Linsenkombination quasi nicht gebrochen, sondern durchlaufen es ohne Ablenkung. Die Brennweiten von Linsen lassen sich, wie im letzten Abschnitt gezeigt, nicht direkt addieren,

sondern nur ihre Brennweite. Aus diesem Grund wurde als physikalische Größe die so genannte Brechkraft D eingeführt, die als Kehrwert der Brennweite f definiert ist: $D = \frac{1}{f}$

Die Brechkraft einer Linse wird in Dioptrien (dpt) angegeben. Eine Dioptrie entspricht der Brechkraft einer Sammellinse, die eine Brennweite von einem Meter hat: $1 \text{ dpt} = 1 \text{ m}^{-1}$

Je kleiner die Brennweite einer Linse ist, desto größer ist ihre Brechkraft und somit auch ihre Dioptrienzahl; beispielsweise entspricht eine Brennweite von $0,5\text{m}$ einer Brechkraft von 2 dpt oder eine Brennweite von $0,25\text{m}$ einer Brechkraft von 4 dpt . Die Dioptrienzahl D_{ges} eines Linsensystems ist gleich der Summe der Dioptrienzahlen der einzelnen Linsen; die Brechkraft von Sammellinsen erhält dabei wiederum ein positives, die von Zerstreuungslinsen ein negatives Vorzeichen.

3.4.2 Linsenfehler und Abhilfen

Die Brechkraft einer Sammel- beziehungsweise Zerstreuungslinse wird üblicherweise für Lichtstrahlen angegeben, die nahe der optischen Achse auf die Linse treffen. Strahlen, die auf den Randbereich der Linse treffen („Randstrahlen“), werden stärker gebrochen. Einfallende Parallelstrahlen durchlaufen also keinen gemeinsamen Brennpunkt und können somit durch die Linse nicht gemeinsam mit den achsennah einfallenden Strahlen in einem einzigen Punkt scharf abgebildet werden. Es gilt: $f_{Rand} < f_{Mitte}$

Die Verschiebung des Brennpunkts bei Randstrahlen wird als sphärische Aberration bezeichnet. Um diesen Linsenfehler zu verhindern, gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten:

- Durch eine Blende kann verhindert werden, dass Lichtstrahlen auf den Rand der Linse treffen. Hierdurch werden jedoch der Bildausschnitt und die einfallende Lichtstärke reduziert.
- Durch eine Kombination einer Sammel- und einer Zerstreuungslinse mit unterschiedlichen Brechkraften kann ein Linsensystem mit der gewünschten Brechkraft erzeugt werden, das zugleich die sphärische Aberration (nahezu) auf Null reduziert. Derartige Linsensysteme werden beispielsweise in Objektiven von Fotokameras eingesetzt.

Ein weiterer Linsenfehler entsteht dadurch, dass verschieden farbiges Licht beim Durchgang durch die Linse ungleich stark gebrochen wird; in der Regel wird rotes Licht am schwächsten, violettes Licht am stärksten gebrochen. Dieser Effekt wird als chromatische Aberration bezeichnet. Es gilt:

$$f_{violett} < f_{rot}$$

Im Gegensatz zur sphärischen Aberration kann die chromatische Aberration nie vollständig durch geschickte Linsen-Kombinationen beseitigt werden.

3.4.3 Der Abbildungsmaßstab und die Linsengleichung

Das vergrößerte beziehungsweise verkleinerte Bild, das sich bei einer Abbildung durch eine optische Linse ergibt, kann nicht nur durch geometrische Konstruktion, sondern auch rechnerisch bestimmt werden.

Wendet man den 2. Strahlensatz auf die obige Abbildung an, so erkennt man, dass die Größe G des Gegenstands im gleichen Verhältnis zur Entfernung g des Gegenstands von der Linse steht wie die Größe des Bildes B zu seiner Entfernung b von der Linse:

$$\frac{B}{b} = \frac{G}{g}$$

Formt man diese für Sammel- wie für Zerstreuungslinsen gleichermaßen gültige Gleichung um, so erhält man den Maßstab, der sich bei der Abbildung durch die Linse ergibt. Dieser Abbildungsmaßstab hat keine Einheit, sondern ist ein reines Zahlenverhältnis. Sein Wert ist kleiner als Eins im Fall einer Verkleinerung und größer als Eins im Fall einer Vergrößerung.

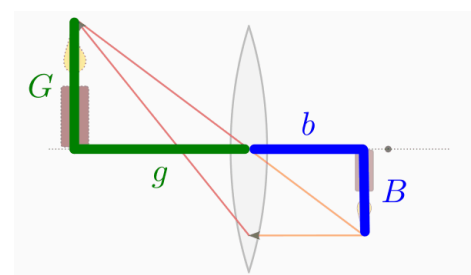


Abb. 3.24 Herleitung der Abbildungsgleichung (Strahlensatz).

Häufig lassen sich im praktischen Anwendungsfall die Gegenstandsgröße G sowie die Gegenstandsweite g durch eine gewöhnliche Längenmessung ermitteln. Die Gegenstandsweite g und Bildweite b können mit Hilfe des Strahlensatzes mit der Brennweite f der Linse zur Linsengleichung zusammengefasst werden:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

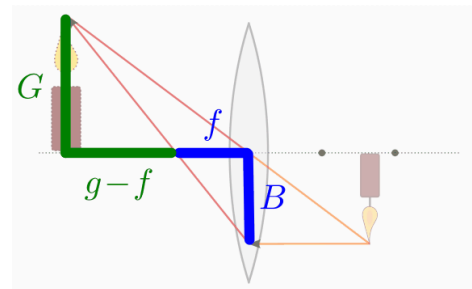


Abb. 3.25 Herleitung der Linsengleichung (Strahlensatz).

3.5 OPTISCHE GERÄTE

3.5.1 Das Auge

Aus Sicht der geometrischen Optik besteht das Auge aus einem Linsensystem zweier Sammellinsen – erstens der gewölbten Hornhautschicht und zweitens der durch einen Ringmuskel verformbaren Augenlinse. Das von den Linsen erzeugte Bild verläuft entlang der Netzhaut. Dort befinden sich Sinneszellen (Stäbchen und Zäpfchen), welche die einfallenden Lichtstrahlen absorbieren und entsprechende Signale über den Sehnerv gebündelt ans Gehirn weiterleiten.

Damit das Bild wahrgenommen werden kann, muss genügend Licht auf die Netzhaut gelangen. Dabei wird über die Größe die Pupille geregelt, wie viel Licht ins Auge fällt; Die Pupille verengt sich, wenn zu viel Licht ins Auge gelangt und die Sinneszellen der Netzhaut schädigen könnte („Adaption“). Ebenso werden durch die Regenbogenhaut Lichtstrahlen ausgeblendet, die ansonsten auf den Rand der Linse treffen und aufgrund der sphärischen Aberration ein unscharfes Bild erzeugen könnten.

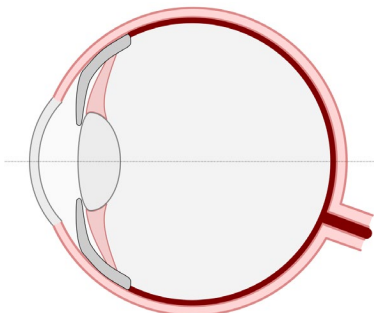


Abb.3.26 Schematischer Aufbau eines Auges.

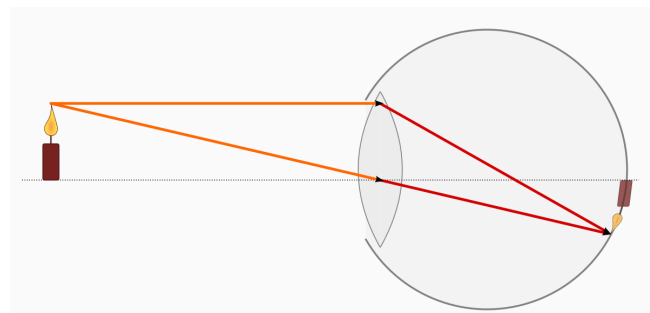


Abb. 3.27 Strahlengang und Bildentstehung im Auge.

Wie man am Verlauf der Lichtstrahlen im Auge erkennen kann, erzeugt die Augenlinse auf der Netzhaut ein umgekehrtes und seitenvertauschtes Bild. Erst im Gehirn findet (unbewusst) ein „Umdenken“ statt, das aus den empfangenen Bildsignalen wiederum ein aufrechtes Bild konstruiert.

Die Hornhaut des Auges hat eine Brechkraft von etwa 43 dpt, die Brechkraft der (entspannten) Augenlinse beträgt etwa 15 dpt. Bei Bedarf kann der Ringmuskel beim Betrachten naher Gegenstände die Brechkraft der Augenlinse um bis zu 14 dpt erhöhen, wobei diese als „Akkommodation“ bezeichnete Fähigkeit im Alter auf „nur“ 2 dpt abnehmen kann. In diesem Fall ist eine mit einer Sammellinse bestückten Brille notwendig, um Gegenstände in der Nähe betrachten zu können.

Weit- und Kurzsichtigkeit

Zu den häufigsten Sehfehlern zählen die so genannte Weit- beziehungsweise Kurzsichtigkeit.

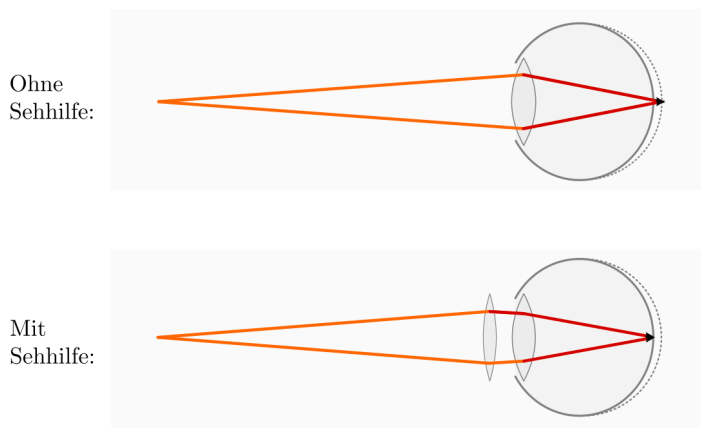


Abb. 3.28a Weitsichtigkeit ohne und mit Sehhilfe.

- Bei der Weitsichtigkeit ist der Augapfel „zu klein“, das von der Augenlinse erzeugte Bild liegt also hinter der Netzhaut. In diesem Fall kann eine geeignete Sammellinse Abhilfe schaffen, welche die Brechkraft des sich ergebenden Linsensystems erhöht beziehungsweise seine Brennweite reduziert.
- Bei der Kurzsichtigkeit ist der Augapfel „zu groß“, das von der Augenlinse erzeugte Bild liegt also vor der Netzhaut. In diesem Fall kann eine geeignete Zerstreuungslinse Abhilfe schaffen, welche die Brechkraft des sich ergebenden Linsensystems herabsetzt beziehungsweise seine Brennweite erhöht.

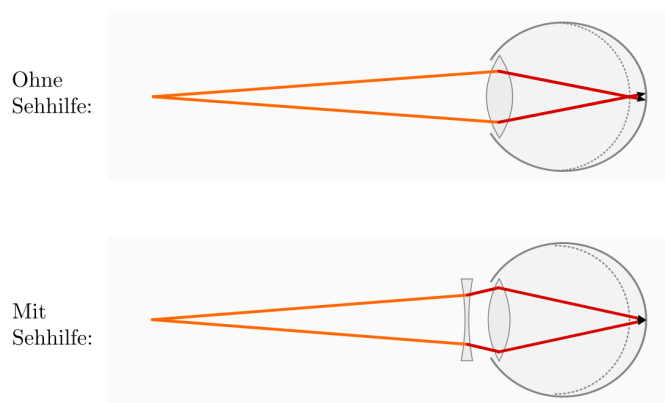


Abb. 3.28b Kurzsichtigkeit ohne und mit Sehhilfe.

Beide Sehfehler können angeboren sein, wenn die Größe des Augapfels von der „normalen“ Größe abweicht. Ebenso kann bei der Kurzsichtigkeit die Augenlinse zu stark beziehungsweise bei der Weitsichtigkeit zu schwach gekrümmt sein.

Bei der Weitsichtigkeit kann auch ein altersbedingtes Nachlassen des Ringmuskels beziehungsweise einer Verhärtung der Augenlinse zu einer zu schwachen Brechkraft der Augenlinse führen. In diesem Fall kann die Augenlinse nicht mehr stark genug gekrümmt („akkommodiert“) werden, um auch nahe Gegenstände scharf abbilden zu können; in diesem Fall spricht man von einer „Altersweitsichtigkeit“. Sie kann ebenso wie eine angeborene Weitsichtigkeit durch eine Sammellinse mit geeigneter Brechkraft ausgeglichen werden.

Der Sehwinkel und das Auflösungsvermögen

Wie groß ein Gegenstand wahrgenommen wird, hängt von der Größe seines Bildes ab, das auf der Netzhaut entsteht. Die Größe des Bildes kann zeichnerisch bestimmt werden, indem vom Gegenstand ausgehende Mittelpunktstrahlen eingezeichnet werden. Der Winkel, den diese Strahlen einschließen, wird als Sehwinkel bezeichnet.

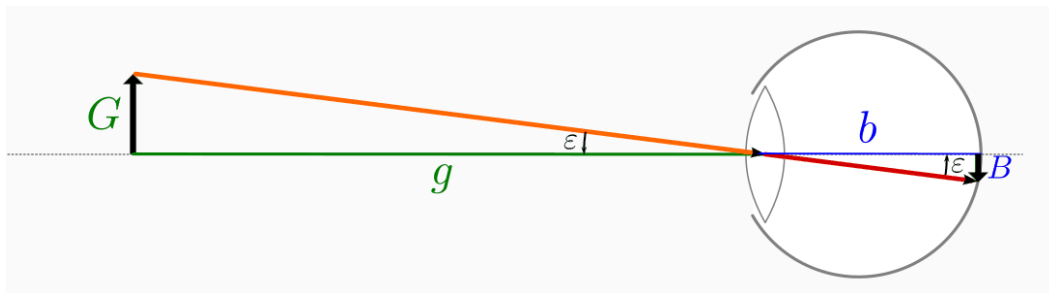


Abb. 3.29 Darstellung des Sehwinkels, unter dem ein betrachteter Gegenstand auf der Netzhaut erscheint.

Je kleiner der Sehwinkel ist, desto kleiner erscheint auch das Bild des betrachteten Gegenstands auf der Netzhaut. Der minimale Sehwinkel, der nötig ist, um zwei Gegenstandspunkte als räumlich voneinander getrennt wahrnehmen zu können, wird als Auflösungsvermögen (eines optischen Geräts) bezeichnet. Beim menschlichen Auge ist ein Sehwinkel von etwa einem Sechzigstel Grad (einer Bogenminute) nötig, um zwei verschiedene Sinneszellen auf der Netzhaut zu reizen und somit zwei Gegenstandspunkte getrennt voneinander wahrnehmen zu können (der Abstand zwischen den Sinneszellen auf der Netzhaut beträgt etwa $5\mu\text{m}$). Ein normalsichtiges Auge kann damit im Abstand der so genannten deutlichen Sehweite $s_0 = 25\text{ cm}$ üblicherweise zwei $0,1\text{ mm}$ voneinander entfernte Punkte noch getrennt wahrnehmen.

Der Sehwinkel kann über folgenden Zusammenhang bestimmt werden:

$$\varepsilon = \tan\left(\frac{G}{g}\right) = \tan\left(\frac{B}{b}\right)$$

Für kleine Sehwinkel ($\varepsilon < 5^\circ$) gilt im Bogenmaß näherungsweise ($\tan(x) = x$):

$$\varepsilon \approx \frac{G}{g} = \frac{B}{b}$$

Eine Möglichkeit zur Vergrößerung des Sehwinkels besteht darin, den betrachteten Gegenstand an das Auge anzunähern oder umgekehrt. Ein normalsichtiges Auge kann allerdings nur bis zu einem Abstand von rund 10 cm scharf stellen; über einen längeren Zeitraum wird dieses angespannte Sehen zudem als anstrengend empfunden. Als angenehmer wird für die Betrachtung kleiner Gegenstände die Verwendung eines optischen Geräts, beispielsweise einer Lupe, empfunden. Die Vergrößerung entsteht in diesem Fall dadurch, dass der betrachtete Gegenstand mit einem solchen Hilfsmittel unter einem größeren Sehwinkel erscheint. Formal lässt sich die Vergrößerung V eines optischen Geräts folgendermaßen definieren:

$$V = \frac{\varepsilon_{\text{mit Sehhilfe}}}{\varepsilon_{\text{ohne Sehhilfe}}}$$

3.5.2 Das Kepler-Fernrohr

Ein Kepler-Fernrohr („Teleskop“) besteht im Wesentlichen aus einer großen, schwach gekrümmten Sammellinse als Objektiv und einer verhältnismäßig kleinen, stärker gekrümmten Sammellinse als Okular. Gewöhnlich betrachtet man mit einem Kepler-Fernrohr sehr weit entfernte Gegenstände, die sich weit außerhalb der doppelten Brennweite des Objektivs befinden. Die Objektivlinse erzeugt in diesem Fall ein verkleinertes, umgekehrtes und seitenvertauschtes Bild des Gegenstands im Inneren des Teleskops. Dieses wird durch das Okular, das wie eine Lupe wirkt, vergrößert betrachtet.

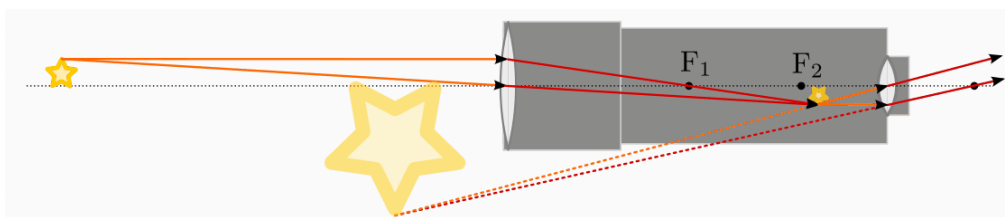


Abb. 3.30 Strahlengang in einem Kepler-Fernrohr.

Insgesamt ergibt sich bei einem Kepler-Fernrohr eine Vergrößerung, die dem Verhältnis der Brennweite f_{obj} des Objektivs zur Brennweite f_{ok} des Okulars entspricht:

$$V_K = \frac{f_{obj}}{f_{ok}}$$

Neben der (verhältnismäßig geringen) Vergrößerung des Sehwinkels bewirkt das Linsensystem eines Kepler-Fernrohrs, dass die gesamte auf das Objektiv einfallende Lichtmenge auf die deutlich kleinere Okularlinse gebündelt und damit vom Auge wahrgenommen wird; das vom Fernrohr erzeugte Bild erscheint somit heller.

Die Mindestlänge eines Kepler-Fernrohrs ist gleich der Summe der Brennweiten des Objektivs und Okulars. Der Grund hierfür ist, dass sich das erzeugte Zwischenbild (knapp) außerhalb der Brennweite des Objektivs und nahezu an der Brennweite des Okulars befindet.

3.5.3 Das Lichtmikroskop

Bei einem Lichtmikroskop wird mittels einer starken Lichtquelle, die sich im Sockel des Mikroskops befindet, ein auf einem Mikroskop-Tisch liegendes Präparat durchleuchtet. Dieser Gegenstand wird durch ein System aus zwei Sammellinsen (Objektiv und Okular) betrachtet.

Die Entfernung des betrachteten Gegenstands zum Objektiv wird durch eine Höhenverstellung des Mikroskop-Tischs so eingestellt, dass die Entfernung des Gegenstands zwischen der einfachen und der doppelten Brennweite des Objektivs liegt. Das Objektiv erzeugt in diesem Fall ein vergrößertes, umgekehrtes und seitenvertauschtes Bild des Gegenstands innerhalb des Tubus.

Strahlengang in einem Lichtmikroskop. Die violetten Pfeile zeigen die Größe des Bildes auf der Netzhaut beziehungsweise den Sehwinkel ohne Mikroskop an.

Durch das Okular, das wie eine Lupe wirkt, wird das vom Objektiv erzeugte (Zwischen-)Bild unter einer nochmaligen Vergrößerung betrachtet. Die gesamte Vergrößerung des Mikroskops entspricht dem Produkt der Vergrößerungen von Objektiv und Okular.

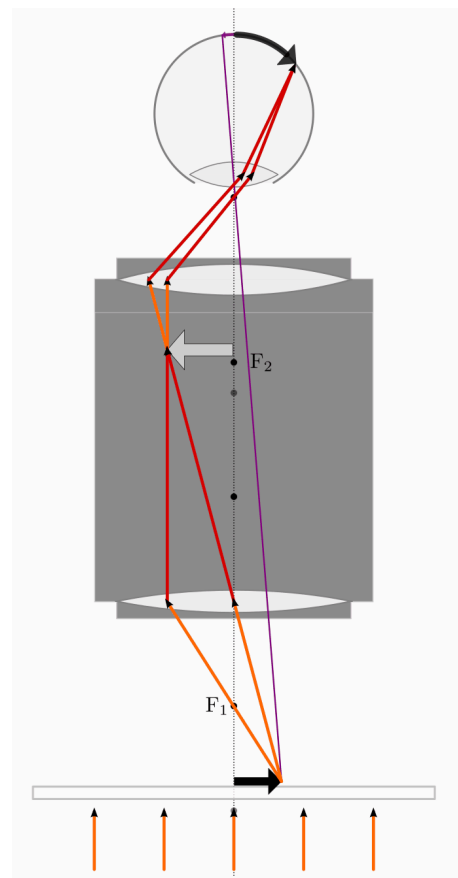


Abb. 3.31 Prinzip des Lichtmikroskops.

3.5.4 Das Galilei-Fernrohr

Ein Galilei-Fernrohr besteht im Wesentlichen aus einer großen, schwach gekrümmten Sammellinse als Objektiv und einer verhältnismäßig kleinen, wesentlich stärker gekrümmten Zerstreuungslinse als Okular.

Gewöhnlich betrachtet man mit einem Galilei-Fernrohr sehr weit entfernte Gegenstände, die sich weit außerhalb der doppelten Brennweite des Objektivs befinden. Im Gegensatz zum Kepler-Fernrohr schneiden sich jedoch die von der Objektivlinse gebündelten Lichtstrahlen nicht innerhalb des Fernrohrs; vielmehr werden die einfallenden Strahlen durch das Okular wieder so gestreut, dass sie parallel zu den ursprünglichen Strahlen verlaufen.

Ein Galilei-Fernrohr erzeugt also kein Zwischenbild, sondern vergrößert lediglich den Sehwinkel, unter dem der betrachtete Gegenstand erscheint. Die Vergrößerung V eines Galilei-Fernrohrs kann – ebenso wie bei

einem Kepler-Fernrohr – anhand der (positiven) Brennweiten f_{obj} und f_{ok} der beiden Linsen berechnet werden:

$$V_G = \frac{f_{obj}}{f_{ok}}$$



Abb. 3.32 Strahlengang in einem Galilei-Fernrohr.

Die Mindestlänge eines Galilei-Fernrohrs ist gleich der Differenz der Brennweiten des Objektivs und Okulars. Der Grund hierfür ist, dass die Brennweite der Okularlinse so gewählt wird, dass die Brennpunkte beider Linsen zusammenfallen. Auf diese Weise werden parallel einfallende Lichtstrahlen beim Durchlaufen des Fernrohrs wiederum auf parallele Strahlen abgebildet.

3.6 WELLENOPTIK

Unter bestimmten Bedingungen zeigt Licht Welleneigenschaften, die mit dem vereinfachten Modell von „Lichtstrahlen“ nicht erklärbar sind. Um beispielsweise auch Farbspektren, Interferenz- und Polarisationserscheinungen beschreiben zu können, geht man in der „modernen“ Optik von einem Wellenmodell des Lichts aus.

3.6.1 Lichtbeugung und Interferenz

Wird Licht durch die Öffnung einer Blende so begrenzt, dass nur ein schmales Lichtbündel die Blende passieren kann, so dürfte gemäß der Strahlenoptik kein Licht außerhalb dieses Bündels auftreten. Tatsächlich weicht die Ausbreitungsrichtung des Lichts allerdings vom geradlinigen Verlauf ab, so dass an nahezu allen Stellen hinter der Blende eine gewisse Menge an Licht anzutreffen ist. Man sagt, dass Licht, ähnlich wie eine Wasserwelle, an den Kanten eines Hindernisses „gebeugt“ wird.

Das Huygenssche Prinzip

Im Jahr 1678 veröffentlichte Christian Huygens ein Buch zur Wellentheorie des Lichts. Darin beschrieb er unter anderem das heute nach ihm benannte Prinzip der Elementarwellen:

„Jeder Punkt einer Wellenfront stellt selbst wiederum einen Ausgangspunkt für eine neue, kreisförmig in alle Richtungen verlaufende Welle dar. Die einzelnen Wellen überlagern sich dabei zur nächsten Wellenfront. Die Senkrechte auf den Wellenfronten entspricht der Ausbreitungsrichtung der Welle.“

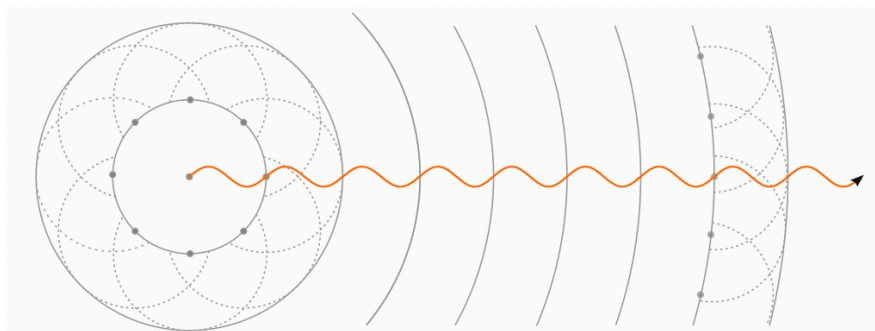


Abb. 3.33 Lichtwelle und Wellenfronten nach dem Huygenschen Prinzip der Elementarwellen.

Unter einer Wellenfront versteht man die Menge aller Punkte, die zu einem bestimmten Zeitpunkt eine gleiche Phasenlage aufweisen, also beispielsweise zu einem bestimmten Zeitpunkt einen Wellenberg darstellen. Das Huygensche Prinzip kann also als eine Art geometrische Konstruktionshilfe aufgefasst werden, die beispielsweise zum Zeichnen der Ausbreitung einer Welle genutzt werden kann. Ist eine gleichmäßig verlaufende Welle weit vom ursprünglichen Erregerzentrum entfernt, so verlaufen die Wellenfronten beziehungsweise die Ausbreitungsrichtungen nahezu geradlinig und parallel.

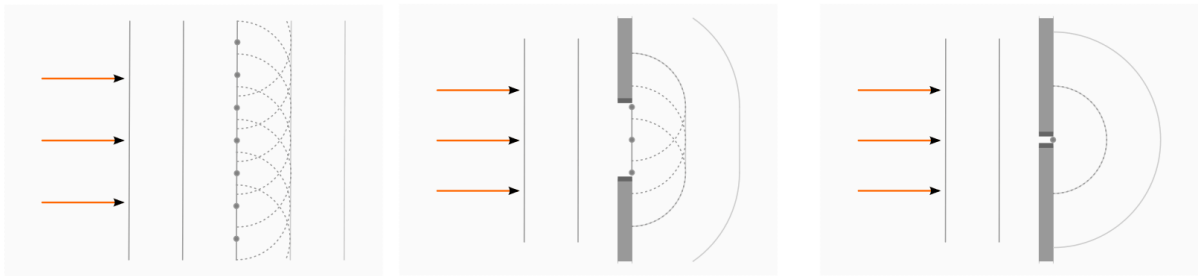


Abb. 3.34 Beugungsmuster von Lichtwellen.

Trifft eine Wellenfront hingegen auf ein (nicht zu kleines) Hindernis, beispielsweise den Rand einer Blende, so tritt eine Beugung des Lichts auf. Das Licht kann sich dabei auch in Bereiche hinein ausbreiten, die nach der Strahlentheorie dunkle „Schattenräume“ darstellen würden. Wohl am deutlichsten zeigt sich diese Eigenschaft an einem dünnen Spalt, dessen Breite in etwa so groß wie die Wellenlänge der eintreffenden Wellen ist. In diesem Fall entstehen hinter der Öffnung erneut kreisförmig verlaufende Wellen, welche die Spaltöffnung der Blende als gemeinsames Zentrum haben.

Beugung und Interferenz an einem Doppelspalt

Hat eine Blende zwei schmale, im Abstand s_D voneinander entfernte Öffnungen, so teilt sich eine einfallende Lichtwelle hinter der Blende in zwei kreisförmige, von den beiden Öffnungen aus, verlaufende Wellen auf. Diese Wellen überlagern sich, so dass es an bestimmten Stellen zu konstruktiver, an anderen Stellen zu destruktiver Interferenz kommt. Bestrahlt man den Doppelspalt beispielsweise mit einem Laser und bringt in einigen Metern hinter der Blende einen optischen Schirm an, so lässt sich auf diesem ein Streifenmuster in der Farbe des Lasers erkennen.

Um dieses Interferenzmuster erklären zu können, muss die Phasenlage der beiden vom Spalt ausgehenden Lichtwellen betrachtet werden. An ihren Ausgangspunkten haben beide die gleiche Phase, da eine aus weitere Entfernung senkrecht eintreffende Lichtwelle beide Spalte gleichzeitig erreicht. Bei einfarbigem Licht weisen beide Wellen zudem eine gleiche Wellenlänge λ auf.

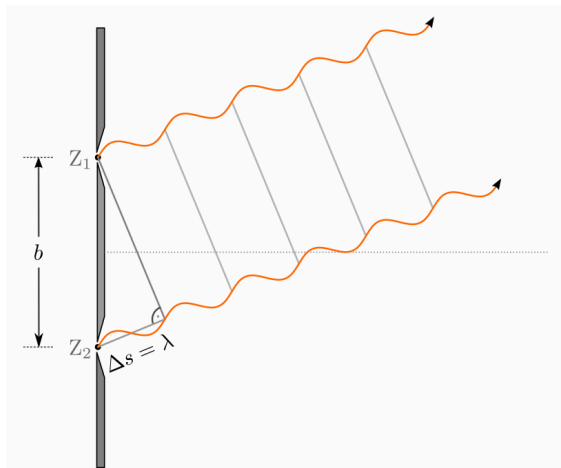


Abb. 3.35a Konstruktive Interferenz am Doppelspalt

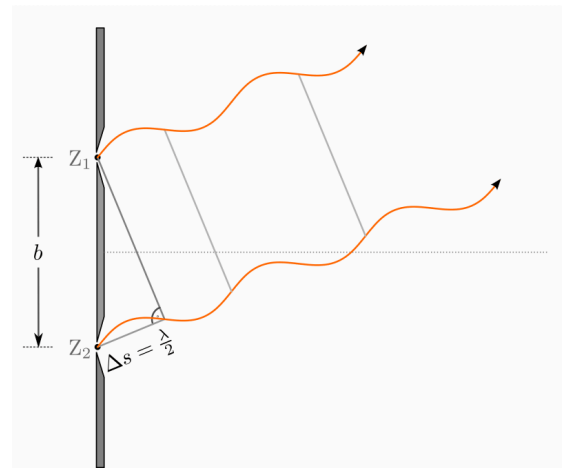


Abb. 3.35b Destruktive Interferenz am Doppelspalt

Der einzige Unterschied zwischen beiden Wellen liegt somit darin, dass sie von zwei unterschiedlichen Zentren ausgehen und daher, von einem Blickwinkel α gesehen, einen so genannten „Gangunterschied“ Δs aufweisen. Damit ist gemeint, dass eine der beiden Wellen zu Beginn ihrer Ausbreitung eine um Δs längere Wegstrecke zurücklegen muss.

Ist Δs gleich einer ganzen Wellenlänge λ , so verlaufen die Lichtwellen anschließend in stets gleicher Phase, es tritt also konstruktive Interferenz auf. Die Bedingung für ein Intensitätsmaximum ist ebenso erfüllt, wenn der Gangunterschied Δs ein ganzzahliges Vielfaches

$k = 0, 1, 2, \dots$ der Wellenlänge λ beträgt: $\Delta s = k \cdot \lambda$

Entlang der Mittellinie tritt (für beliebige Wellenlängen) an allen Stellen konstruktive Interferenz ein, da alle Punkte auf dieser Linie von beiden Spaltöffnungen gleich weit entfernt sind, der Gangunterschied für beide Wellen somit gleich Null ist. Das zugehörige Helligkeitsmaximum wird auch als „nulltes Maximum“ bezeichnet, da es dem Gangunterschied $\Delta s = 0 \cdot \lambda$ entspricht.

Ist der Gangunterschied Δs hingegen gleich einem ungeradzahigen Vielfachen der Hälfte der Wellenlänge λ ($\Delta s = (k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$; $k = 0, 1, 2, \dots$), so verlaufen die Lichtwellen anschließend in Gegenphase, es tritt also destruktive Interferenz auf. Wie weit die hellen und dunklen Streifen auf dem Schirm auseinanderliegen bzw. unter welchen Winkeln sie erscheinen, ist somit von der Wellenlänge λ abhängig. Bezüglich des Winkels gelten zudem folgende geometrische Beziehungen:

- Der Abstand $s \approx 5 \text{ m}$ zwischen dem Doppelspalt und dem Schirm ist sehr viel größer als der Abstand $b \approx 0,1 \text{ mm}$ der beiden Spaltöffnungen voneinander; vom Schirm aus gesehen erscheinen beide Spaltöffnungen in sehr guter Näherung unter dem gleichen Winkel α . Somit gilt:

$$\tan \alpha = \frac{a}{s}$$

Dabei bezeichnet a den Abstand des auf dem Schirm betrachteten Maximums von der Mittellinie.

- Betrachtet man in der obigen Abbildung das an den beiden Spaltöffnungen anliegende, rechtwinklige Dreieck, so kann man folgenden Zusammenhang zwischen dem Winkel α , dem Spaltabstand b und dem Gangunterschied Δs erkennen:

$$\tan \alpha = \frac{\Delta s}{b}$$

Da der Winkel α bei fast allen Doppelspalt-Versuchen sehr klein ist ($\alpha < 5^\circ$), kann in Näherung folgende Kleinwinkelbeziehung verwendet werden:

$$\tan \alpha \approx \sin \alpha \approx \alpha$$

Mit dieser Näherung für kleine Winkel lassen sich die obigen Zusammenhänge und die Bedingung für Intensitätsmaxima zu einer einzigen Formel zusammenfassen:

$$\Delta s = \frac{a \cdot b}{s} = k \cdot \lambda$$

$$\rightarrow \lambda = \frac{a \cdot b}{k \cdot s}$$

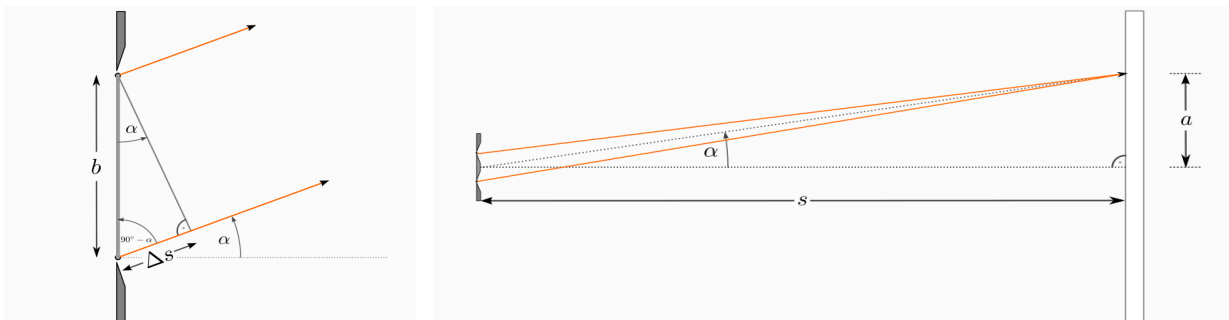


Abb. 3.36 Geometrische Zusammenhänge zwischen dem Betrachtungswinkel α und dem Gitterabstand b und Gangunterschied Δs (links), sowie dem Schirmabstand s und dem Abstand a eines Maximums von der Mittellinie (rechts).

Ist der Doppelspalt-Abstand b bekannt, so kann man also mittels einer einfachen Messung der Entfernung s zwischen Doppelspalt und Schirm und des Abstands a eines frei wählbaren Maximums $k = 1, 2, 3, \dots$ von der Mittellinie auf dem Schirm unmittelbar die Wellenlänge des Lichts berechnet werden.

Beugung und Interferenz an einem Gitter

In der Praxis verwendet man anstelle eines Doppelspalts üblicherweise ein optisches Gitter. Ein solches besteht aus sehr vielen spaltartige Öffnungen, die regelmäßig in geringem Abstand voneinander

angeordnet sind. Gute optische Gitter können etwa eine Anzahl von $N = 1000$ Spalten je Millimeter aufweisen. Für den Abstand g zwischen den lichtdurchlässigen Bereichen gilt somit: $g = \frac{1}{N}$

Der Gitterabstand beträgt für $N = 1000 \text{ mm}^{-1}$ genau einen Mikrometer. Diese „Feinheit“ bewirkt, dass die einzelnen Interferenzmaxima um einen größeren Winkel α aufgefächert werden und so auf dem Schirm weniger „verschmieren“. Sie können auf dem Schirm, etwas umgangssprachlich formuliert, in besserer Auflösung betrachtet werden.

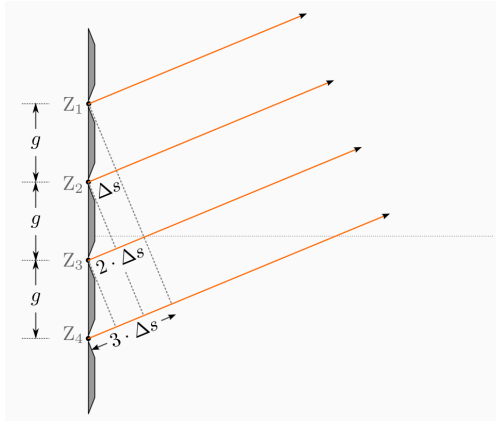


Abb. 3.37 Lichtbeugung und Interferenz am optischen Gitter.

Für die Lichtbeugung an einem optischen Gitter gelten grundsätzlich die gleichen Gesetzmäßigkeiten und Formeln wie bei der Lichtbeugung an einem Doppelspalt; es muss lediglich statt des Doppelspaltabstands b der Gitterabstand g in die jeweilige Formel eingesetzt werden. Die Wellenlänge eines am Gitter interferierenden, einfarbigen Lichtstrahls kann unmittelbar anhand des Gitterabstands g , dem Abstand s zwischen Gitter und Schirm und dem Abstand a des $k = 1, 2, 3, \dots$ -ten Maximums von der Mittellinie bestimmt werden.

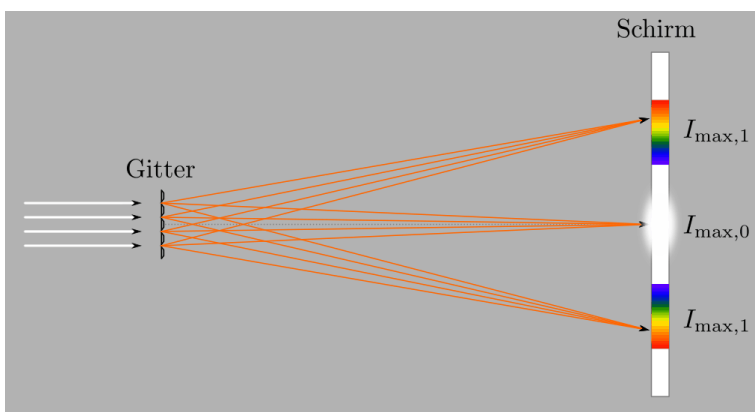


Abb. 3.38 Interferenzmaxima am optischen Gitter.

Verwendet man für Interferenzversuche an einem optischen Gitter *kein* Laserlicht, sondern ein anderes monochromatisches Licht, so muss das auf das Gitter einfallende Lichtstrahl zuvor durch einen einzelnen dünnen Spalt (eine schmale Blende) begrenzt werden. Die Spaltöffnung wirkt in diesem Fall in guter Näherung wie eine einzige punktförmige Lichtquelle, so dass die einzelnen Lichtwellen hinter dem Spalt eine (nahezu) konstante Phasenlage zueinander aufweisen, und somit einzelne Wellen gleicher Wellenlänge jeweils kohärent sind. Bei der Verwendung von Lasern kann die spaltartige Blende vor dem Gitter weggelassen werden, da Laser aufgrund ihres besonderen Aufbaus bereits von sich aus kohärentes Licht erzeugen.

Verwendet man weißes Licht als Lichtquelle, das mehrere Farbanteile hat, so fächern sich diese an den Stellen der maximalen Intensitäten auf dem Schirm zu regenbogenartigen Spektren auf; sind manche Wellenlängen in der Lichtquelle nicht enthalten, so bleiben die jeweiligen Stellen im Spektrum dunkel. Die Ablenkung proportional zur Wellenlänge, blaues Licht wird also weniger stark abgelenkt als rotes. Diese Eigenschaft wird beispielsweise zur so genannten Spektralanalyse genutzt.

3.6.2 Lichtdispersion

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht in einem optischen Medium ist nicht nur von dessen Brechungsindex, sondern auch von der Lichtfrequenz abhängig. Die unterschiedlichen Spektralanteile werden dadurch z.B. beim Durchgang durch ein Prisma unterschiedlich stark gebrochen, so dass sich mittels eines Prismas weißes Licht in seine Farbanteile aufteilen lässt.

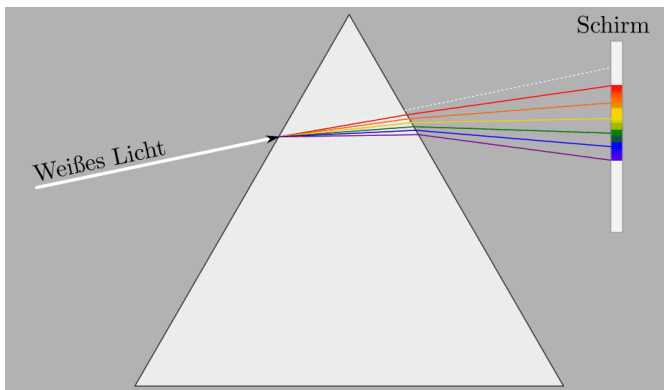


Abb. 3.39 Lichtdispersion bzw. Spektralzerlegung in einem Prisma.

Bei einem Prisma, dessen Funktionsprinzip auf der Dispersion des Lichts beruht, wird blaues Licht stärker von der ursprünglichen Richtung abgelenkt als rotes; genau umgekehrt ist es bei einem optischen Gitter. Ein weiterer Unterschied zwischen diesen beiden Arten der Spektralzeugung besteht darin, dass ein Prisma im Gegensatz zu einem optischen Gitter nur **ein** Spektrum erzeugt, das allerdings lichtintensiver ist als die einzelnen Gitterspektren. Zur Spektralanalyse werden im Allgemeinen dennoch bevorzugt Gitter eingesetzt, zum einen aufgrund ihrer leichteren Kalibrierbarkeit, vor allem jedoch aufgrund der größeren Auffächerung bzw. der besseren „Auflösung“ beim Betrachten der einzelnen Spektrallinien.

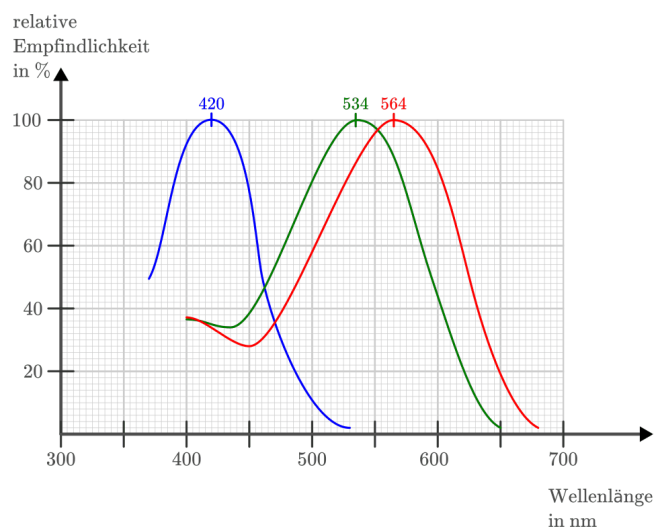
3.7 PHOTOMETRIE

3.7.1 Die Farbwahrnehmung des Menschen

Die menschliche Farbwahrnehmung beruht auf speziellen Sinneszellen, die sich auf der Netzhaut des Auges befinden. Insgesamt hat ein Mensch rund 7 000 000 so genannte Zäpfchen, die für das Farb-Sehen sorgen, und rund 125 000 000 so genannte Stäbchen, die auf eine Hell-Dunkel-Wahrnehmung ausgerichtet sind.

Bei den Zäpfchen gibt es drei verschiedene Typen, die ihre maximale Empfindlichkeit im roten, grünen oder blauen Farbbereich haben. Jede derartige Sinneszelle hat ihre maximale Empfindlichkeit bei einer bestimmten Wellenlänge, bei größeren oder kleineren Wellenlängen nimmt die Empfindlichkeit stetig ab. Insgesamt umfasst der menschliche Farbwahrnehmungsbereich ein Wellenlängenspektrum von ca. 380 nm bis 680 nm.

Abb. 3.40 Relative Empfindlichkeit der Zäpfchen für blaues, grünes und rotes Licht beim menschlichen Auge.



3.7.1.1 Additive und subtraktive Farbmischung

Das Gehirn kombiniert die einzelnen Sinneseindrücke für rotes, grünes und blaues Licht zu einer wahrgenommenen Gesamtfarbe. Nehmen wir alle drei Farben gleichzeitig wahr, so empfinden wir das Licht als weiß. Fehlt ein Farbanteil, so wird das Licht als Mischfarbe der beiden anderen Farben empfunden. Bei dieser „additiven“ Farbmischung sind die Grundfarben also Rot, Grün und Blau.

Eine Mischung von Rot und Grün ergibt Gelb, eine Mischung von Rot und Blau ergibt Magenta, eine Mischung von Grün und Blau ergibt die Farbe Cyan.

Additive Farbmischung tritt beispielsweise bei mehrfarbigen Leuchtdioden (LEDs) auf. Lässt man eine Duo-LED gleichzeitig Rot und Grün leuchten, so ergibt sich ein gelblicher Farbton. Dieser Effekt wird nicht nur bei Computer-Displays verwendet, sondern tritt allgemein immer dann auf, wenn ein Material in einer Lichtquelle zum Leuchten angeregt wird. Beobachtet man ein so genanntes Emissions-Spektrum beispielsweise einer Leuchtstoffröhre, so erkennt man einzelne Farbanteile, die sich in der Summe zu einem weißlichen Licht addieren.

Neben der additiven Farbmischung kennt man vom Malen mit Wasserfarben auch die „subtraktive“ Farbmischung. Wird ein Farbanteil des weißen Lichts von einem Material absorbiert, so wird die Mischung der restlichen Farbanteile („Komplementärfarbe“) reflektiert und vom Auge wahrgenommen. Die Grundfarben dieser subtraktiven Farbmischung sind Gelb, Rot und Blau. Bei einer Mischung aus Gelb und Rot entsteht Orange, bei einer Mischung von Gelb und Blau entsteht Grün, und bei einer Mischung aus Rot und Blau entsteht Violett. Mischt man alle Grundfarben, so ergibt sich bei einer vollen Deckkraft die Farbe schwarz.

Subtraktive Farbmischung tritt ebenso auf, wenn weißes Licht durch ein transparentes, aber gefärbtes optisches Medium geht (beispielsweise eine Sonnenbrille). Beobachtet man ein sich so ergebendes Absorptionsspektrum, so hinterlassen die absorbierten Farben im Farbspektrums schwarze Linien (oder sogar schwarze Bereiche). Auf diese Weise kann beobachtet werden, welche Lichtanteile „herausgefiltert“ werden, was Rückschlüsse auf Materialeigenschaften oder chemische Substanzen zulässt.

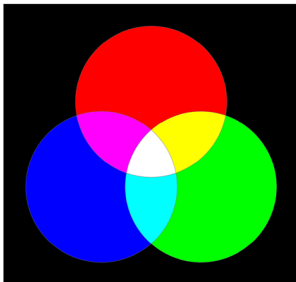


Abb. 3.41a Farbkombination einer additiven Farbmischung.

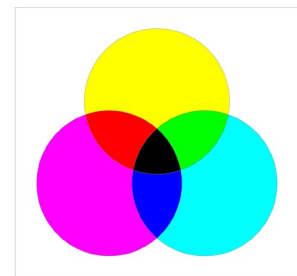


Abb. 3.41b Farbkombination einer subtraktiven Farbmischung.

3.7.1.2 Tag- und Nachtsehen

Die Zäpfchen für die rote, grüne und blaue Farbwahrnehmung sind nicht gleichmäßig auf der Netzhaut verteilt. Während sich im zentralen Bereich der Netzhaut überwiegend Zäpfchen für rotes und grünes Licht befinden, gibt es im äußeren Bereich der Netzhaut mehr blaue Zäpfchen. Bei hoher Helligkeit ist die Pupille als Blende eher geschlossen (klein), so dass das einfallende Licht vorwiegend im zentralen Bereich der Netzhaut auftrifft. Bei dem so genannten „Tagsehen“ hat das menschliche Auge die höchste Empfindlichkeit bei einer Wellenlänge von 555 nm , also im grünen Farbbereich. Bei zunehmender Dunkelheit vergrößert sich die Pupille, so dass mehr Licht in das Auge gelangen kann. Dabei trifft ein größerer Lichtanteil auf die äußeren Bereiche der Netzhaut. In diesem Fall tragen die am sensibelsten auf Licht reagierenden Zäpfchen für blaues Licht stärker zur gesamten Lichtempfindlichkeit des Auges bei. Die höchste Empfindlichkeit verschiebt sich bei dem so genannten „Nachtsehen“ zu einer Wellenlänge von 507 nm .

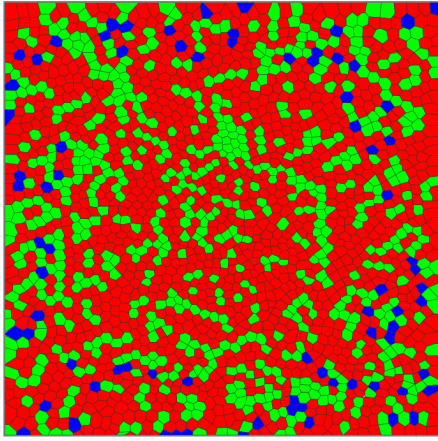


Abb. 3.42 Verteilung der Zäpfchen der einzelnen Farbwahrnehmungen auf der Netzhaut.

3.7.2 Lichttechnische Einheiten

In der Optik sind insgesamt acht lichttechnische Einheiten üblich. Aus historischen Gründen wird nach wie vor das Candela als Lichtstärke einer gewöhnlichen Kerze als Standard-Größe verwendet, auch wenn es aus heutiger Sicht sinnvoller erscheint, von der Strahlungsleistung einer Lichtquelle, gemessen in Watt, auszugehen.

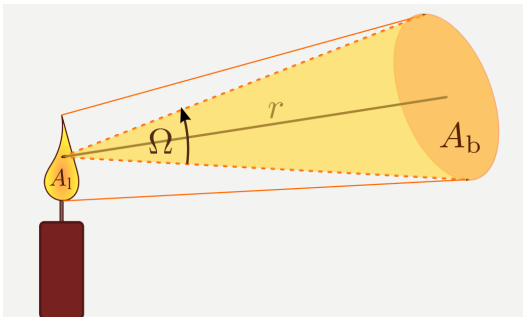


Abb. 3.43 Bezug von Abstrahlungs (A_1) – und Bestrahlungsfläche (A_b)

Je nachdem, ob die gesamte Strahlungsleistung einer Lichtquelle gemessen wird, oder nur derjenige Anteil, den sie als Lichtkegel in einen bestimmten Raumwinkel abstrahlt, sind die folgenden beiden Lichtgrößen grundlegend:

- Der Strahlungsfluss gibt an, welche Lichtleistung insgesamt von einer Lichtquelle ausgeht. Die Einheit des Strahlungsflusses ist Watt.
- Die Strahlstärke gibt denjenigen Anteil der Lichtleistung an, die eine Lichtquelle in den Raumwinkel abstrahlt.
- Die Bestrahlungsstärke gibt an, wie viel Watt an Lichtleistung auf eine beleuchtete Fläche auftreffen. Die Einheit der Bestrahlungsstärke ist Watt je Quadratmeter (W/m^2).

Die obigen Größen beziehen sich allgemein auf die abgestrahlte Leistung einer Lichtquelle. Das menschliche Auge allerdings ist nicht für alle Lichtfrequenzen (Farben) gleich empfindlich: Im grünen Farbbereich ($\approx 555nm$) ist das Auge beim Tagsehen am empfindlichsten.

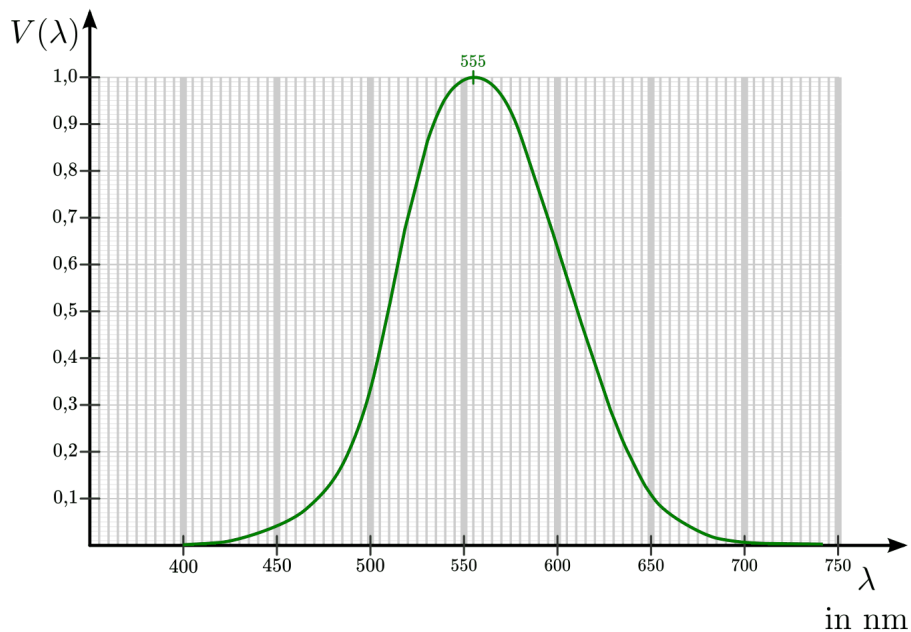


Abb.3.44 Spektralverteilung der Empfindlichkeit des Auges am Tag.

3.7.3 Funktionsprinzip von Spektrometern

Das, was man üblicherweise als (farbiges) „Licht“ bezeichnet, ist nur ein kleiner Teil des Spektrums elektromagnetischer Strahlung. In der folgenden Abbildung ist dies schematisch dargestellt.

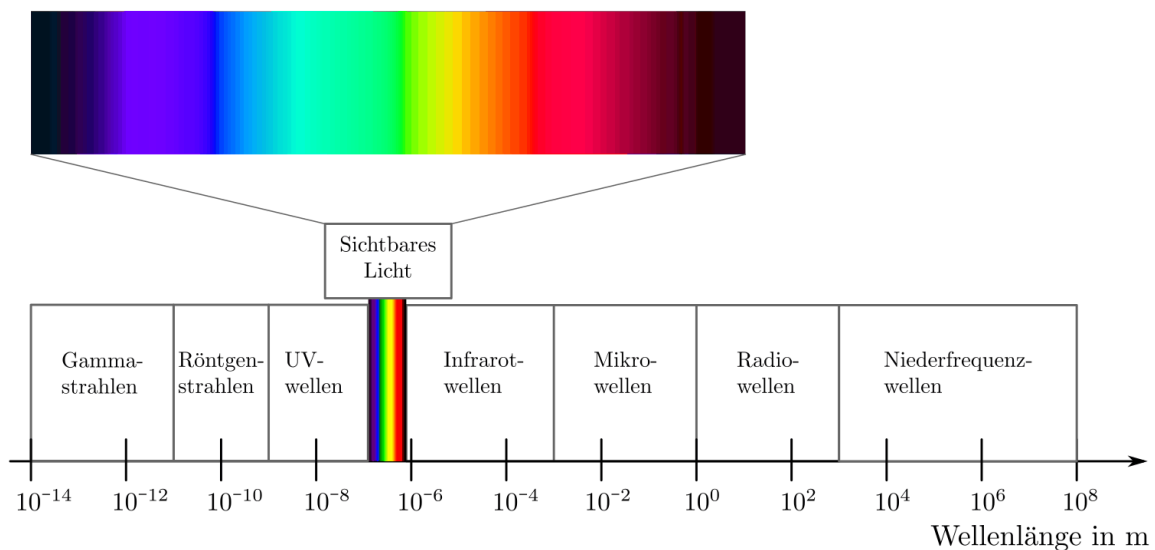


Abb. 3.45 Spektrum des Lichts und der elektromagnetischen Wellen.

Sonnenlicht enthält Licht aus dem gesamten sichtbaren Farbspektrum, es erscheint uns daher, wie bereits oben beschrieben, als weiß. Trifft ein dünner Lichtstrahl weißen Lichts auf ein Prisma oder ein optisches Gitter, so wird er in seine Spektralfarben aufgefächert; das Licht erscheint als Regenbogen.

Mittels einer fein eingestellten Blende kann man damit gezielt Licht mit einer bestimmten Wellenlänge aus dem Spektrum auswählen. Man erhält somit eine einfarbige („monochromatische“) Lichtquelle, allerdings mit einstellbarer Wellenlänge. Strahlt man nun mit einer derartigen Lichtquelle auf eine Material-Probe (welche oftmals in gelöster Form vorliegt und daher in eine Glas-Küvette gegeben wird), so wird das Licht von dieser je nach Substanz der Probe unterschiedlich stark absorbiert. Misst man die Absorption der Probe bei verschiedenen Wellenlängen, so erhält man ein für die jeweilige Substanz charakteristisches Bild, also quasi einen „Fingerabdruck“ der Probe.

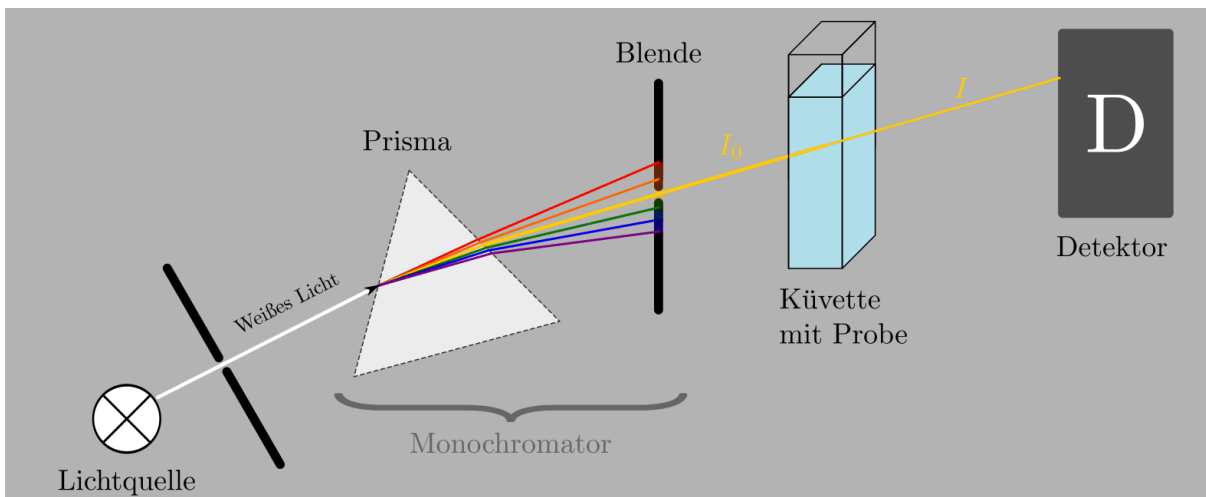


Abb. 3.46 Schematischer Aufbau eines Spektrometers

Ein Spektrometer, wie es heute zur Materialanalyse genutzt wird, besteht also im Wesentlichen aus vier Teilen:

- Eine **Lichtquelle**, in der Regel eine Halogenlampe, sendet weißes („polychromatisches“) Licht aus.
- Ein **Monochromator** „zerlegt“ dieses Licht in monochromatisches Licht, also Strahlung einer bestimmten, einstellbaren Wellenlänge. Die Zerlegung kann entweder mittels eines Prismas oder mittels eines optischen Gitters erfolgen.

Ein Prisma erzeugt nur *ein* Spektrum und ermöglicht daher eine höhere Leuchtkraft, ist aber nur schwer kalibrierbar. Ein optisches Gitter fächert das Licht in eine Vielzahl von Einzel-Spektren auf, ist dafür jedoch aufgrund des bereits im Abschnitt Wellenoptik beschriebenen Zusammenhangs wesentlich einfacher kalibrierbar.

Mittels einer schmalen, verschiebbaren Blende kann gezielt eine Lichtfarbe beziehungsweise ein nur sehr schmaler Bereich von Wellenlängen selektiert werden.

- Die **Probe**, häufig in einer Flüssigkeit gelöst, absorbiert einen Teil des Lichts. Während die Lichtstärke des vom Monochromator ausgehenden Strahls noch I_0 beträgt, verlässt der Strahl die Probe mit einer verringerten Intensität I .
- Ein **Detektor** misst die durch die Probe gehende Intensität der Lichtstrahlung und leitet die gemessenen Daten zur Auswertung an einen Computer weiter.

3.7.3.1 Das Lambert-Beer'sche Gesetz

Mit einem Spektrometer wird gemessen, wie stark Licht bei einer genau festgelegten Wellenlänge beim Durchgang durch eine mit einer flüssigen Probe gefüllten Küvette geschwächt wird. Beim Durchgang durch die Lösung wird das Licht exponentiell geschwächt, denn die in einer bestimmten „Schichttiefe“ absorbierte Lichtmenge ist proportional zur dort vorhandenen Lichtmenge. Immer, wenn die Änderung einer Größe proportional zum jeweiligen Wert der Größe ist, lässt sich die Zu- beziehungsweise Abnahme der Größe mittels einer Exponentialfunktion beschreiben.

Der Zusammenhang zwischen der ursprünglichen Intensität I_0 des Lichts vor der Probe und der Intensität I , die durch die Probe hindurchgeht beziehungsweise den Schirm erreicht, kann also folgendermaßen beschrieben werden:

$$I = I_0 \cdot e^{-k \cdot d}$$

Hierbei bezeichnet d die Schichtdicke der Probe, also die (innere) Breite der Küvette. Der Proportionalitätsfaktor k heißt „Extinktionskoeffizient“ und hängt von der Art und Konzentration der flüssigen Probe sowie von der Wellenlänge des Lichts ab.

Die Schwächung des Lichts ergibt sich aus dem Kehrwert des Quotienten:

$$\frac{I}{I_0} = e^{-k \cdot d}$$

$$\rightarrow \frac{I_0}{I} = e^{k \cdot d}$$

Die Extinktion E_λ (oder optische Dichte) einer Probe wird durch den dekadischen Logarithmus der Lichtschwächung definiert:

$$E_\lambda = \log_{10} \left(\frac{I_0}{I} \right) = \varepsilon_\lambda \cdot c \cdot d$$

Hierbei bezeichnet ε_λ den molaren dekadischen Extinktionskoeffizient der betreffenden gelösten Substanz für die verwendete Wellenlänge, c die molare Konzentration der gelösten Substanz und d die Durchtrittslänge des Lichts durch das Medium. Dieser Zusammenhang wird nach ihren Entdeckern **Lambert-Beersches-Gesetz** genannt.

4 THERMODYNAMIK (WÄRMELEHRE)

Die Thermodynamik (auch Wärmelehre genannt) ist die Wissenschaft der Zustandsänderungen von Körpern durch Zufuhr oder Abgabe von Wärme, sowie der Energieumwandlungen, bei denen Wärme beteiligt ist.

4.1 TEMPERATUR UND WÄRME

Die Temperatur kennzeichnet den Wärmezustand eines Körpers, das heißt die mittlere Bewegungsenergie seiner Teilchen.

- *Makroskopische Betrachtungsweise:*

Jeder Körper besitzt direkt beobachtbare Eigenschaften. Die Temperatur eines Körpers wird durch die von ihm aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge charakterisiert.

- *Mikroskopische Betrachtungsweise:*

Jeder Körper ist aus Teilchen aufgebaut, die in ständiger Bewegung sind. Der Wärmezustand eines Körpers wird durch eine bestimmte (mittlere) Geschwindigkeit dieser Teilchen charakterisiert.

Beide Betrachtungsweisen sind gleichermaßen gültig.

Abgeschlossene und isolierte Systeme

Ein System ist ein (zumindest gedanklich) von seiner Umgebung abgetrennter Bereich. Je nach Art der Grenzen eines Systems von seiner Umgebung unterscheidet man zwischen verschiedenen Arten von Systemen:

- Ein offenes System kann sowohl Energie wie auch Materie mit seiner Umgebung austauschen. Beispiele hierfür sind der menschliche Körper oder ein Verbrennungsmotor eines Kraftfahrzeugs. Physikalische Vorgänge in offenen Systemen sind meist schwierig zu berechnen, da hierfür die Materie- beziehungsweise Energieströme numerisch modelliert werden müssen.
- Ein geschlossenes System kann Energie, aber keine Materie mit seiner Umgebung austauschen. Beispiele hierfür sind Sonnenkollektoren, Kühlschränke oder Wärmepumpen.
- Ein isoliertes System kann weder Energie noch Wärme mit seiner Umgebung austauschen. In der Praxis lässt sich ein solches System kaum realisieren, doch stellen gut isolierte, verschlossene Thermosgefäße eine gute Näherung für ein solches System dar.

In den folgenden Kapiteln werden ausschließlich physikalische Eigenschaften von abgeschlossenen oder isolierten Systemen behandelt.

Zustands- und Prozessgrößen

In der Wärmelehre gibt bestimmte physikalische Größen, die den Zustand eines Systems beschreiben, beispielsweise Volumen, Druck oder Temperatur. So kann beispielsweise die Dichte eines Gases direkt mittels gegebenen Volumen-, Druck- und Temperaturwerten berechnet werden.

Weitere physikalische Größen, wie die von einem System aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge oder eine am System oder vom System verrichtete mechanische Arbeit sind so genannte Prozessgrößen. Derartige Größen können zwar nicht den Zustand eines Systems charakterisieren, ermöglichen es aber, Vorgänge im System oder Austauschvorgänge mit der Umgebung beschreiben.

Vereinbarungsgemäß wird die an einem thermischen System verrichtete Arbeit als positiv gewertet, wenn diese dem System zugeführt wird, und negativ, wenn diese vom System verrichtet wird. Diese Vorzeichen-Konvention, die ebenso für Wärmemengen gilt, erinnert an ein Bankkonto, in dem Einnahmen positiv und Ausgaben negativ verbucht werden.

In isolierten Systemen erfolgen zwar keine Austausch-Prozesse mit der Umgebung, jedoch können thermodynamische Prozesse auch innerhalb eines Systems stattfinden.

4.1.1 Thermometer

Fast alle Materialien dehnen sich bei Erwärmung aus. Dieses Verhalten der Körper wird zur Temperaturmessung mit Thermometer, d.h. Messgeräte für die Temperatur, verwendet.

Beispiele:

- Flüssigkeits-Thermometer zeigen die Temperatur durch die Länge der Flüssigkeitssäule in einem dünnen Glasröhrchen („Kapillare“) an. Sie enthalten meist nur wenig Flüssigkeit, da das Abkühlen oder Erwärmen einer großen Flüssigkeitsmenge (zu) lange dauern würde. Die Kapillare ist oben zugeschmolzen, damit die Flüssigkeit nicht verdunsten kann.

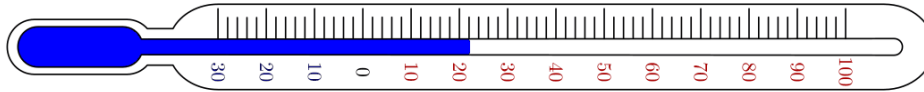


Abb. 4.1a Aufbau eines Thermometers.

- Bimetall-Thermometer bestehen aus einem Bimetall-Streifen (zwei aneinander fixierte Streifen aus Metallen mit unterschiedlicher Ausdehnung), der zu einer Spirale gebogen ist. Bei Erwärmung erweitert sich die Spirale, bei Abkühlung verengt sie sich. Von der Spirale wird ein Zeiger bewegt, der auf einer Skala die Temperatur anzeigt.

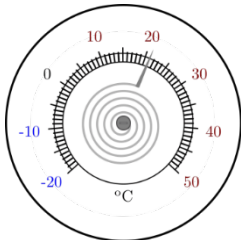


Abb. 4.1b Aufbau eines Bimetall-Thermometers.

Um mit einem Thermometer konkrete Temperaturmessungen durchführen zu können, müssen die Messwerte anhand einer bestimmten Temperatur-Skala ablesbar sein.

4.1.2 Temperatur-Skalen

Um Temperaturangaben (auch international) vergleichbar zu machen, wurden im Laufe der Geschichte verschiedene Temperatur-Skalen entwickelt. Dabei werden zwei fest vorgegebene Temperaturwerte als „Fixpunkte“ festgelegt, und der Temperaturbereich zwischen beiden Fixpunkten in gleiche Abschnitte unterteilt. Die wichtigsten drei Temperatur-Skalen sind:

- **Celsius-Skala:**
Bei der Celsius-Skala (benannt nach Anders Celsius) liegt der erste Fixpunkt bei 0°C und entspricht der Schmelztemperatur von Eis; der zweite Fixpunkt liegt bei 100°C und entspricht der Siedetemperatur von Wasser. Temperaturen unter 0°C werden durch ein vorgesetztes Minuszeichen gekennzeichnet.
- **Kelvin-Skala:**
Bei der Kelvin-Skala (benannt nach Lord Kelvin) ist der Abstand von Grad zu Grad mit dem der Celsius-Skala identisch. Als unterer (und einziger) Fixpunkt wird bei der Kelvin-Skala jedoch die tiefste physikalisch mögliche Temperatur verwendet. Dieser absolute Nullpunkt liegt bei etwa -273°C (exakt: 0K = -273,15°C). Die Umrechnung zwischen Temperaturen in Celsius und Kelvin erfolgt nach folgendem Schema:

$$\text{Temperatur in K} = \text{Temperatur in } ^\circ\text{C} + 273$$

$$\text{Temperatur in } ^\circ\text{C} = \text{Temperatur in K} - 273$$

Bei der Angabe von Temperaturunterschieden sind Grad Celsius und Kelvin gleichwertig.

- **Fahrenheit-Skala:**
Bei der Fahrenheit-Skala (benannt nach Daniel Fahrenheit) liegt der erste Fixpunkt bei 32°F = 0°C, der zweite Fixpunkt liegt bei 212°F = 100°C.

Die Umrechnung zwischen Temperaturen in Celsius und Fahrenheit erfolgt nach folgendem Schema:

$$\text{Temperatur in } ^\circ\text{F} = (\text{Temperatur in } ^\circ\text{C} \cdot 1,8) + 32$$

$$\text{Temperatur in } ^\circ\text{C} = (\text{Temperatur in } ^\circ\text{F} - 32)/1,8$$

Weltweit wird inzwischen die Celsius-Skala am häufigsten verwendet. Die Kelvin-Skala wird sehr häufig im wissenschaftlichen Bereich genutzt, die Fahrenheit-Skala ist nur (noch) in Amerika und einigen weiteren Ländern in Gebrauch.

4.2 WÄRMEKAPAZITÄT UND PHASENÜBERGÄNGE

Wärme kann als eine Energieform aufgefasst werden. Führt man in einem isolierten System einem Gegenstand eine Wärmemenge Q zu, so erhöht sich dessen Temperatur T . Eine Voraussetzung dafür ist allerdings, dass sich der Aggregatzustand des Gegenstands während der Wärmezufuhr nicht ändert, also kein Phasenübergang (Schmelzen, Verdunsten, Sublimieren) stattfindet.

4.2.1 Wärmemenge und Wärmekapazität

Wie viel Wärme bei einem konkreten Gegenstand für eine bestimmte Erwärmung nötig ist, hängt vom Material des Gegenstands und seiner Masse ab: Eine Tasse Wasser benötigt für eine gleiche Erwärmung wesentlich weniger Energie als ein ganzes Schwimmbad. Die Menge an Wärme, die man einem konkreten Gegenstand der Masse m zuführen muss, um ihn um $\Delta T = 1\text{K}$ zu erwärmen, wird als Wärmekapazität C des Gegenstands bezeichnet; ihre Einheit ist $\frac{\text{J}}{\text{K}}$. Für die zur Erwärmung nötige Wärmemenge Q gilt:

$$\Delta Q = C \cdot \Delta T$$

4.2.1.1 Die spezifische Wärmekapazität

Um Gegenstände aus unterschiedlichen Materialien hinsichtlich ihrer Wärmekapazität vergleichen zu können, gibt man die materialspezifische Wärmekapazität üblicherweise bezogen auf 1 Kilogramm des jeweiligen Materials an.

Definition:

Die Menge ΔQ an Wärme, die nötig ist, um $m = 1\text{kg}$ eines Stoffes um $\Delta T = 1\text{K}$ zu erwärmen, wird als spezifischen Wärmekapazität c bezeichnet:

$$c = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{m \cdot \Delta T}$$

Tab. 4.1 Spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe

Stoff	Wärmekapazität c in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$	Stoff	Wärmekapazität c in $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$
Aluminium	0,90	Kupfer	0,38
Eis	2,10	Quecksilber	0,14
Eisen	0,45	Silber	0,24
Ethanol	2,43	Wasser	4,18

Spezifische Wärmekapazität bei Gasen

Bei Gasen hängt die spezifische Wärmekapazität von der Art der Erwärmung ab. Je nachdem, ob während der Erwärmung der Druck p oder das Volumen V konstant gehalten wird, unterscheidet man zwischen den Wärmekapazitäten c_p und c_v :

- Die spezifische Wärmekapazität c_v eines Gases gibt an, wie viel Energie zur Erwärmung eines Kilogramms um ein Grad nötig ist, wenn das Volumen des Gases konstant bleibt. Die zugeführte Wärmemenge führt ausschließlich zu einer Erhöhung der mittleren Energie der Moleküle.

- Die spezifische Wärmekapazität c_p eines Gases gibt an, wie viel Energie zur Erwärmung eines Kilogramms um $\Delta T = 1K$ nötig ist, wenn der Druck des Gases konstant bleibt. Die zugeführte Wärmemenge erhöht hierbei einerseits die mittlere Energie der Moleküle, andererseits muss auch eine so genannte „Ausdehnungsarbeit“ am Gas verrichtet werden.

Eine gute Modellvorstellung hierfür liefert ein kubischer Gasbehälter, der nach oben durch einen beweglichen Kolben abgeschlossen ist. Auf dem Kolben wird ein Gewicht angebracht, das den Kolben so weit nach innen drückt, bis durch die Kompression des Gases ein entsprechend großer Gegendruck entsteht. Der durch das Gewicht bewirkte Kolbendruck ist dann mit dem Gasdruck im Gleichgewicht.

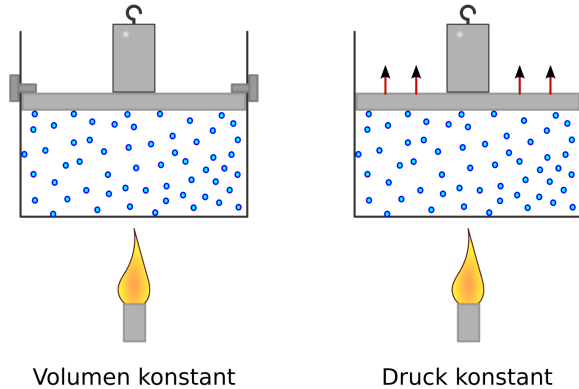


Abb. 4.2 Erwärmung von Gasen bei konstantem Volumen (links) und konstantem Druck (rechts).

Bei einer Erwärmung mit konstantem Volumen wird der Kolben bei dieser Anordnung nach oben hin mit zwei Bolzen fixiert, so dass sich das Gas auch bei zunehmender Temperatur nicht ausdehnen kann. Ohne Fixierung hingegen kann sich das Gas hingegen nach oben hin ausdehnen, bis sich wiederum ein Gleichgewicht zwischen dem Kolben- Gasdruck einstellt.

Dehnt sich das Gas bei konstantem Druck p um das Volumen ΔV aus, so gilt für die vom Gas verrichtete Ausdehnungsarbeit:

$$p \cdot \Delta V = \frac{F}{A} \cdot \Delta V$$

Allgemein gilt für beliebige Gase stets $d_p > d_v$, da bei konstantem Volumen keine Energie für die Ausdehnung Gases zugeführt werden muss. Bei konstantem Druck steht der Anteil der zugeführten Energie, der zur Verrichtung der Ausdehnungsarbeit benötigt wird, nicht für die Erwärmung des Gases zur Verfügung, es muss also mehr Energie für eine gleiche Erwärmung investiert werden. Bei Flüssigkeiten ist die Wärmeausdehnung wesentlich geringer als bei Gasen, so dass hierbei häufig nur ein c -Wert angegeben wird.

4.2.2 Mischungsvorgänge

Bei Mischungsvorgängen in einer isolierten Umgebung wird vom wärmeren Objekt genauso viel Wärme abgegeben, wie vom kälteren Objekt aufgenommen wird. Dies gilt für Festkörper, Flüssigkeiten und Gase gleichermaßen. Dieser Sonderfall des Energieerhaltungssatzes wird auch Richmannsche Mischungsregel bezeichnet:

$$-Q_{abgegeben} = Q_{aufgenommen}$$

$$-m_1 \cdot c_1 \cdot (T_M - T_1) = m_2 \cdot c_2 \cdot (T_M - T_2)$$

Mit T_M wird die Mischungstemperatur bezeichnet, die sich nach dem Mischungsvorgang ergibt. Die Vorzeichen der Wärmebilanz ergeben sich daraus, dass aufgenommene Wärmemengen der Konvention nach positiv gezählt, abgegebene Wärmemengen hingegen negativ gewertet werden. Auf beiden Seiten wurden in der obigen Gleichung die Wärmemengen dann mittels der Formel für die spezifische Wärmekapazität ausgedrückt.

Mittels der obigen Formeln kann experimentell wahlweise die spezifische Wärmekapazität eines Gegenstands oder seine Anfangstemperatur bestimmt werden. Isolierte Anordnungen, die zu genau diesem Zweck konstruiert sind, heißen Kalorimeter.

4.2.3 Phasenübergänge

In welchem Zustand ein Stoff vorliegt, hängt von seiner Temperatur und dem Druck seiner Umgebung ab. Je nachdem, wie groß die thermische Bewegungsenergie der einzelnen Teilchen gegenüber der Stärke ihrer Bindungen mit den Nachbarpartikeln ist, können (fast) alle Stoffe als fest, flüssig oder gasförmig vorkommen.

Wechsel zwischen den drei Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig werden als Phasenübergänge bezeichnet.

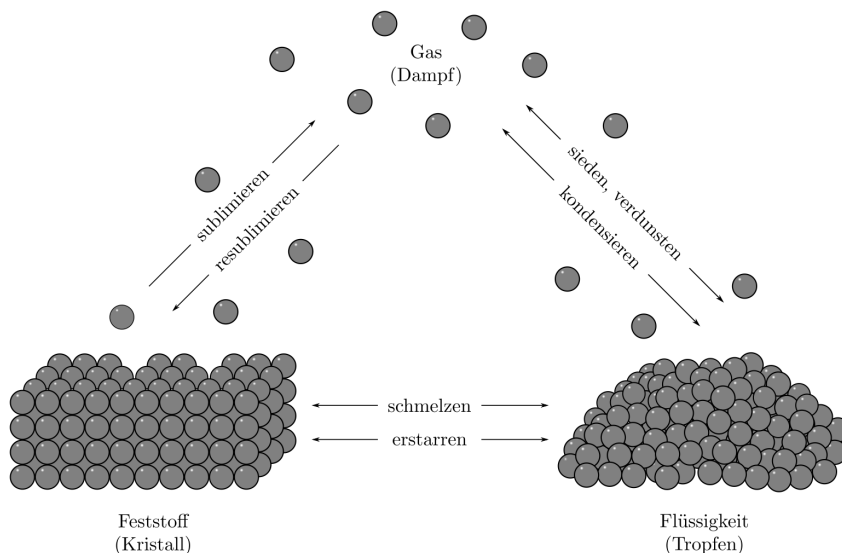


Abb. 4.3 Teilchenmodell von Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen sowie Phasenübergänge zwischen den drei Aggregatzuständen.

4.2.3.1 Schmelzen und Erstarren

Wird ein Festkörper erwärmt, so schwingen seine Teilchen immer stärker um ihre Ruhelage. Zu einem bestimmten Zeitpunkt reichen die im Objekt wirkenden Kohäsionskräfte nicht mehr aus, um die Teilchen an ihre Plätze zu binden – der Festkörper schmilzt.

Wird einer Flüssigkeit Wärme entzogen, so geht sie bei einer bestimmten Temperatur wieder in den festen Aggregatzustand über. Dieser Vorgang heißt Erstarren.

Grundsätzlich gilt für beliebige Schmelz- und Erstarrungsvorgänge:

- Wärme, die einem Festkörper während des Schmelzens zugeführt wird, ist zum Aufbrechen der Festkörper-Strukturen nötig und steht somit nicht für eine Temperaturerhöhung zur Verfügung. Die Temperatur bleibt während des Schmelzvorgangs stets konstant.
- Die Schmelz- und Erstarrungstemperatur eines Stoffes sind identisch. Ebenso sind die zum Schmelzen nötige beziehungsweise die beim Erstarren freiwerdenden Wärmemengen (Schmelzenergie bzw. Erstarrungsenergie) identisch.

Die meisten Materialien dehnen sich beim Schmelzen aus und ziehen sich beim Erstarren zusammen (Ausnahme: Die Anomalie des Wassers).

Tab. 4.2 Schmelztemperaturen verschiedener Stoffe bei Normaldruck (1013 hPa)

Stoff	Schmelztemperatur in °C	Stoff	Schmelztemperatur in °C
Aluminium	660	Quecksilber	-39
Eis	0	Silber	960
Eisen	1530	Wolfram	3380
Kupfer	1083		

Manche Stoffe, beispielsweise Glas, haben keine bestimmte Schmelztemperatur:

- Glas erweicht bei 700°C und wird bei 1300°C dünnflüssig. Man kann Glas als eine Flüssigkeit ansehen, die bei Zimmertemperatur äußerst zäh ist.
- Andere Stoffe, beispielsweise Holz, verbrennen, wenn man sie an Luft stark erwärmt.

Die Schmelzwärme

Um einen bestimmten Feststoff zum Schmelzen zu bringen, muss ihm eine entsprechende Wärmemenge zugeführt werden. Die Menge an Wärme ist von der Art des Stoffs und seiner Masse abhängig.

4.2.3.2 Sieden und Kondensieren

Wird ein flüssiger Stoff auf seine Siedetemperatur erhitzt, so bewegen sich die Flüssigkeitsteilchen mit sehr großer Geschwindigkeit. Sie können dadurch die Kohäsionskräfte überwinden. Innerhalb der Flüssigkeit entstehen Dampfblasen, der Stoff geht in den gasförmigen Aggregatzustand über. Dabei muss Wärme zugeführt werden.

Wird Dampf Wärme entzogen, so geht er bei einer bestimmten Temperatur wieder in den flüssigen Aggregatzustand über. Dieser Vorgang heißt Kondensieren.

- Während des Siedens ändert sich die Temperatur des Materials trotz Wärmezufuhr nicht.
- Die Siedetemperatur und Kondensationstemperatur eines Stoffes sind identisch.

Tab. 4.3 Siedetemperaturen verschiedener Stoffe bei Normaldruck (1013 hPa)

Stoff	Siedetemperatur in °C	Stoff	Siedetemperatur in °C
Ethanol	78	Quecksilber	357
Kupfer	2590	Wasser	100
Meerwasser	104	Wolfram	5500

Die Verdampfungswärme

Um eine bestimmte Flüssigkeit zum Sieden zu bringen, muss ihr – ebenso wie beim Schmelzen – eine entsprechende Wärmemenge zugeführt werden. Die Menge an Wärme ist wiederum von der Art der Flüssigkeit und ihrer Masse abhängig.

Beim Kondensieren wird die gleiche Menge an Wärme wieder an die Umgebung abgegeben.

Geht bei Sublimations- beziehungsweise Resublimationsvorgängen ein Stoff unmittelbar von der festen in die gasförmige Phase über (oder umgekehrt), so ist die spezifische Wärme gleich der Summe der Schmelz- und Verdampfungswärme des jeweiligen Stoffs.

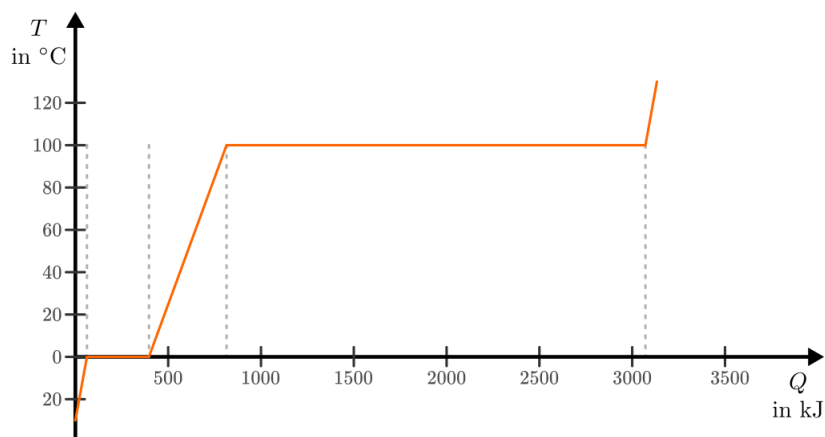


Abb. 4.4 Benötigte Energiemenge zur Erwärmung von $m = 1\text{ kg}$ Wasser von -30°C (Eis) bis 130°C (Dampf).

Anhand der Werte aus den Tabellen zur Schmelz- und Verdampfungswärme erkennt man, dass für die Phasenübergänge große Mengen an Wärme zugeführt werden müssen. Da sich die Temperatur während des Schmelzens und Siedens nicht ändert, nennt man die bei Phasenübergängen umgesetzte Wärmemenge auch „latente Wärme“.

4.2.3.3 Verdunsten

Flüssigkeiten können bereits unterhalb ihrer Siedetemperatur in den gasförmigen Aggregatzustand übergehen. Beim Verdunsten müssen die Flüssigkeitsteilchen an der Oberfläche die Kohäsionskräfte der anderen Teilchen überwinden. Das ist möglich, weil sich nicht alle Flüssigkeitsteilchen mit der gleichen Geschwindigkeit bewegen. Nur Teilchen mit großer Geschwindigkeit sind in der Lage, die Flüssigkeit zu verlassen, wenn sie an die Oberfläche gelangen.

Die in der Flüssigkeit verbleibenden Teilchen haben eine geringere durchschnittliche Geschwindigkeit als die verdunstenden; somit entschwindet beim Verdunsten mit den schnellen, aus der Flüssigkeit entweichenden Teilchen auch Wärme. Die verbleibende Flüssigkeit kühlt sich daher ab („Verdunstungskälte“).

Das Verdunsten einer Flüssigkeit kann folgendermaßen beeinflusst werden:

- Je höher die Temperatur und je größer die Oberfläche, desto schneller verdunstet eine Flüssigkeit.
- Wird der entstehende Dampf fortgeführt, so verdunstet die Flüssigkeit ebenfalls schneller.

Ebenfalls relevant für den Verdunstungsvorgang ist die Dampfmenge in der umgebenden Luft; im Fall von Wasserdampf spricht man von Luftfeuchtigkeit.

Die Menge an Wasserdampf, die ein bestimmtes Volumen an Luft maximal aufnehmen kann, ist stark abhängig von der Temperatur der Luft. Die so genannte „Sättigungsmenge“ nimmt mit der Temperatur überproportional zu.

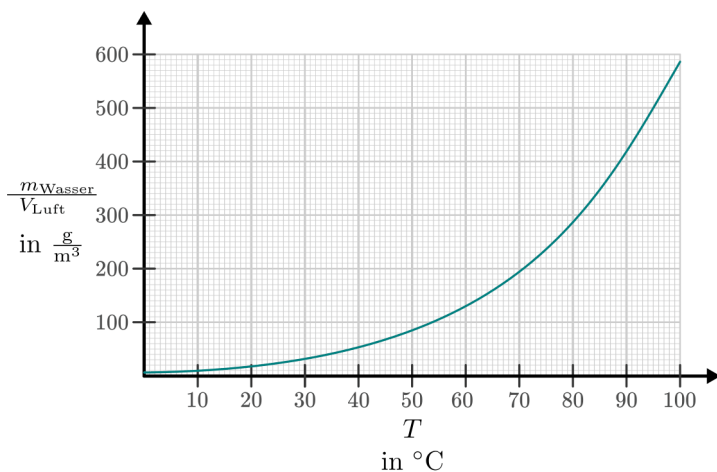


Abb. 4.5 Sättigungsmenge von Wasserdampf in Luft bei verschiedenen Temperaturen.

Die „absolute“ Feuchtigkeit von Luft gibt an, wie viel Gramm Wasserdampf aktuell je Kubikmeter enthalten sind; die „relative“ Luftfeuchtigkeit hingegen gibt diesen Wert im Verhältnis zur beschriebenen Sättigungsmenge an. Da die absolute Feuchtigkeit und der Sättigungsdruck jeweils in $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ angegeben werden, ist die relative Luftfeuchtigkeit dimensionslos; sie wird üblicherweise in Prozent angegeben. Mit speziellen Messgeräten (so genannten „Hygrometern“) wird meist die relative Luftfeuchtigkeit gemessen.

Auch bei kalter und nebliger Außenluft kann ein kurzzeitiges Lüften ratsam sein, um die relative Luftfeuchtigkeit in einem Raum zu senken.

In Wohnräumen sind Luftfeuchtigkeiten zwischen 40% und 70% üblich. Luftfeuchtigkeiten von unter 25% und über 95% werden generell als unangenehm empfunden; in Gebäuden muss bei einer konstanten Luftfeuchtigkeit von über 80% mit Schimmelbildung gerechnet werden. In gefährdeten Räumen kann diesem durch häufiges, kurzzeitiges Lüften und/oder durch kontinuierliches Lüften mit Wärmerückgewinnung („Wärmetauscher“) vorgebeugt werden.

4.3 AUSBREITUNG VON WÄRME

Ein von selbst ablaufender Austausch von Wärme erfolgt stets von einem Objekt höherer Temperatur zu einem Objekt niedriger Temperatur, bis beide Objekte die gleiche Temperatur erreicht haben („Wärmegleichgewicht“). Die vom kalten Objekt aufgenommene Wärmemenge Q_1 ist hierbei gleich der vom warmen Objekt abgegebenen Wärmemenge Q_2 . Die Ausbreitung von Wärme kann auf drei Arten geschehen, die im folgenden Abschnitt näher beschrieben werden.

4.3.1 Die Wärmeleitung

Wird Wärme übertragen, obwohl der Körper selbst in Ruhe bleibt, so spricht man von Wärmeleitung. Dabei geben die schnellen Teilchen, aus denen der Körper besteht, ihre Energie allerdings durch Zusammenstöße an benachbarte, langsamere Teilchen ab. So gelangt Wärme von Orten mit hoher Temperatur zu Orten mit tieferer Temperatur.

In Festkörpern breitet sich die Wärme vorwiegend durch Wärmeleitung aus. In Flüssigkeiten und Gasen tritt ebenfalls, jedoch nur in geringem Maße, Wärmeleitung auf. Unterschiedliche Materialien können folglich die Wärme unterschiedlich gut leiten:

- Alle Metalle sind gute Wärmeleiter. Allgemein haben alle Materialien, die eine hohe elektrische Leitfähigkeit σ aufweisen, auch eine hohe Wärmeleitfähigkeit λ . Der Grund hierfür sind freie Elektronen, die sowohl elektrische Ladung als auch Wärme transportieren können.

In der Technik werden Metalle beispielsweise als Kühlkörper an Motoren und Computerchips eingesetzt. In chemischen Laboren werden zur Verwendung von Bunsenbrennern feinmaschige Drahtgitter eingesetzt, um die Flamme nach oben hin zu begrenzen: Das Gitter leitet die Wärme ab, so dass das Gas auf der oberen Seite die Zündtemperatur nicht erreicht.

- Glas, Porzellan, Plastik, Schaumstoff und Holz sind schlechte Wärmeleiter. Schaumstoff, Styropor usw. wird in Bauwerken als Isolationsmaterial eingesetzt. Holzgriffe dienen an Werkzeugen und Töpfen als Wärmedämmung.
- Flüssigkeiten sind schlechte, Gase sogar sehr schlechte Wärmeleiter. Dünne Luftschichten bis etwa 3cm dienen beispielsweise in Luftmatratzen als Isolationsschicht. In dickeren Schichten kann Luft zirkulieren (Wärmeströmung), wodurch die Isolationsfähigkeit erheblich absinkt.

Tab. 4.4 Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien

Material	λ in $\frac{W}{m \cdot K}$	Material	λ in $\frac{W}{m \cdot K}$
Silber	407	Wasser	0,6
Kupfer	389	Ethanol	0,17
Eisen	74	Luft	0,026
Eis	2,2	Schaumstoffe, Glas, Porzellan, Beton	≈ 1

Die hohe Wärmedämm-Fähigkeit von Stroh, Styropor, Kork, Mineralwolle oder Hohlziegeln beruht ebenfalls auf der schlechten Wärmeleitfähigkeit der eingeschlossenen Luft. Im Vakuum kann überhaupt keine Wärmeleitung stattfinden.

Quantitativ lässt sich die Wärmeleitung durch die in einer bestimmten Zeit transportierte Wärme beschreiben. Für den so genannten Wärmestrom I_Q gilt also:

$$I_Q = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Der Wärmestrom wird in Watt (Joule je Sekunde) gemessen.

Der Wärmestrom I_Q ist einerseits proportional zum Temperaturunterschied ΔT zwischen der heißen und der kalten Seite des Wärmeleiters, andererseits auch proportional zur Wärmeleitfähigkeit λ des Wärmeleitenden Materials. Zusätzlich ist I_Q direkt proportional zur Querschnittsfläche A und indirekt proportional zur Länge beziehungsweise Schichtdicke l des Wärmeleiters.

Der Wärmestrom findet stets in Richtung der kälteren Materialseite statt.

Reihen- und Parallelschaltung von Wärmeleitern

Oftmals besteht ein Wärmeleitender Körper, beispielsweise eine Wand mit Dämmschicht, aus mehr als einem Material. Werden dabei einzelne Schichten mit gleichen Flächen, aber unterschiedlichen Schichtdicken und unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten durchlaufen, so handelt es sich um eine „Reihenschaltung“ mehrerer Wärmeleiter. Um den Wärmestrom in diesem Fall zu berechnen, muss man (wie beim Ohmschen Gesetz der Elektrizitätslehre) die „Wärmewiderstände“ der einzelnen Schichten addieren.

Bei einer Reihenschaltung von Wärmewiderständen, beispielsweise doppelt verglasten Fenstern, sind die Querschnittsflächen der einzelnen Wärmewiderstände oftmals identisch. Sind die einzelnen Wärmeleiter nicht hintereinander, sondern nebeneinander angeordnet, so spricht man von einer „Parallelschaltung“ mehrerer Wärmeleiter. In diesem Fall addieren sich die Kehrwerte der Wärmewiderstände zum Kehrwert des Gesamtwiderstands.

4.3.2 Die Wärmeströmung

Strömende Flüssigkeiten und Gase können Wärme mitführen. Diese Art der Wärmeausbreitung, bei der die am Wärmetransport beteiligten Teilchen ihre Lage ändern, wird Wärmeströmung genannt.

Beispiele:

- Winde und Meeresströmungen transportieren die Wärme vom Äquator in Richtung der Pole.
- In einem Fön wird durch ein Windrad Luft angesaugt und an elektrisch beheizten Heizdrähten vorbei geleitet. So entsteht ein warmer Luftstrom. Mit dem Luftstrom gelangt Wärme an den gewünschten Ort.
- Bei einer Warmwasserheizung wird die Wärme durch das Wasser von der Zentralheizung aus in die Heizkörper transportiert.

Eine Vorrichtung zur Strömungserzeugung wie bei einem Fön ist dabei nicht nötig: An der erwärmten Stelle dehnt sich das Wasser aus, seine Dichte nimmt ab. Das erwärmte Wasser steigt deshalb nach oben. Kühleres Wasser strömt von der Seite her nach, so dass sich ein „Kreislauf“ bildet.

- Jede Flamme ruft in ihrer Umgebung eine Wärmeströmung hervor. Staub oder andere leichte Körper werden entlang dieser Strömung fortgetragen. Durch die Wärmeströmung wird auch ständig frische Luft, die zur Verbrennung notwendig ist, zur Flamme transportiert.

Wärmeströmungen entstehen, weil sich Flüssigkeiten und Gase beim Erwärmen stark ausdehnen und dadurch ihre Dichte verringern. In Vakuum oder ruhenden Körpern kann keine Wärmeströmung stattfinden.

Quantitativ lässt sich die durch Wärmeströmung übertragene Wärmemenge nur schwer erfassen, da die mathematischen Zusammenhänge bei Strömungsvorgängen sehr kompliziert sind.

4.3.3 Die Wärmestrahlung

Heiße Körper senden stets Wärmestrahlung aus. Durch diese Strahlung kann Wärme ohne Mitwirkung von Materie übertragen werden.

Wärmestrahlung kann Luft durchdringen, ebenso ist sie hinter Fensterscheiben wahrnehmbar. Die meisten Körper jedoch absorbieren Wärmestrahlung und werden durch sie erwärmt. Allgemein kann auftreffende Wärmestrahlung von einem Körper absorbiert, reflektiert, oder durchgelassen werden; Die Summe dieser drei Anteile ergibt stets 100%.

Beispiele:

- Körper mit dunkler Oberfläche absorbieren einen größeren Teil der Strahlung als Körper mit heller Oberfläche; sie erwärmen sich daher schneller. Der übrige Teil der Strahlung wird reflektiert.
- Glänzende Metalloberflächen reflektieren einen großen Teil der Wärmestrahlung, die restliche Wärmestrahlung wird absorbiert.

- Durchsichtiges Glas absorbiert nur einen kleinen Teil der Wärmestrahlung. Die Wärmestrahlung wird zum Teil reflektiert, zum Teil kann sie das Glas durchdringen. Ebenso erwärmen sich stehende Gewässer durch Sonnenstrahlen nur in der Nähe der Oberfläche; Wärmestrahlung kann dicke Wasserschichten nicht durchdringen.

Quantitativ kann die von einem heißen Gegenstand ausgestrahlte Wärmestrahlung – ähnlich wie bei den anderen Wärmetransportarten – durch den Wärmestrom $I_{Q,S}$ beschrieben werden:

$$I_{Q,S} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Diese Größe wird bisweilen auch „Bestrahlungsstärke“ genannt, ihre Einheit ist Watt je Quadratmeter. Beispielsweise kann in Mitteleuropa die Sonne an einem wolkenlosen Sommertag eine Bestrahlungsstärke von rund $1000 \frac{W}{m^2}$ erreichen.

Jedes Objekt, das Wärmestrahlung absorbieren kann, emittiert diese auch entsprechend effizient. Ein idealer „schwarzer Körper“, wie er in der Wärmelehre oft als vereinfachendes Modell angenommen wird, kann einerseits die auftreffende Wärmestrahlung zu 100% absorbieren und andererseits die seiner Temperatur entsprechende Wärmestrahlung bestmöglich abstrahlen. Für einen solchen Körper gilt das nach den Entdeckern Josef Stefan und Ludwig Boltzmann benannte Strahlungsgesetz, wonach die Intensität der Wärmestrahlung proportional zur vierten Potenz der absoluten Temperatur (gemessen in Kelvin) ist:

$$I_{Q,S} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

Die dabei auftretende Konstante σ wird dabei als „Stefan-Boltzmann-Konstante“ bezeichnet. Bei der Wärmestrahlung selbst handelt es sich – wie auch bei Licht – um elektromagnetische Wellen. Von einem heißen Körper wird allerdings nicht nur eine einzelne Wellenlänge, sondern vielmehr ein kontinuierliches Spektrum an unterschiedlichen Wellenlängen abgestrahlt. Die Verteilung der abgestrahlten Energiemengen bei einer bestimmten Temperatur ist dabei wiederum von der Wellenlänge λ abhängig.

Kann ein Objekt Wärmestrahlung nicht zu 100% absorbieren oder emittieren, so muss in der obigen Formel auf der rechten Gleichungsseite noch ein Zahlenfaktor eingefügt werden. Der Emissionsbeziehungsweise Absorptionsgrad ε eines Objekts kann bei unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich groß sein.

Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Spektrum der Strahlung zu kürzeren Wellenlängen. Während bei geringen Temperaturen die abgestrahlten Wellenlängen überwiegend im infraroten Bereich liegen, beginnt eine heiße Oberfläche ab einer Temperatur von mindestens $T = 700^\circ C$ für das menschliche Auge sichtbar zu glühen.

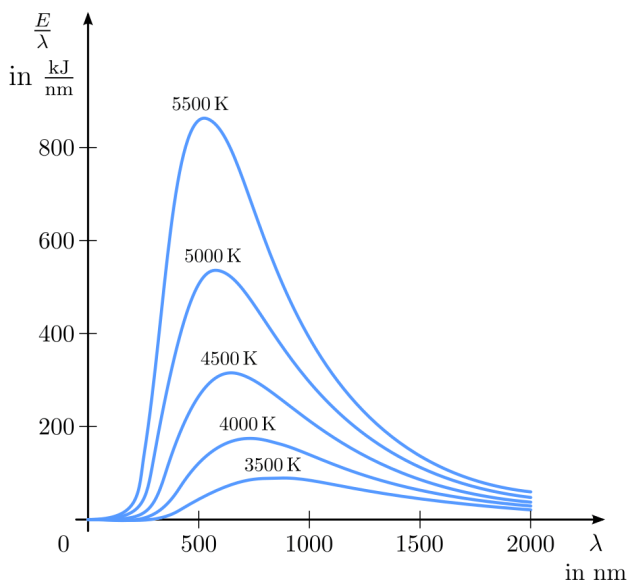


Abb. 4.6 Die spektrale Energiedichte (abgestrahlte Energie je Wellenlänge) der Wärmestrahlung eines schwarzen Körpers bei verschiedenen Temperaturen.

4.4 AUSDEHNUNG BEI ERWÄRMUNG

Die meisten festen, flüssigen und gasförmigen Körper dehnen sich beim Erwärmen aus und ziehen sich beim Abkühlen zusammen. Gase dehnen sich bei Erwärmung am meisten, feste Stoffe am wenigsten aus.

4.4.1 Ausdehnung von Festkörpern

Ändert sich die Temperatur eines festen Körpers um einen bestimmten Betrag, so ändert sich entsprechend auch seine Länge beziehungsweise seine Oberfläche und sein Volumen. Mit steigender Temperatur nimmt die Länge zu, mit sinkender Temperatur nimmt die Länge ab.

(Allerdings gibt es auch ein paar wenige Ausnahmen von der Regel: Manche Stoffe verringern - zumindest in bestimmten Temperaturbereichen - ihr Volumen bei Temperaturerhöhung, z.B. Gummi.)

Im Wesentlichen ist temperaturbedingte Längen- beziehungsweise Volumenzunahme eines Festkörpers darauf zurückzuführen, dass die Atome beziehungsweise Moleküle des Festkörpers mit zunehmender Temperatur stärker um ihre Ruhelage schwingen. Dadurch vergrößern sich die Abstände zwischen den einzelnen Teilchen, und das Volumen des Körpers nimmt zu; zugleich nehmen die Kohäsionskräfte, welche die Atome beziehungsweise Moleküle des Festkörpers zusammenhalten, geringer.

In der Technik versucht man geeignete Materialkombinationen zu nutzen, um mechanische Spannungen aufgrund von (unterschiedlich starken) Wärmeausdehnungen zu vermeiden. Beispielsweise werden in den Übergangskonstruktionen von Brücken Dehnungsfugen und Gleitlager eingesetzt, um temperaturbedingte Spannungen zu minimieren.

4.4.2 Ausdehnung von Flüssigkeiten

Ändert sich die Temperatur einer Flüssigkeit um einen bestimmten Betrag, so ändert sich entsprechend auch ihr Volumen. Mit steigender Temperatur nimmt das Volumen zu, mit sinkender Temperatur nimmt das Volumen ab.

Im Wesentlichen ist temperaturbedingte Volumenzunahme von Flüssigkeiten darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeit der Atome beziehungsweise Moleküle in der Flüssigkeit zunimmt. Die Teilchen beanspruchen so mehr Raum innerhalb der Flüssigkeit, das Volumen nimmt zu.

Ändert sich das Volumen einer bestimmten Flüssigkeitsmenge, so ändert sich auch die Dichte der Flüssigkeit. Im Allgemeinen nimmt die Dichte von Flüssigkeiten mit wachsender Temperatur ab.

Die Anomalie des Wassers

Eine große Besonderheit („Anomalie“) des Wassers liegt darin, dass es bei 4°C seine größte Dichte hat. Unterhalb dieser Temperatur dehnt es sich wieder aus, bis es bei 0°C zu Eis erstarrt.

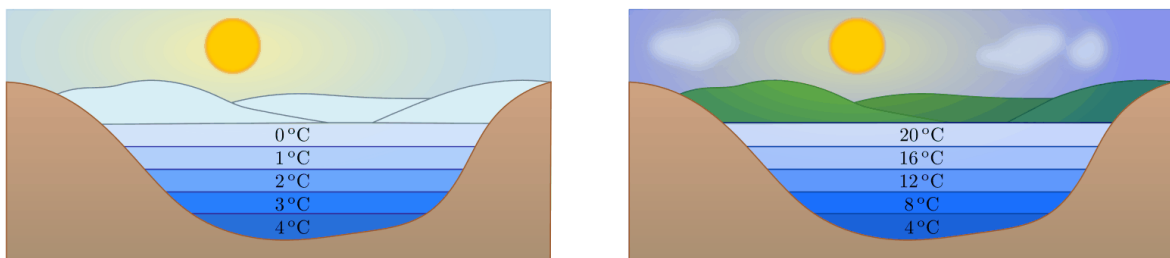


Abb. 4.7 Die Anomalie des Wassers am Beispiel eines Sees (links: Winter, rechts: Sommer).

Beispiel:

- Im Sommer ist die Oberfläche eines Sees warm. Die Temperatur sinkt mit zunehmender Tiefe.
- Im Herbst kühlt das Wasser an der Oberfläche ab und sinkt nach unten. Das Tiefenwasser steigt empor und wird an der Oberfläche ebenfalls abgekühlt. Schließlich herrscht überall im Wasser die Temperatur 4°C.

- Im Winter wird das Wasser an der Oberfläche weiter abgekühlt, sinkt aber nicht mehr ab. Bei 0°C bildet sich an der Oberfläche des Sees eine (isolierende) Eisdecke, die Wassertemperatur am Grund des Sees beträgt weiterhin 4°C. Bei starkem und langanhaltendem Frost wird die Eisdecke zunehmend dicker; flache Gewässer können dann von oben bis zum Grund gefrieren.

Eine zweite Besonderheit des Wassers liegt darin, dass es im erstarrten Zustand (Eis) eine geringere Dichte hat als im flüssigen Zustand. Dies hat einerseits zur Folge, dass Eis in Wasser schwimmt, andererseits dehnt sich Wasser beim Erstarren stark aus. Dabei kann es große Kräfte ausüben; mit Wasser gefüllte Gefäße können beim Gefrieren des Wassers platzen („Sprengwirkung“). Bei Kraftfahrzeugen werden daher Frostschutzmittel in das Kühlwasser gemischt, welche die Erstarrungstemperatur absenken und ein Erstarren der Kühlflüssigkeit verhindern sollen.

4.4.3 Ausdehnung von Gasen

Bei Erwärmung dehnen sich Gase wesentlich stärker aus als Flüssigkeiten. Bleibt der Druck eines Gases während der Erwärmung konstant, so dehnt es sich proportional zur absoluten Temperatur aus.

Die temperaturbedingte Volumenzunahme von Gasen ist – wie bei Flüssigkeiten – im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass die Geschwindigkeit der Atome beziehungsweise Moleküle im Gas zunimmt. Dadurch beanspruchen die Teilchen mehr Raum, das Volumen des Gases nimmt zu. Experimentell lässt sich eine Ausdehnung bei konstantem Druck beispielsweise mittels eines (Luft-)Ballons in einem Wasserbad oder mittels eines Zylinders mit beweglichem Kolben verwirklichen. In beiden Fällen bleibt die Menge der Gasteilchen innerhalb des Gefäßes konstant, es handelt sich also um geschlossene Systeme. Kann ein Gas während einer Temperaturänderung um ΔT sein Volumen V nicht ändern, weil es beispielsweise in einem festen Behälter eingesperrt ist, so ändert sich anstelle dessen sein Druck p .

Die Zustandsgleichung eines idealen Gases

Unter Normaldruck und weit oberhalb des Siedepunkts verhalten sich alle Gase näherungsweise wie ein ideales Gas, d.h. das Volumen der einzelnen Gasteilchen kann (im Vergleich zum Gesamtvolumen) ebenso vernachlässigt werden wie die Wechselwirkung der einzelnen Teilchen untereinander.

Für das thermische Verhalten eines Gases sind neben der Temperatur T auch der Druck p und das Volumen V von Bedeutung.

Formel:

Bleibt die Masse eines (idealen) Gases konstant, so ist das Produkt aus Druck p und Volumen V , geteilt durch die absolute Temperatur T , konstant:

$$\frac{p \cdot V}{T} = \text{konstant}$$

Die obige Gleichung wird als „Zustandsgleichung eines idealen Gases“ bezeichnet und gilt unter Normalbedingungen auch in sehr guter Näherung für reale Gase. Sie wird häufig auch in folgender Form geschrieben:

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Dabei werden mit p_1, T_1, V_1 die thermischen Größen eines Gases *vor* einer Zustandsänderung beschrieben, entsprechend stellen p_2, T_2, V_2 die thermischen Größen *nach* der Zustandsänderung dar. Bei Kenntnis von fünf der sechs vorkommenden Größen kann somit jederzeit auch die sechste Größe berechnet werden.

Anschaulicher wird die Bedeutung der Gleichung, wenn man die drei möglichen Spezialfälle betrachtet, die sich ergeben, wenn jeweils eine der Zustandsgrößen p, T, V konstant bleibt:

- Wird das Volumen V konstant gehalten („isochore“ Zustandsänderung), so ist das Verhältnis aus Druck und Temperatur konstant:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

Wird beispielsweise die (absolute) Temperatur eines Gases bei gleichbleibendem Volumen verdoppelt, so verdoppelt sich auch der Druck im Gas.

- Wird der Druck p konstant gehalten („isobare“ Zustandsänderung), so ist das Verhältnis aus Volumen und Temperatur konstant:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Wird die Temperatur eines Gases bei gleichbleibendem Druck erhöht, erhöht sich auch das Volumen und umgekehrt. Wird beispielsweise die Temperatur eines Gases verdoppelt, so verdoppelt sich auch sein Volumen.

Die Bestätigung dieses Zusammenhangs durch zahlreiche Experimente ist Grundlage der Festlegung der absoluten Temperatur auf $-273,15^\circ\text{C} = 0\text{ K}$: Bei dieser Temperatur würde ein ideales Gas kein Volumen mehr besitzen. Praktisch wird dieser „absolute Nullpunkt“ nicht erreicht; reale Gase kondensieren vorher zu einer Flüssigkeit.

- Wird die Temperatur T konstant gehalten („isotherme“ Zustandsänderung), so ist bei Gasen das Produkt aus Druck und Volumen konstant:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Wird das Volumen eines Gases bei gleichbleibender Temperatur verkleinert, erhöht sich der Druck und umgekehrt. Wird beispielsweise das Volumen eines Gases bei konstanter Temperatur halbiert, so verdoppelt sich der Druck.

Eine Erweiterung der Zustandsgleichung für ideale Gase stellt die allgemeine Gasgleichung dar.

4.5 DIE ALLGEMEINE GASGLEICHUNG

Die Zustandsgleichung für ideale Gase in einem geschlossenen System kann auch in folgender Form geschrieben werden:

$$p \cdot V = \text{konst.} \cdot T$$

Betrachtet man 1 mol eines Gases, so ist der konstante Faktor auf der rechten Seite der obigen Gleichung gleich der allgemeinen Gaskonstante R ; betrachtet man n mol an Teilchen, so ist die Konstante entsprechend n -mal so groß. Es gilt somit für beliebige Gasmengen innerhalb eines geschlossenen Systems:

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

Diese Gleichung wird als „allgemeine Gasgleichung“ bezeichnet und gilt in sehr guter Näherung bei nicht allzu hohen Drücken auch für reale Gase.

Normalvolumen eines Gases

Mit obiger Gleichung kann beispielsweise bestimmt werden, welches Volumen V_0 die Stoffmenge $n = 1\text{ mol}$ eines idealen Gases unter Normalbedingungen einnimmt.

Als Ergebnis erhält man, dass ein Mol eines idealen Gases (und in guter Näherung auch ein Mol eines realen Gases) unter Normalbedingungen ein Volumen von rund 22,4 l einnimmt.

4.5.1 Die Van-der-Waals-Gleichung

Die allgemeine Gasgleichung gilt in guter Näherung nur für Gase mit geringer Dichte. Bei großen Gasdichten, beispielsweise bei gesättigtem Dampf, können reale Gase nicht mehr als „ideale“ Gase betrachtet werden. In diesem Fall muss einerseits die Wechselwirkung zwischen den Gasmolekülen, andererseits auch das Eigenvolumen der Gasteilchen berücksichtigt werden. Aus der allgemeinen Gasgleichung ergibt sich mit den entsprechenden Korrektur-Termen die so genannte Van-der-Waals-Gleichung, die für n Mole eines Gases folgendermaßen lautet:

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = n \cdot R \cdot T$$

Hierbei bezeichnet b das Eigenvolumen der Gasteilchen; durch den Korrekturterm $\frac{a}{V^2}$ wird der durch die Wechselwirkungen der Gasteilchen verursachte Binnendruck berücksichtigt.

In einem $p(V)$ -Diagramm verlaufen die Isothermen oberhalb einer bestimmten, als „kritisch“ bezeichneten Temperatur T_{kr} ebenso wie die Isothermen von idealen Gasen. Unterhalb von T_{kr} sind die Isothermen S-förmig gebogen.

4.6 DIE KINETISCHE GASTHEORIE

Viele reale Gase können unter Standardbedingungen in guter Näherung mittels des Modells der idealen Gase beschrieben werden: Die Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Teilchen ist meist vernachlässigbar gering, und ebenso ist das Volumen der einzelnen Teilchen klein im Vergleich zum Gesamtvolumen des Gases. Geht man von diesen Annahmen aus, so kann ein Gas als große Anzahl einzelner Atome oder Moleküle angesehen werden, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten in unterschiedliche Richtungen bewegen, wobei die einzelnen Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten statistisch gleich verteilt sind.

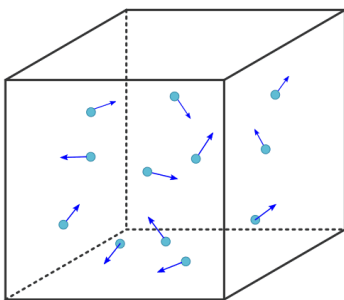


Abb. 4.8 Geschwindigkeitsverteilung von Gasteilchen in einem kubischen Behälter.

In einem einfachen Modell kann man von einem einzelnen Gasteilchen ausgehen, das sich in einem kubischen Behälter in x -Richtung auf die linke Wand des Behälters zu bewegt. Bis das Teilchen wieder auf die linke Wand trifft, muss es eine gewisse Strecke zurücklegen. Bis zum nächsten Stoß mit der linken Wand vergeht eine gewisse Zeit.

Die Kraft, die das Teilchen auf die Wand ausübt, ist gleich der Impulsänderung je Zeit.

Der Druck, der von dem einzelnen Teilchen auf die linke Wand ausgeübt wird, ist gleich dem Quotienten aus Kraft und Wandfläche.

Bei der Bewegung der Gasteilchen im Behälter tritt keine Geschwindigkeitsrichtung bevorzugt auf.

Für die kinetische Gastheorie gilt folgende Gleichung:

$$\bar{E}_{kin} = \frac{3}{2} \cdot k_B \cdot T$$

Die kinetische Energie der Gasteilchen nimmt also direkt proportional mit der (absoluten) Temperatur des Gases zu. Mit Hilfe der Gleichung kann einerseits bestimmt werden, welche kinetische Gesamtenergie die Teilchen einer Gasmenge bei einer bestimmten Temperatur aufweisen, andererseits allerdings auch berechnet werden, wie groß die durchschnittliche Geschwindigkeit der einzelnen Gasteilchen bei einer bestimmten Temperatur ist.

Freiheitsgrade mehratomiger Gasteilchen

Die absolute Temperatur ist ein Maß für die mittlere Bewegungsenergie eines Gasteilchens. Ein einatomiges Gas kann sich translatorisch in jede der drei Richtungen des Raumes bewegen; man sagt hierfür, dass ein solches Gasteilchen drei Translations-Freiheitsgrade besitzt. Zusätzlich kann sich ein atomares Gasteilchen um seinen Schwerpunkt drehen (ähnlich wie eine starre Kugel), es besitzt also auch drei Rotations-Freiheitsgrade.

- Einatomige Gase kann man sich modellhaft als „glatte“ Kugeln vorstellen; sie tauschen bei Zusammenstößen keine Rotationsenergie aus. Für einatomige Gase sind somit nur die drei Translations-Freiheitsgrade von Bedeutung.
- Gasteilchen, die aus zwei Atomen bestehen, kann man sich modellhaft wie „Hanteln“ vorstellen. Man hat experimentell festgestellt, dass bei derartigen Molekülen unter gewöhnlichen Bedingungen neben den drei Translations-Freiheitsgraden nur *zwei* Rotations-Freiheitsgrade in Erscheinung treten: Das Molekül kann bei normalen Temperaturen um beide Querachsen rotieren, nicht jedoch um die Längsachse; den dritten Rotations-Freiheitsgrad bezeichnet man als „eingefroren“. Insgesamt weisen zweiatomige Gasteilchen somit 5 Freiheitsgrade auf.

Je geringer die molare Masse eines Gases ist, desto höher ist bei einer bestimmten Temperatur also die durchschnittliche Geschwindigkeit der enthaltenen Teilchen.

4.7 DIE HAUPTSÄTZE DER WÄRMELEHRE

Stellt man einen heißen Körper in eine kältere Umgebung, so kühlt er ohne Fremdeinwirkung allmählich ab. Nach einiger Zeit ist er im so genannten thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, nimmt also im Normalfall die gleiche Temperatur wie seine Umgebung an. Ebenso werden anfänglich kalte Körper durch eine warme Umgebung bis zum thermischen Gleichgewicht erwärmt.

„Nullter“ Hauptsatz

Steht ein System *A* im thermischen Gleichgewicht mit einem System *B*, und steht gleichzeitig das System *B* im thermischen Gleichgewicht mit einem weiteren System *C*, so stehen auch die Systeme *A* und *C* im thermischen Gleichgewicht. Diese Feststellung mag trivial klingen, stellt jedoch eine wichtige Voraussetzung beispielsweise für Temperatur-Messverfahren dar.

Da historisch gesehen zunächst die anderen drei Hauptsätze formuliert wurden und diese implizit auf die obige Feststellung aufbauen, wurde der genannte Hauptsatz im Nachhinein als „nullter“ Hauptsatz bezeichnet.

4.7.1 Erster Hauptsatz der Wärmelehre

Energie kann nicht erzeugt oder vernichtet, sondern nur von einer Energieform in eine andere umgewandelt werden. Dieser Erhaltungssatz gilt nicht nur für mechanische Energieformen, sondern auch für Wärmemengen. Wird einem System von außen eine Wärmemenge ΔQ zugeführt oder eine Arbeitsmenge ΔW am System verrichtet, so erhöht sich dessen „innere“ Energie *U* um genau diesen Betrag:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

Dieser Zusammenhang, der erstmals von Julius Robert Mayer und Hermann von Helmholtz formuliert wurde, wird erster Hauptsatz der Wärmelehre genannt. Ist ein System nach außen hin thermisch isoliert („abgeschlossenes System“), so bleibt die innere Energie *U* des Systems erhalten. Wird einem System Arbeit oder Wärme zugeführt, so erhalten die entsprechenden Mengen in den obigen Gleichungen üblicherweise ein positives, andernfalls ein negatives Vorzeichen.

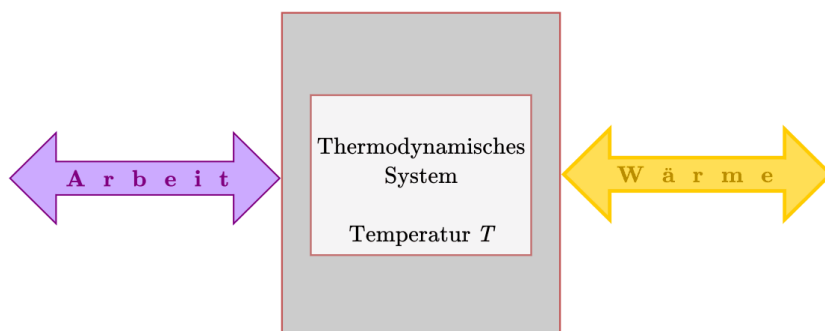


Abb. 4.9 Erster Hauptsatz: Energiebilanz eines thermodynamischen Systems.

Beispiele:

- Erhitzt man beispielsweise einen Topf mit Wasser auf einer elektrischen Herdplatte, so führt man dem System (Topf) von außen eine Wärmemenge $+Q$ zu. Wird vom Topf weniger Wärme an die Umgebung abgegeben (beispielsweise durch Wärmestrahlung), so erhöht sich seine innere Energie und damit seine Temperatur.

Im umgekehrten Fall gibt jedes System durch Wärmeleitung und/oder Wärmestrahlung eine Wärmemenge $-Q$ ab, wenn es in eine kältere Umgebung gebracht wird. In beiden Fällen ändert sich die innere Energie, ohne dass mechanische Arbeit verrichtet wird.

- Reibt man sich die Hände, so erhöht sich deren Temperatur, ohne dass von außen Wärme zugeführt wird. In diesem Fall führt die verrichtete Reibungsarbeit zu einer Erhöhung der inneren Energie.

Im umgekehrten Fall kann sich ein System (beispielsweise ein eingeschlossenes Gas) prinzipiell auch innere Energie abgeben, ohne dass es Wärme mit seiner Umgebung austauscht. Beispielsweise hebt das in einem Verbrennungsmotor bei der Zündung des Luft-Treibstoff-Gemisches entstehende Gas den Hubkolben in kürzester Zeit an; dabei verändert sich sein Druck und sein Volumen. Gegenüber der verrichteten Volumenänderungsarbeit ΔW des Gases ist die durch Wärmeleitung bzw. Wärmestrahlung abgegebene Wärmemenge ΔQ bei diesem Prozess vernachlässigbar klein.

Vorgänge wie im letzten Beispiel, bei denen innere Energie (im Idealfall) ohne Wärmeaustausch in Arbeit umgewandelt wird, nennt man adiabatisch. Sie lassen sich aufgrund stets auftretender Wärmestrahlung und nur endlichen Wärmewiderstandswerten nie vollständig verwirklichen, können aber beispielsweise bei sehr schnell stattfindenden Prozessen zumindest in guter Näherung auftreten.

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre schließt als Energie-Erhaltungssatz die Existenz einer Maschine aus, die ohne Zufuhr von Energie mechanische Arbeit verrichten kann.

4.7.1.1 Wärmequellen, Heiz- und Brennwert

Gibt ein System Wärme an seine Umgebung ab, so wird es als Wärmequelle bezeichnet. Wird an diesem System keine mechanische Arbeit verrichtet, so stammt die als Wärme frei werdende Energie aus der chemischen Bindungsenergie der im System enthaltenen Teilchen; die Abgabe von Wärme geht also mit einer Verringerung der inneren Energie U des Systems einher.

Die Energiemenge, die beim Verbrennen von Heizstoffen wie Holz, Benzin, Diesel, Kohle oder Erdgas freigesetzt wird, heißt Verbrennungswärme Q_H . Sie lässt sich anhand der Masse m des Brennstoffs sowie dessen Heizwert H_i berechnen:

$$Q_H = m \cdot H_i$$

Der Heizwert ist eine materialspezifische Größe und wird bei Festkörpern und Flüssigkeiten üblicherweise in $\frac{MJ}{kg}$, bei Gasen in $\frac{MJ}{m^3}$ angegeben. Für verschiedene Materialien ist in Tabellenwerken neben dem Heizwert oftmals zusätzlich der Brennwert des Materials angegeben. Letzterer gibt an, wie viel Wärme genutzt werden kann, wenn auch die Verdampfungswärme des im Brennstoff enthaltenen oder bei der Verbrennung entstehenden Wasseranteils mit genutzt werden kann. Hierfür muss der bei der Verbrennung freiwerdende Wasserdampf wieder an einer geeigneten Stelle kondensieren, was bei Öfen oder Verbrennungsmotoren nur in geringem Umfang möglich ist. Bei der Verbrennung von Nahrungsmitteln in den einzelnen Körperzellen eines Organismus hingegen wird auch dieser Wärmeanteil genutzt, so dass der Energiegehalt von Nahrungsmitteln üblicherweise als Brennwert angegeben wird. Da es sich bei vielen Brennstoffen um Substanzen aus dem Bereich der organischen Chemie und/oder um Substanzen mit unterschiedlich möglichen Zusammensetzungen handelt, können die tatsächlichen Heizwerte von den angegebenen Durchschnittswerten geringfügig abweichen. Bei Nahrungsmitteln wird der Brennwert aus den Anteilen der drei Energieträger berechnet. Die Brennwerte von Lebensmitteln sind also ähnlich groß wie die Heizwerte der übrigen gängigen Brennstoffe.

4.7.2 Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre

Der zweite Hauptsatz der Wärmelehre ist im Laufe der Geschichte auf drei verschiedene Arten formuliert worden, wobei sich herausgestellt hat, dass all diese verschiedenen Formulierungen gleichwertig sind.

4.7.2.1 Formulierung nach Clausius

Der erste Hauptsatz der Wärmelehre schließt zwar die Existenz einer Maschine aus, die Arbeit ohne Energiezufuhr verrichten kann. Es wäre mit dem ersten Hauptsatz jedoch denkbar, dass eine Maschine, deren innere Energie U unverändert bleibt, ausschließlich Wärme in Arbeit umwandelt. Beispielsweise wäre es nach dem ersten Hauptsatz möglich, dass ein Schiff auf einem Ozean in der Lage ist mechanische Arbeit zu verrichten alleinig dadurch, dass es dem Ozean Wärme entzieht.

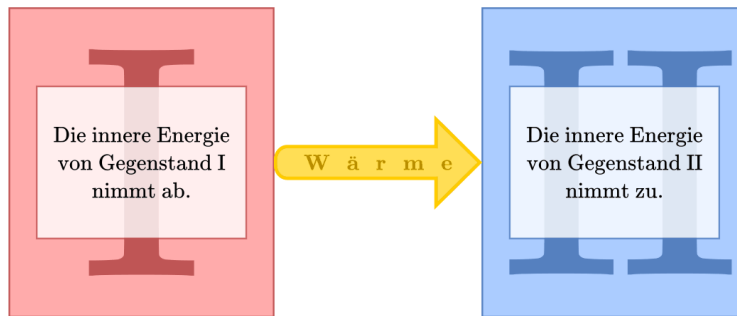


Abb. 4.10 Richtung des Wärmestroms nach dem zweiten Hauptsatz: Gegenstand I erwärmt Gegenstand II.

Der zweite Hauptsatz schließt die Existenz eines solchen „Perpetuum Mobiles“ aus, indem er vorgibt, in welche *Richtung* eine Übertragung von Wärme stattfindet. Diese Tatsache wurde ursprünglich von Rudolf Clausius formuliert:

„Wärme fließt immer vom wärmeren System in Richtung eines kälteren Systems.“

Möchte man mittels einer Maschine Wärme in mechanische Arbeit umwandeln („Wärmekraftmaschine“), so benötigt man zunächst zwei unterschiedlich warme Systeme, so dass überhaupt ein Wärmestrom auftritt. Bringt man diese beiden Systeme in Kontakt, so fließt eine Wärmemenge Q_H vom heißen System in Richtung des kälteren. Von diesem Wärmestrom kann ein (zunächst nicht näher bestimmter) Anteil W an Arbeit „abgezapft“ werden, die restliche Wärme Q_K fließt zum kälteren System.

Quantitativ gilt hierbei:

$$Q_H = W + Q_K$$

Bei einer Wärmekraftmaschine ist man in erster Linie am Anteil der mechanischen Arbeit W interessiert. Man definiert den Wirkungsgrad η somit als Quotient der verrichteten mechanischen Arbeit $W = Q_H - Q_K$ und der dafür investierten Wärmemenge Q_H :

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_K}{Q_H} = 1 - \frac{Q_K}{Q_H}$$

Der so definierte Wirkungsgrad kann nicht größer als 1 beziehungsweise 100% sein; der maximale Wirkungsgrad von 100% wird genau dann erreicht, wenn $Q_K = 0$, also keine Wärme an das kältere System fließt.

4.7.2.2 Formulierung nach Carnot

Bereits in früheren Jahren hat Sadi Carnot in ähnlicher Weise eine Formel hergeleitet, die den maximalen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine beschreibt. Er kam zu folgendem Ergebnis:

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_K}{T_H}$$

Auch bei dieser Formulierung des zweiten Hauptsatzes kann der Wirkungsgrad einer Wärmemaschine nicht größer als 100% sein; dieser wird genau dann erreicht, wenn $T_K = 0K$ ist. Bei jeder anderen Temperatur ist $\eta_{max} < 1$. Der Wirkungsgrad ist umso größer, desto höher die Temperatur T_H des heißen Systems und desto niedriger die Temperatur T_K des kalten Systems ist.

Carnot hat bei seiner Formulierung zwischen zwei Arten von Prozessen unterschieden:

- *Reversible* Prozesse können in beide Richtungen ablaufen. Die Rückwärtsrichtung entspricht dabei der genauen Umkehrung der Vorwärtsrichtung, als ob eine Videoaufzeichnung rückwärts abgespielt würde. Läuft der Prozess einmal in Hin- und einmal in Rückrichtung ab, so sind beide Systeme anschließend unverändert.
- *Irreversible* Prozesse laufen von selbst nur in eine bestimmte Richtung ab. Um den Prozess in Gegenrichtung ablaufen zu lassen, muss Energie zugeführt werden. Alle realen Prozesse, in denen Reibung auftritt, sind irreversibel, da die durch Reibungsarbeit erzeugte Wärme nicht wieder zurück in mechanische Arbeit umgewandelt werden kann.

4.7.2.3 Kältemaschinen und Wärmepumpen

Durch Zuführen von (mechanischer) Arbeit kann ein Prozess entgegen seiner natürlichen Richtung, also vom kalten zum heißen System hin, ablaufen.

Je nach Anwendungszweck unterscheidet man zwischen zwei Prozessarten:

- Bei einer Kältemaschine, beispielsweise einem Kühlschrank oder einer Klimaanlage, wird dem kälteren System mittels mechanischer Arbeit Wärme entzogen, damit dieses weiter abkühlt. Die entzogene Wärme wird an das wärmere System abgegeben.
- Bei einer Wärmepumpe wird dem kalten System mittels mechanischer Arbeit Wärme entzogen, um diese als Nutzwärme einem wärmeren System zuzuführen.

In beiden Anwendungsfällen kann, wie bei einer Wärmekraftmaschine, die nutzbare Energiemenge in Relation zur aufgewendeten Energiemenge gesetzt werden. Bei Kältemaschinen und Wärmepumpen kann durch das „Umpumpen“ mehr Wärme genutzt werden, als mechanische Arbeit investiert werden muss.

4.7.2.4 Entropie

Neben den oben beschriebenen Formulierungen von Clausius und Carnot gibt es eine dritte Möglichkeit, den zweiten Hauptsatz der Wärmelehre zu beschreiben; eine zentrale Bedeutung hat hierbei der Begriff der „Entropie“.

Als „Entropie“ S bezeichnet man den „Grad der Unordnung“ eines thermodynamischen Systems. Der 2. Hauptsatz der Wärmelehre schließt hierbei aus, dass bei spontan (also ohne Energiezufuhr) ablaufenden Prozessen aus Unordnung plötzlich Ordnung entsteht. Ein Schreibtisch räumt sich beispielsweise auch nicht von selbst auf, sondern wird im Lauf der Zeit immer chaotischer, bis man selbst mal wieder Arbeit verrichtet und Ordnung herstellt; ebenso entstehen bei einem herunterfallenden Glas von selbst viele chaotisch verteilte Glasscherben, aber beim Herunterfallen von Glasscherben wird sich nicht von selbst wieder ein Glasgefäß bilden. Auf mikroskopischer Ebene kann man sich mechanische Arbeit als gezielte Verschiebung von Teilchen im Raum vorstellen – Wärme hingegen stellt eine ungerichtete Bewegung von Teilchen dar. Es ist möglich eine gerichtete Bewegung in eine ungerichtete umzuwandeln (Arbeit → Wärme), doch es ohne ein Verrichten von Arbeit nicht möglich, eine ungerichtete Bewegung vieler Teilchen eine vollständig gerichtete Bewegung zu erzeugen. Man sagt daher, dass bei einer Umwandlung von mechanischer Energie in Wärme-Energie diese „entwertet“ wird.

Ähnlich wie bei der potentiellen Energie ist es auch bei der Entropie S nicht einfach, einen konkreten Wert anzugeben; es ist allerdings möglich, die *Änderung* ΔS der Entropie bei einem Prozess quantitativ anzugeben:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}$$

In dieser Formel beschreibt ΔQ die während des Prozesses umgesetzte Wärmemenge:

- Ist $\Delta Q > 0$, so wird dem System Wärme zugeführt (wodurch auch die Entropie zunimmt).

- Ist $\Delta Q < 0$, so wird Wärme vom System abgegeben (wodurch sich auch die Entropie wieder verringert).

Mit T wird die absolute Temperatur bezeichnet, bei welcher der Prozess abläuft. Ändert sich die Temperatur während eines Prozesses, so kann man näherungsweise mit der durchschnittlichen Temperatur (in Kelvin) rechnen.

Reversible und nicht reversible Prozesse

Ist die Entropie-Änderung während eines Prozesses gleich Null, so bezeichnet man diesen als „reversibel“: Er kann spontan in beide Richtungen ablaufen. Ein Beispiel für einen solchen Prozess ist das Schmelzen beziehungsweise Gefrieren von Eis.

Andere Prozesse, bei denen sich die Entropie ändert, heißen irreversibel: Sie finden ohne eine externe Energiezufuhr stets nur in Richtung zunehmender Entropie statt.

Durch Wärmezufuhr erhöht sich nicht zwingend die Temperatur, stets aber wegen $\Delta Q = T \cdot \Delta S$ die Entropie des erwärmten Systems.

4.7.3 Dritter Hauptsatz der Wärmelehre

Der dritte Hauptsatz der Wärmelehre, auch Nernstsches Wärmetheorem genannt, macht eine Aussage über das Verhalten von Stoffen in unmittelbarer Nähe des absoluten Nullpunktes, also von $0K$. Man kann diesen Hauptsatz in Kurzform folgendermaßen formulieren:

„Es ist unmöglich, ein System durch irgendeinen Vorgang auf den absoluten Nullpunkt abzukühlen.“

Durch den dritten Hauptsatz der Wärmelehre wird somit ein Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine von 100%, wie er für einen Carnot-Prozess theoretisch denkbar wäre, explizit ausgeschlossen.

Verwendet man den Begriff der Entropie, so lässt sich der dritte Hauptsatz der Wärmelehre gleichwertig auch folgendermaßen formulieren: „Am absoluten Nullpunkt ist die Entropie eines Systems gleich Null.“

Anschaulich kann man sich dies etwa so vorstellen: Eine Entropie von Null ist gleichbedeutend mit einer perfekten Ordnung. Um eine solche perfekte Ordnung zu erreichen, muss Arbeit verrichtet beziehungsweise Energie zugeführt werden. Eine Energiezufuhr bewirkt jedoch, dass die Temperatur nicht den absoluten Nullpunkt erreichen kann. Auch mit dieser Formulierung wird somit (implizit) ausgeschlossen, dass der absolute Temperatur-Nullpunkt erreicht werden kann.

4.8 WÄRMEKRAFTMASCHINEN

Ein Druck-Volumen-Diagramm, auch Arbeitsdiagramm oder PV-Diagramm genannt, ist die grafische Darstellung der Beziehung zwischen Druck und Volumen, die zeitabhängig während der Motortakte im Zylinder eines Verbrennungsmotors abläuft. Diese Darstellung der Vorgänge in einem Verbrennungsmotor wird häufig dazu verwendet, die Auswirkung eines variablen Zündzeitpunkts auf die Druckverhältnisse im Zylinder darzustellen.

1) Ansaugtakt: Das Einlassventil ist geöffnet, im Zylinder herrscht der Umgebungsluftdruck von ca. 1 bar. Da sich der Zylinder nach unten bewegt, wird das Volumen größer; ein leichter Unterdruck entsteht.

2) Verdichtungsakt: Alle Ventile sind geschlossen. Der Zylinder bewegt sich nach oben, das Volumen wird kleiner. Der Druck des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Zylinder vergrößert sich.

3a) Arbeitstakt: Das Kraftstoff-Luft-Gemisch wird entzündet. Der Druck steigt stark an. Da sich der Kolben im oberen Totpunkt befindet, ist das Volumen noch sehr klein.

3b) Arbeitstakt: Das verbrennende Kraftstoff-Luft-Gemisch drückt den Kolben nach unten. Das Volumen vergrößert sich, der Druck sinkt.

4) Auspufftakt: Das Auslassventil wird geöffnet (a), das verbrannte Gasgemisch wird ausgestoßen. Das Volumen wird geringer (b) und der Druck im Zylinder fällt bis zum Umgebungsluftdruck ab.

5 ELEKTRIZITÄT UND MAGNETISMUS

Die Elektrizitätslehre ist die Wissenschaft der elektrischen Ladungen und der mit ihnen verknüpften elektrischen und magnetischen Felder; gleichzeitig ist sie die Basis der Elektronik als anwendungsorientierter Fachrichtung.

5.1 ELEKTRISCHE LADUNG

Alle Stoffe, die wir kennen, sind aus Atomen aufgebaut. Jedes dieser Atome besteht wiederum aus noch kleineren Bestandteilen. Für die Elektrizität und den Magnetismus sind insbesondere die positiv geladenen Protonen des Atomkerns sowie die negativ geladenen Elektronen der Atomhülle von Bedeutung.

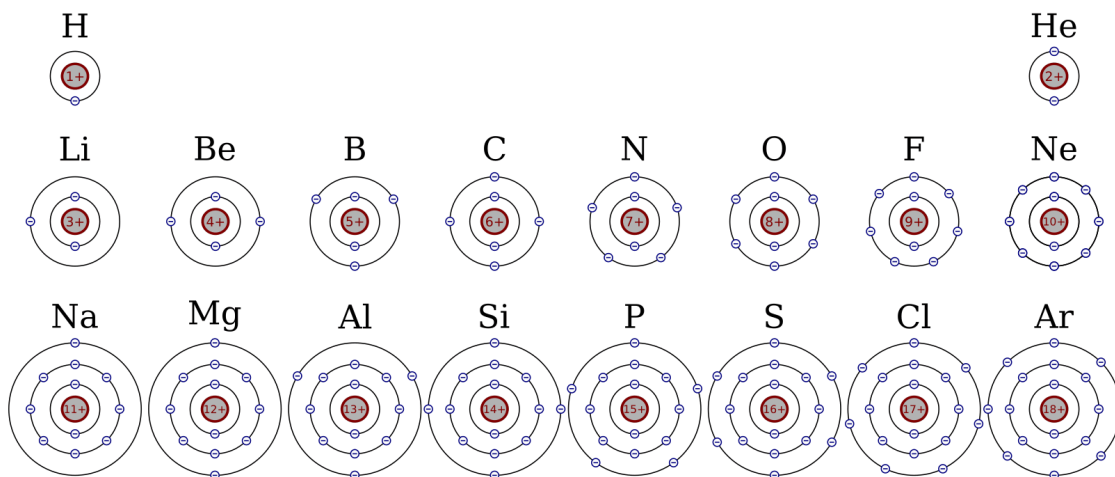


Abb. 5.1 Die ersten Elemente des Periodensystems im Atomschalenmodell.

Vereinfacht lassen sich Elektronen als kleine Teilchen auffassen, die auf kugelartigen Bahnen den Atomkern umkreisen, ähnlich wie die Planeten unseres Universums die Sonne umkreisen. Da die Elektronen auf den inneren Bahnen („Schalen“) sehr fest an den Atomkern gebunden sind, kommen sie als Ladungsträger für den elektrischen Strom nicht in Frage. Die elektrischen Eigenschaften eines Stoffes werden somit (fast) ausschließlich durch diejenigen Elektronen beeinflusst, die sich auf der äußersten Schale befinden („Valenzelektronen“).

Allgemein gilt für jedes chemische Element:

- In einem Atom ist die Anzahl der Protonen gleich der Anzahl der Elektronen.

Während die Protonen fest im Atomkern verankert sind, sind die Elektronen je nach Art des Stoffes mehr oder weniger stark gebunden.

Elektronen können ein Atom auch komplett verlassen. Als „Atomrumpf“ bleibt dann ein positiv geladenes Ion („Kation“) zurück. Der Stoff bleibt dabei allerdings unverändert – charakteristisch für jedes chemische Element ist nur die Anzahl der Protonen im Atomkern.

- Protonen und Elektronen sind gleich stark geladen.

Da jedes Atom gleich viele positive wie negative Ladungsträger besitzt, ist seine Gesamtladung, d.h. die Summe aller Ladungen, gleich null. Von außen betrachtet erscheint ein Atom deshalb als ein elektrisch neutrales Teilchen.

Alle in der Realität vorkommenden elektrischen Ladungsmengen setzen sich aus den Ladungen der Elektronen und Protonen zusammen.

Einheit:

Man hat als Einheit der elektrischen Ladung Q eine Ladungsmenge festgelegt, die so groß ist wie die elektrische Ladung von $6,2 \cdot 10^{18}$ Elektronen. Diese Einheit wird Coulomb C genannt.

Mittels dieser Festlegung kann man ebenso sagen, dass ein Elektron eine Ladung von $0,00000000000000000016C$ besitzt. Diese Ladung ist gleichzeitig die kleinste Ladung, die frei in der Natur vorkommen kann – man nennt sie daher auch „Elementarladung“ e .

5.1.1 Ladungstrennung

Unter bestimmten Bedingungen können Elektronen von einem Körper abgetrennt und von einem anderen Körper zusätzlich aufgenommen werden. Durch derartige Vorgänge werden Körper elektrisch geladen. Dabei gilt stets:

- Ein Körper ist elektrisch neutral, wenn gleich viele positive und negative Ladungen vorhanden sind.
- Ein Körper ist elektrisch positiv geladen (+), wenn ein Mangel an Elektronen vorhanden ist.
- Ein Körper ist elektrisch negativ geladen (-), wenn ein Überschuss an Elektronen vorhanden ist.

Die Gesamtmenge an Ladung bleibt bei jeder Ladungstrennung erhalten. In Festkörpern lassen sich durch Reibung nur Elektronen von einem Körper auf einen anderen übertragen. In Flüssigkeiten und Gasen sind auch die positiven Ladungsträger beweglich.

Beispiel:

- Reibt man ein Stück Hartgummi (Füller, Kamm etc.) an einem Stück Wolle (Schal, Pullover etc.), so gehen Elektronen von der Wolle zu dem Hartgummi über. Trennt man beide voneinander, so bleibt das Hartgummi durch die zusätzlichen Elektronen negativ geladen. In der Wolle bleiben entsprechend Atome mit fehlenden Elektronen zurück; die Wolle ist aufgrund dieser fehlenden Elektronen positiv geladen.

Ob ein Körper durch einen Reibungsvorgang positiv oder negativ aufgeladen wird, hängt von der Art der beteiligten Stoffe ab. Reibt man zwei Körper aneinander, so gibt der näher am Pluszeichen der so genannten „kontaktelektrischen Spannungsreihe“ stehende Stoff Elektronen ab und wird elektrisch positiv. Der näher am Minuszeichen stehende Stoff nimmt Elektronen auf und wird elektrisch negativ.

5.1.2 Ladungsausgleich und Ladungsnachweis

Wird ein geladener Körper über einen Metalldraht oder einen ähnlichen leitenden Kontakt mit dem Erdboden verbunden, so kommt es zu einer Entladung. Diesen Vorgang bezeichnet man als „Erden“.

- Wird ein negativ geladener Körper geerdet, so können überschüssige Elektronen vom Körper ins Erdreich abfließen. Die elektrische Spannung wird dabei abgebaut.
- Wird ein positiv geladener Körper geerdet, so fließen Elektronen vom Erdreich auf den Körper und gleichen den dort herrschenden Elektronenmangel aus.

Da die Erde über einen gigantischen Vorrat an leicht beweglichen Elektronen verfügt und dadurch jeder Ladungsunterschied unmittelbar ausgeglichen wird, ist eine elektrische Aufladung der Erde selbst bei Kontakt mit größeren Ladungsmengen unmessbar klein. Die Erde kann daher stets als elektrisch neutral betrachtet werden.

Experimentell nachweisen kann man Ladungen beispielsweise anhand der Kräfte, die zwischen geladenen Körpern wirken:

- Gleichartig geladene Körper (Plus und Plus beziehungsweise Minus und Minus) stoßen einander ab.
- Unterschiedlich geladene Körper (Plus und Minus) ziehen einander an.

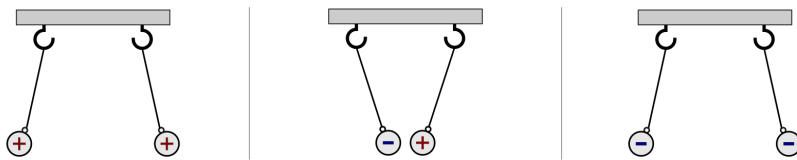


Abb. 5.2 Kraftwirkung zwischen elektrisch geladenen Körpern.

Je stärker zwei Körper elektrisch geladen sind, desto stärker sind die Kräfte, die zwischen ihnen wirken. Quantitativ kann die zwischen zwei geladenen Körpern wirkende elektrostatische Kraft durch das Coulombsche Gesetz bestimmt werden, das im Abschnitt Elektrische Felder näher beschrieben ist.

5.1.2.1 Elektroskope

Ein Elektroskop besteht aus einem (meist gebogenen) Metallstab, an dem ein Zeiger leicht drehbar angebracht ist. Der Metallstab besitzt am oberen Ende eine Kontaktfläche und ist durch eine Halterung aus Kunststoff isoliert. Der drehbare Zeiger ist unten etwas schwerer, so dass er im Grundzustand senkrecht ausgerichtet ist.

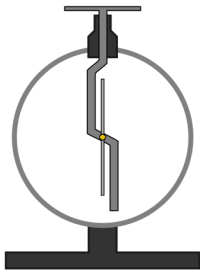


Abb. 5.3 Aufbau eines Elektroskops.

- Berührt man die Kontaktfläche des Elektroskops mit einem *negativ* geladenen Stab, so breiten sich die frei beweglichen Elektronen mit ihren negativen elektrischen Ladungen entlang des Metallstabs aus. Stab und Zeiger werden gleichartig aufgeladen und stoßen sich gegenseitig ab. Je stärker die Ladung ist, desto stärker ist der Zeigerausschlag.
- Nähert man der Kontaktfläche des Elektroskops einen *positiv* geladenen Stab, so werden die frei beweglichen Elektronen des Metallstabs zum positiv geladenen Stab hingezogen. Im unteren Bereich des Elektroskops bleiben die fest verankerten, positiv geladenen Atomrümpfe zurück. Stab und Zeiger sind wiederum gleichartig geladen und stoßen sich gegenseitig ab.

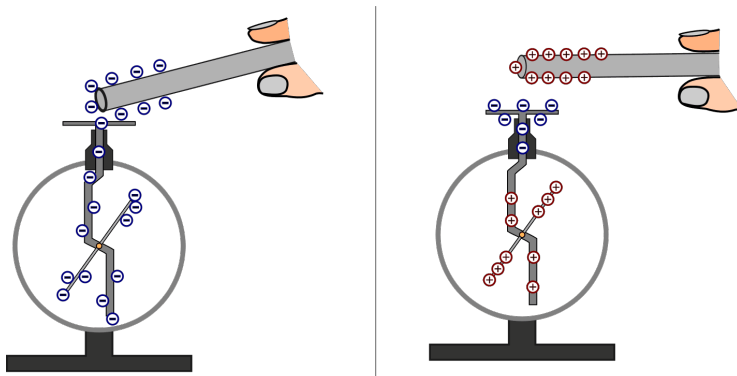


Abb. 5.4 Funktionsweise eines Elektroskops.

- Berührt man ein negativ geladenes Elektroskop mit einem positiv geladenen oder geerdeten Körper, so wird es wieder entladen. (Ein positiv geladenes Elektroskop lässt sich entsprechend durch Berührung mit einem negativ geladenen oder geerdeten Körper entladen.)

Mit einem Elektroskop kann man somit die Menge einer elektrischen Ladung messen, jedoch nicht, ob es sich um positive oder negative Ladung handelt.

5.2 STROMSTÄRKE, SPANNUNG UND WIDERSTAND

Damit ein elektrischer Strom durch einen Körper fließen kann, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

- In ihm müssen frei bewegliche Ladungsträger (beispielsweise Elektronen) vorhanden sein.

- An ihm muss eine elektrische Spannung (Ladungsdifferenz) anliegen.

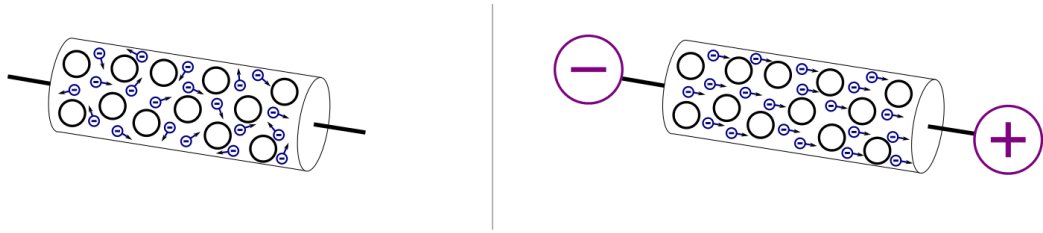


Abb. 5.5 Durch das Anlegen einer elektrischen Spannung wird aus einer ungeordneten Elektronenbewegung („Wärmebewegung“) ein geordneter Elektronenstrom.

Modell:

Ähnlich wie Wasser durch eine Pumpe in Bewegung versetzt werden kann, lassen sich Elektronen durch Stromquellen („Elektronenpumpen“) in Bewegung versetzen.

Während Wasser mit einer Wasserpumpe in eine Wasserleitung gepresst wird, erzeugt eine Stromquelle (Batterie oder Generator) an einem ihrer Pole eine erhöhte Konzentration an Elektronen und damit eine elektrische Spannung.

5.2.1 Die Stromstärke

Ein elektrischer Strom tritt auf, wenn sich elektrische Ladungen bewegen. Die elektrische Stromstärke ist ein Maß dafür, welche Menge an elektrischer Ladung in einer bestimmten Zeit durch einen Körper fließt.

Modell:

Wird ein Wasserhahn aufgedreht, so beginnt Wasser zu fließen. Umso weiter der Wasserhahn aufgedreht wird, desto mehr Wasser strömt in einer bestimmten Zeit aus ihm heraus. Diese Kenngröße könnten wir als „Wasserstromstärke“ bezeichnen.

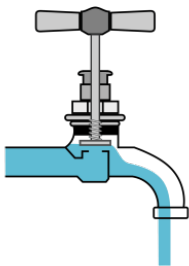


Abb. 5.6 Die Wasserstromstärke als Modell für die elektrische Stromstärke.

Entsprechend führt die geordnete Bewegung von elektrischen Ladungen zu einem elektrischen Stromfluss: Umso mehr Elektronen (oder Ionen) ein Leiterstück in einer bestimmten Zeit durchlaufen, desto höher ist die auftretende elektrische Stromstärke. So wie die maximale Wassermenge, die in einer Wasserleitung fließen kann, von dem Durchmesser des Wasserrohres abhängt, so kann in einem dickeren Stromleiter ein stärkerer Strom fließen als in einem dünnen.

Definition:

Die elektrische Stromstärke I ist gleich der Menge an elektrischer Ladung ΔQ , die in einer Zeitspanne Δt transportiert wird:
$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$$

Einheit:

Die elektrische Stromstärke wird in Ampere (A) angegeben. Eine Stromstärke von 1 Ampere bedeutet, dass an jeder Stelle im Leiter je Sekunde 1 Coulomb an Ladung (etwa 6 Trillionen Elektronen!) transportiert wird.

Tab. 5.1 Stromstärken in Natur und Technik.

Elektronisches Gerät	Stromstärke in Ampere

Kopfhörer	0,001
Glühbirne	bis zu 0,5
Bügeleisen	2 bis 5
Straßenbahnmotor	150
Überlandleitung	100 bis 1000
Elektro-Lokomotive	1000
Blitz	bis zu 100 000

5.2.1.1 Physikalische und technische Stromrichtung

Die Bewegung von Ladungsträgern konnte erstmals in elektrisch leitenden Flüssigkeiten („Elektrolyten“) in Form von positiv geladenen Ionen beobachtet werden. Anhand dieser historischen Entdeckung wurde die Stromrichtung als diejenige Richtung festgelegt, entlang der sich positiv geladene Ladungsträger in einem Leiter bewegen: Sie gehen stets vom Plus-Pol einer Stromquelle aus und bewegen sich in Richtung Minus-Pol.

Diese Konvention wurde beibehalten, obwohl man später feststellte, dass in leitenden Festkörpern vor allem die Bewegung der negativ geladenen Elektronen von entscheidender Bedeutung für den Stromfluss ist. Da diese vom Minus-Pol ausgehen und sich in Richtung Plus-Pol bewegen, muss man stets zwischen der ursprünglich festgelegten („technischen“) und der tatsächlichen („physikalischen“) Bewegungsrichtung der geladenen Teilchen unterscheiden:

- Die „technische“ Stromrichtung verläuft stets von Plus nach Minus.
- Die „physikalische“ Stromrichtung gibt die tatsächliche Bewegungsrichtung der geladenen Teilchen an. Für positive Ladungsträger ist sie mit der technischen Stromrichtung identisch, für negative Ladungsträger zeigt sie in die entgegengesetzte Richtung.

In der heutigen Elektronik wird stets die technische Stromrichtung als Norm für Schaltpläne und Beschriftungen verwendet. Auch wenn der Ladungstransport durch Elektronen erfolgt, so sagt man, dass der Strom „von Plus nach Minus“ fließe. Dies mag physikalisch unkorrekt sein; entscheidend ist allerdings vielmehr, dass von der Polung abhängige Bauteile (beispielsweise Dioden und Transistoren) immer nach dem gleichen Schema hergestellt werden.

5.2.2 Die elektrische Spannung

Elektrischer Strom fließt nicht von selbst, sondern benötigt eine elektrische Spannung als Ursache. Elektrische Spannung wiederum ist das Ergebnis einer Ladungstrennung, beispielsweise einer Erhöhung der Konzentration an Elektronen an einer Stelle gegenüber einer anderen Stelle.

Modell:

In einem Wassertank hängt der Druck, der auf den Wasserhahn ausgeübt wird, ausschließlich von der Füllhöhe im Tank ab: Umso höher der Behälter gefüllt wurde, desto höher ist der Wasserdruck am unteren Ende.

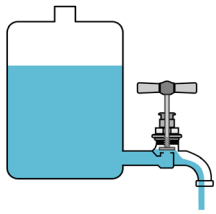


Abb. 5.7 Der Druck einer Wassersäule als Modell für die elektrische Spannung.

Entsprechend ist für das Fließen eines elektrischen Stromes eine gezielte Anhäufung von elektrischer Ladung notwendig. Umso stärker die Elektronen an einer Stelle verdichtet werden, also je mehr Arbeit bei der Ladungstrennung investiert wird, desto steiler ist das Konzentrationsgefälle an elektrischer Ladung und damit die elektrische Spannung.

Definition:

Die elektrische Spannung U ist gleich der Menge an Arbeit W , die bei der Ladungstrennung auf eine Ladungsmenge Q aufgewendet wird: $U = \frac{W}{Q}$

Einheit:

Die elektrische Spannung wird in Volt V angegeben. Eine Spannung von 1 Volt bedeutet, dass für je 1 Coulomb an Ladung eine Arbeit von 1 Joule zur Ladungstrennung aufgewendet wird.

Tab. 5.2 Spannungen in Natur und Technik

Elektronisches Gerät Spannung in Volt

Autobatterie	12 bis 24
Netzspannung	230
Generator in Kraftwerk	ca. 10 000
Blitz	bis 100 000 000

5.2.2.1 Das elektrische Potential

Die Spannung ist keine absolute Größe, man kann also streng genommen nicht angeben, wie groß die Spannung an einer bestimmten Stelle ist. Spannung bezieht sich vielmehr stets auf zwei Punkte: Man kann mit einem Spannungswert also nur angeben, wie groß die Spannung *zwischen* zwei Punkten ist. Gemäß der technischen Konvention, dass Strom stets „von Plus nach Minus“ fließt, kann die Spannungsdifferenz zwischen zwei Punkten als Maß dafür angesehen werden, wie stark und in welche Richtung der Strom von einem Punkt zum anderen fließen möchte.

Um dennoch einen Absolutwert für die Menge einer Ladungsanhäufung angeben zu können, hat man daher den Begriff „elektrisches Potential“ Φ eingeführt. Das elektrische Potential ist vergleichbar mit der Höhe eines Punktes über dem Meeresspiegel. Ein solcher Wert kann tatsächlich für jeden einzelnen Punkt angegeben werden. Vergleicht man dann zwei verschiedene Punkte hinsichtlich ihrer elektrischen Potentiale, so kann die Differenz $\Delta\Phi$ dieser Potentiale als elektrische Spannung U zwischen den beiden Punkten aufgefasst werden:

$$U = \Delta\Phi$$

Im alltäglichen Sprachgebrauch werden trotz dieses Unterschieds die Begriffe Spannung und elektrisches Potential häufig als gleichwertig verwendet. Der Grund dafür liegt darin, dass als Bezugspunkt („Masse“, „Ground“, „Nullpotential“) für das elektrische Potential häufig der Minus-Anschluss der Stromquelle verwendet wird und dieser willkürlich den Wert Null erhält. Gegenüber diesem Bezugspunkt ist das elektrische Potential eines Punktes mit dem Spannungswert identisch. Haben hingegen zwei Punkte (beispielsweise in einer elektronischen Schaltung) jeweils von Null verschiedene elektrische Potentiale, so ist nur die Differenz der jeweiligen elektrischen Potentiale (umgangssprachlich: „Spannungsdifferenz“) als Ursache für einen Stromfluss von Bedeutung.

5.2.2.2 Die Gleichspannung

Eine elektrische Gleichspannung entsteht, wenn durch eine Stromquelle an einer Stelle ein Überschuss an elektrischer Ladung erzeugt wird. Wird der Stromkreis geschlossen, so strömen die frei beweglichen Elektronen im Leiter von der Stelle mit der höheren zu der Stelle mit der niedrigeren Ladungskonzentration, um einen Ladungsausgleich zu bewirken.

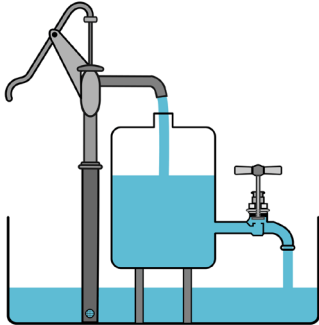


Abb. 5.8 Eine Wasserpumpe als Modell für eine Gleichstromquelle.

Eine zeitlich konstante Gleichspannung bewirkt in einem Leiter einen zeitlich konstanten Strom („Gleichstrom“). Es wird allerdings auch dann von einer Gleichspannung gesprochen, wenn sie im zeitlichen Verlauf zwar unterschiedlich große Werte annimmt, dabei jedoch stets die gleiche Polung beibehält. Das Resultat ist in diesem Fall ein so genannter „pulsierender Gleichstrom“.

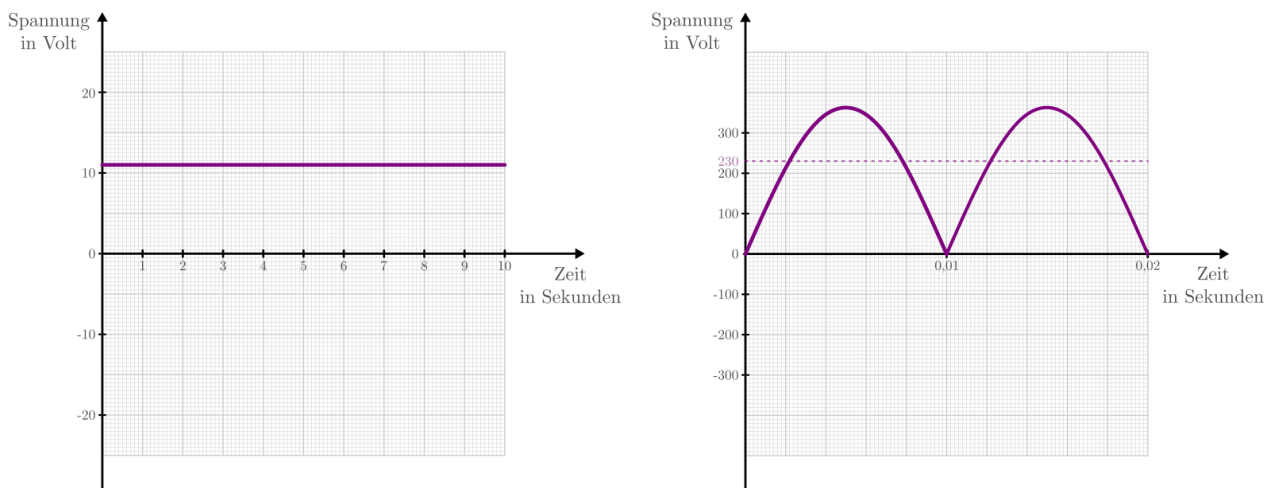


Abb. 5.9 Diagramme einer „echten“ 12V-Gleichspannung und einer „pulsierenden“ 230V-Gleichspannung.

5.2.2.3 Die Wechselspannung

Manche elektrische Generatoren, beispielsweise Fahrrad-Dynamos, bewirken einen Strom, der einmal „von rechts nach links“, dann wieder „von links nach rechts“ fließt. Die Ursache dafür ist eine Spannung, die ihre Richtung (beziehungsweise ihr Vorzeichen) regelmäßig wechselt und daher als Wechselspannung bezeichnet wird.

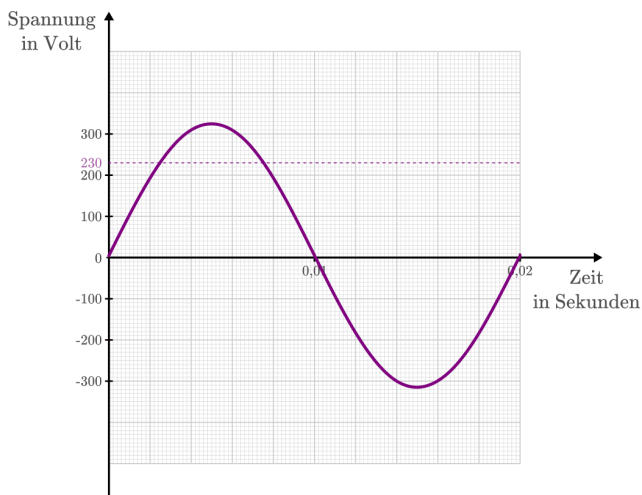


Abb. 5.10 Diagramm einer 230V-Wechselspannung.

Die bekannteste Wechselspannung ist die sinusförmige Spannung des Stromnetzes, die periodisch zwischen +325V und -325V hin und her wechselt. Aufgrund der Schwankungen kann jedoch nur so viel elektrische Leistung umgesetzt werden wie bei einer Gleichspannung von $U_{eff} = 230V$. Diese so genannte „effektive Spannung“ einer sinusförmigen Wechselspannung lässt sich allgemein nach folgender Formel berechnen:

$$U_{eff} = \frac{U_{max}}{\sqrt{2}}$$

Die Frequenz der Wechselspannung im Stromnetz beträgt $f = 50Hz$; in einer Sekunde durchläuft die Wechselspannung also 50 Perioden. Hieraus ergibt sich eine Schwingungsdauer von $T = \frac{1}{50} s = 0,02 s$.

Der Vorteil einer Wechselspannung gegenüber einer (zeitlich konstanten) Gleichspannung liegt darin, dass sich der Wert der Wechselspannung mittels eines passenden Transformators leicht auf einen anderen beliebigen Spannungswert einstellen lässt.

5.2.3 Der elektrische Widerstand

In einem idealen elektrischen Leiter können sich die Ladungsträger völlig frei bewegen. In einem realen Leiter hingegen treten stets Wechselwirkungen zwischen den sich bewegenden Elektronen und den zurückbleibenden Atomrümpfen auf. Ähnlich wie bei der mechanischen Reibung wird dabei elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt (siehe auch Abschnitt Wärmeentwicklung in elektrischen Bauteilen).

Bei schlechten Leitern (beispielsweise Eisen) ist die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Atomen stärker als bei guten Leitern (beispielsweise Kupfer). Zum einen erwärmen sich schlechte Leiter dadurch schneller als gute Leiter, zum anderen muss an ihnen eine höhere elektrische Spannung angelegt werden, um den gleichen Stromfluss zu erreichen.

Definition:

Unter dem elektrischen Widerstand R eines Stromkreises versteht man das Verhältnis aus der Spannung U zwischen den Enden eines Leiters und der Stärke des Stromes I im Leiter: $R = \frac{U}{I}$

In gleicher Form lässt sich auch der elektrische Widerstand einzelner Bauteile angeben.

Einheit:

Der elektrische Widerstand wird in Ohm (Ω) angegeben. Ein elektrischer Widerstand von $R = 1\Omega$ bedeutet, dass eine Spannung von $U = 1V$ aufgewendet werden muss, um eine Stromstärke von $I = 1A$ zu erreichen:

$$1 \text{ Ohm} = 1 \frac{\text{Volt}}{\text{Ampere}}$$

5.2.3.1 Das Ohmsche Gesetz

Der Zusammenhang zwischen elektrischer Spannung, Stromstärke und Widerstand wurde im Jahr 1826 durch Georg Simon Ohm entdeckt. Ihm zu Ehren wird auch heute noch die Widerstandsgleichung (5) als „Ohmsches Gesetz“ bezeichnet und in folgender Form angegeben: $U = R \cdot I$

Das Ohmsche Gesetz ist in seiner Gültigkeit auf homogene Materialien begrenzt. In zahlreichen Fällen kann es dennoch, beispielsweise bei Reihen- und Parallelschaltungen, beim Ermitteln von Spannungen oder Stromstärken helfen, wenn die jeweiligen elektrischen Widerstände bekannt sind.

Neben den beiden bisher genannten Formen kann der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung auch folgendermaßen angegeben werden: $I = \frac{1}{R} \cdot U$

Bei einer höheren Spannung ist somit auch die Stromstärke höher, die durch einen Stromkreis oder ein elektronisches Bauteil fließt. Die entsprechende Kennlinie entspricht, wie in Abbildung Ohmsches Gesetz zu erkennen ist, einer Geraden, die umso steiler verläuft, desto niedriger der Widerstandswert R ist.

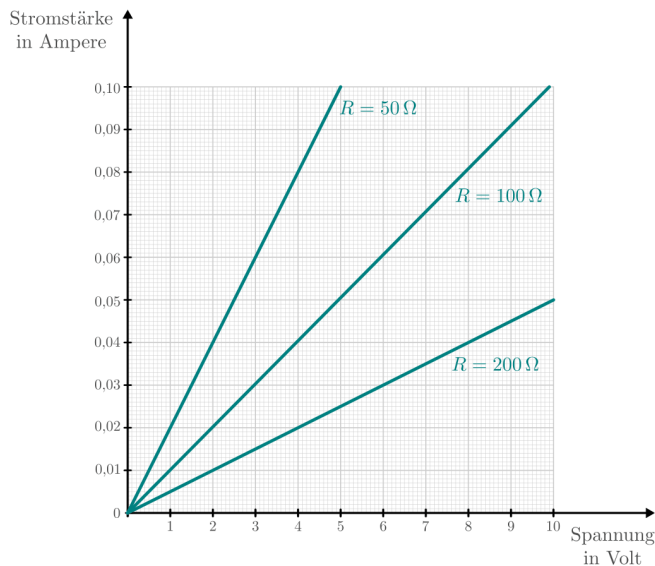


Abb. 5.11 Die Stromstärke in Abhängigkeit von der Spannung bei festen Widerstandswerten (Ohmsches Gesetz).

In der Elektronik bezeichnet man Bauteile, die zumindest näherungsweise diese Charakteristik erfüllen, ebenfalls als Widerstände.

Nicht-Ohmsche Widerstände

In Halbleiter-Bauteilen (z.B. Dioden, Transistoren, usw.) ist der Zusammenhang zwischen Stromstärke und Spannung nicht linear; vielmehr ist in diesen Bauteilen erst ab einer bestimmten Spannung ein Stromfluss möglich, der bei einer weiteren Erhöhung der Spannung überproportional ansteigt (Abbildung Kennlinie einer Diode in Durchlass-Richtung).

Das Ohmsche Gesetz kann in solchen Fällen (näherungsweise) genutzt werden, wenn die Widerstandswerte in Abhängigkeit von der Stromstärke oder Spannung bekannt sind, also als Diagramm oder in tabellarischer Form für bestimmte Werte vorliegen.

5.2.3.2 Der spezifische Widerstand

Unterschiedliche Stoffe leiten den Strom unterschiedlich gut, sie besitzen also einen unterschiedlichen spezifischen Widerstand ρ . Je kleiner der spezifische Widerstand eines Materials ist, desto besser leitet es den elektrischen Strom.

Da sich die spezifischen Widerstände von verschiedenen Stoffen erheblich voneinander unterscheiden, lassen sich die Materialien in elektrische Leiter, Halbleiter und Isolatoren einteilen.

5.2.3.3 Temperaturabhängigkeit des spezifischen Widerstands

Bei metallischen Leitern hängt der spezifische Widerstand ρ über einen weiten Temperaturbereich linear von der Temperatur ab.

Für Metalle nimmt der spezifische Widerstand mit steigender Temperatur zu. Halbleiter hingegen werden mit zunehmenden Temperaturen besser leitfähig, bei tiefen Temperaturen hingegen werden sie zunehmend zu Isolatoren.

5.3 ELEKTRISCHE ARBEIT, ENERGIE UND LEISTUNG

5.3.1 Elektrische Arbeit und Energie

Zur Bereitstellung einer bestimmten Menge an elektrischer Energie muss durch einen Stromgenerator ein entsprechender Betrag an Arbeit aufgewendet werden.

Zur Herleitung einer Formel für die elektrische Arbeit W_{el} kann man die Definitionen der elektrischen Spannung U und der elektrischen Stromstärke I miteinander kombinieren. Aus der Definition der elektrischen Spannung folgt:

$$U = \frac{W}{Q} \quad \Leftrightarrow \quad W = U \cdot Q$$

Die Ladung Q kann wiederum mit Hilfe der Definition der Stromstärke folgendermaßen beschrieben werden:

$$I = \frac{Q}{t} \quad \Leftrightarrow \quad Q = I \cdot t$$

Insgesamt ergibt die Kombination dieser beiden Gleichungen folgende Formel für die elektrische Arbeit:

Definition:

Die elektrische Arbeit, die ein Stromgenerator verrichtet, ist proportional zur Spannung U und zur Stromstärke I des bereitgestellten Stroms sowie zur Zeitdauer t , über die sich der Stromfluss erstreckt.

$$W_{el} = U \cdot I \cdot t$$

Die aufgebrachte elektrische Arbeit kann entweder direkt genutzt oder als elektrische Energie E_{el} in Kondensatoren und Akkumulatoren gespeichert werden $E_{el} = W_{el}$.

Einheit:

Die elektrische Arbeit sowie die elektrische Energie wird in Joule ($1\text{J} = 1\text{Ws}$) oder gebräuchlicher in Wattstunden (Wh) bzw. Kilowattstunden (kWh) angegeben. Dabei gelten folgende Zusammenhänge:

$$1\text{ J} = 1\text{ W} \cdot \text{s} = 1\text{ V} \cdot 1\text{ A} \cdot 1\text{ s}$$

$$1\text{ Wh} = 60 \cdot 60\text{ W} \cdot \text{s} = 3600\text{ Ws}$$

$$1\text{ kWh} = 1000\text{ Wh}$$

5.3.2 Elektrische Leistung

Die elektrische Leistung P_{el} , die ein Stromgenerator aufbringt oder ein Verbraucher benötigt, ist gleich der je Zeit Δt verrichteten elektrischen Arbeit ΔW_{el} :

$$P_{el} = \frac{\Delta W_{el}}{\Delta t} = \frac{U \cdot I \cdot \Delta t}{\Delta t} = U \cdot I$$

Damit lässt sich die elektrische Leistung folgendermaßen definieren:

Definition:

Die elektrische Leistung P_{el} , die von einem elektronischen Bauteil oder Stromkreis umgesetzt wird, ist proportional zu der am Bauteil anliegenden Spannung U sowie der durch das Bauteil fließenden Stromstärke I .

$$P_{el} = U \cdot I$$

Einheit:

Ebenso wie die mechanische Leistung wird die elektrische Leistung in der Einheit Watt angegeben. Dabei gilt:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ A}$$

Auf fast allen Elektro-Geräten findet sich neben der Angabe der zulässigen Betriebsspannung auch eine Angabe einer damit verbundenen elektrischen Stromstärke oder Leistung. Zu beachten ist dabei, dass diese Werte nur bei der angegebenen Spannung gelten; da eine höhere Spannung in der Regel auch eine höhere Stromstärke zur Folge hat, nimmt die Leistung mit zunehmender Spannung überproportional zu.

5.3.3 Stromerzeugung und Stromverbrauch

In jedem Stromkreis muss die Menge der bereitgestellten Energie – da die Gesamtenergie stets erhalten bleibt und elektrische Ladung weder erzeugt noch vernichtet, sondern nur übertragen werden kann – stets der Menge an verbrauchter elektrischer Energie entsprechen.

In einem so großen Stromnetz wie dem der Bundesrepublik Deutschland gibt es selbstverständlich mehr als einen Stromgenerator; insgesamt gesehen muss der Kraftwerkspark allerdings die Verbraucherlast tragen sowie die sich beim Stromtransport ergebenden Leitungsverluste ausgleichen. Bei einer möglichst optimalen Zusammenstellung der Gesamtleistung mittels der verschiedenen Kraftwerkstypen sind ökologische, ökonomische sowie technische Aspekte gleichermaßen von Bedeutung.

5.4 LEITER, HALBLEITER UND ISOLATOREN

Ob ein elektrischer Strom in einem Stoff fließen kann, hängt von der Anzahl der frei beweglichen Ladungsträger innerhalb des Stoffes ab.

5.4.1 Leiter

Elektrische Leiter werden Stoffe genannt, in denen sich Ladungen leicht bewegen können. Die bekanntesten Leiter sind Metalle, Graphit, Säuren, Laugen und Salzlösungen.

In Metallen sind die einzelnen Atome in einer Gitterstruktur angeordnet, wobei sich die äußersten Elektronen („Valenzelektronen“) frei entlang des gesamten Gitters bewegen können („Metallbindung“, „Elektronengas“).

Bei nur einem ungebundenen Elektron je Atom steht dabei eine enorme Zahl an Ladungsträgern – etwa 10^{19} Elektronen je Kubik-Millimeter! – für den Ladungstransport frei zur Verfügung.

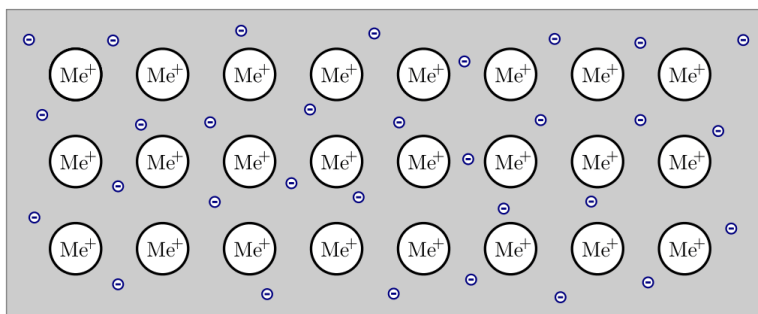


Abb. 5.12 „Elektronengas“ in einem metallischen Leiter.

Bei höheren Temperaturen führen die Atomrümpfe eines Metallgitters immer stärkere Wärmeschwingungen um ihre Ruhelagen aus. Die freien Elektronen werden dadurch in ihrer Beweglichkeit eingeschränkt, was zu einem höheren elektrischen Widerstand führt. Da die Zunahme des Widerstands in guter Näherung linear zur Erwärmung ist, kann der Widerstandswert eines Leiters mit folgender Formel berechnet werden:

$$R_T = R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Hierbei gibt R_{20} den Widerstandswert bei Raumtemperatur (20°C) an, ΔT entspricht der Temperaturdifferenz zu diesem Referenzwert (ebenfalls in °C). Der so genannte „Temperaturbeiwert“ α ist materialabhängig und wird in $1/K$ angegeben.

Bei niedrigen Temperaturen nehmen die Wärmeschwingungen der Atomrümpfe und der elektrische Widerstand entsprechend ab; in vielen Metallen verschwindet der elektrische Widerstand ab einer materialspezifischen Temperatur sogar vollständig („Supraleitung“).

In Flüssigkeiten können durch Lösungsvorgänge elektrisch geladene Atome und Moleküle („Ionen“) auftreten. Diese sind zwar bedeutend schwerer als Elektronen, können aber dennoch als freie Ladungsträger den elektrischen Strom leiten.

5.4.2 Halbleiter

In reinen Halbleiter-Materialien sind – im Gegensatz zu elektrischen Leitern – im Grundzustand (fast) keine freien Ladungsträger verfügbar. Beispielsweise bilden im wohl typischsten Halbleiter-Element Silizium (und auch in Germanium) alle vier Valenzelektronen kovalente Bindungen mit den vier benachbarten Atomen aus. Nur durch ein zeitweises Herauslösen der Valenzelektronen mittels Licht, Wärme oder ausreichender elektrischer Spannung lässt sich ein Ladungstransport in einem reinen Halbleiter erreichen.

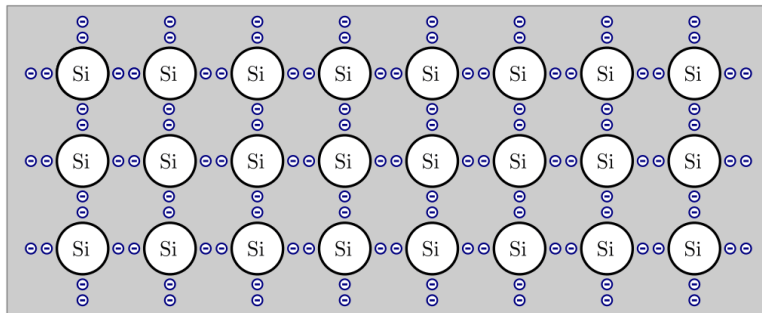


Abb. 5.13
Elektronenpaarbindungen im Halbleiter-Element Silicium.

Elementare Halbleiter befinden sich im Periodensystem der Elemente in der vierten Hauptgruppe und besitzen eine chemische Wertigkeit von vier. Nach dem gleichen Bindungsprinzip sind ebenso sogenannte Verbindungshalbleiter möglich, bei denen die *durchschnittliche* chemische Wertigkeit vier beträgt. Bei höheren Temperaturen lösen sich Elektronen häufiger aus den kovalenten Bindungen heraus; der elektrische Widerstand eines Halbleiters wird daher – anders als bei Metallen – durch eine Erwärmung zunächst geringer. Bei noch stärkerer Erwärmung überwiegt jedoch wieder der stromhemmende Effekt der Atomschwingungen, wodurch der elektrische Widerstand wiederum stark ansteigt.

Durch ein gezieltes Einbringen von Fremdatomen kann die Leitfähigkeit eines Halbleiters beeinflusst werden.

5.4.3 Isolatoren

Isolatoren sind Stoffe, in denen sich Ladungen (fast) überhaupt nicht bewegen können. Bekannte Beispiele hierfür sind Gummi, Porzellan, Glas, Diamant, destilliertes Wasser und Luft. Alle diese Stoffe haben gemeinsam, dass in ihnen weder Ionen noch schwach gebundene Elektronen für den Ladungstransport zur Verfügung stehen; alle Elektronen sind fest in chemischen Bindungen verankert.

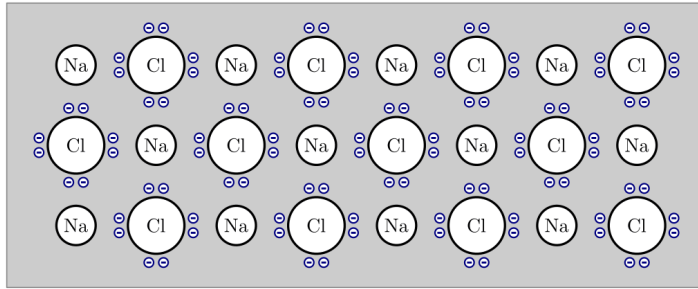


Abb. 5.14 Ionenbindung im Isolatorkristall Natriumchlorid

Bei extrem hohen Spannungen (einigen Kilo- bis Megavolt) können dennoch kurzzeitig Elektronen aus den Stoffbindungen entrissen werden. Die Folge ist ein „Durchschlag“-Strom (beispielsweise ein Blitz), bei dem in sehr kurzer Zeit sehr viel Energie transportiert wird. Da die Schäden für Menschen, Tiere, Pflanzen und elektronische Geräte entsprechend groß ausfallen können, werden beispielsweise hochgelegene Leitungen und Gebäude mit Überspannungs- beziehungsweise Blitzableitern ausgestattet.

Vakuum

Normalerweise sind Elektronen in Molekülen oder metallischen Festkörpern gebunden. Unter verschiedenen Bedingungen können Elektronen diese Bindungen allerdings verlassen:

- Trifft ausreichend energiereiches Licht auf einen Festkörper, so können durch die Lichteinwirkung Elektronen aus den Festkörper-Bindungen herausgelöst werden („Photo-Effekt“).
- Bei ausreichend hohen Temperaturen lösen sich Elektronen aus Metallen heraus („Glühemission“).

Die den Elektronen zugeführte Licht- beziehungsweise Wärme-Energie muss groß genug sein, um die Bindungsenergie der Elektronen zu überwinden; die restliche zugeführte Energie verbleibt als kinetische Energie bei den Elektronen.

Im Vakuum erfahren freie Elektronen keine Stöße mit anderen Objekten. Beschleunigt man sie durch Anlegen einer elektrischen Spannung, so können sie in eine bestimmte Richtung gelenkt und auf hohe Geschwindigkeitswerte beschleunigt werden. Auf diesem Prinzip beruhen beispielsweise Elektronenröhren.

5.5 ELEKTRISCHE FELDER

In ähnlicher Weise wie man das magnetische Feld eines Permanent- oder Elektromagneten zur Beschreibung der Kraftwirkung auf einen anderen Magneten nutzen kann, ist es auch möglich, das elektrische Feld einer Ladungsverteilung zur Beschreibung der Kraftwirkung auf andere elektrische Ladungen zu verwenden. Anders als Magnetfelder verlaufen elektrische Felder jedoch nicht auf geschlossenen Linien, sondern verlaufen von positiven elektrischen Ladungen hin zu negativen Ladungen.

Das Coulombsche Kraftgesetz

Die Grundlage für die Einführung eines elektrischen Felds bildet das so genannte Coulomb-Gesetz, das besagt, dass die Kraft zwischen zwei punktförmigen Ladungen proportional zu Ladungsmengen Q_1 und Q_2 sowie indirekt proportional zum Quadrat des Abstands r beider Ladungen ist:

$$F_{el} = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$$

Hierbei ist $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{A \cdot s}{V \cdot m}$ die elektrische Feldkonstante des Vakuums. Die Einheit dieser wichtigen Naturkonstanten kann auch folgendermaßen geschrieben werden:

$$\frac{V \cdot m}{A \cdot s} = \frac{V \cdot m}{C} = \frac{J \cdot m}{C^2} = \frac{N \cdot m^2}{C^2}$$

Mit Hilfe der elektrischen Feldkonstanten kann bei bekannten Ladungsmengen und ihrem Abstand auf die Größe der wirkenden Kraft geschlossen werden; der gesamte Vorfaktor wird bisweilen auch als „Coulomb-Konstante“ bezeichnet. Anschaulich bedeutet der Wert dieser Konstante, dass zwei Ladungen von je einem Coulomb, die sich in einem Abstand von einem Meter zueinander befinden, aufeinander eine Kraft von etwa 9GN ausüben würden – das entspräche einer Gewichtskraft von etwa 10^6 Tonnen. Man erkennt an diesem Beispiel zum einen, dass bei vielen Prozessen, etwa bei sich bewegenden Elektronen, die Gewichtskraft gegenüber der Coulomb-Kraft meist völlig vernachlässigt werden kann. Andererseits zeigt sich, dass 1 Coulomb eine sehr große Ladungsmenge darstellt; im Alltag treten üblicherweise nur Bruchteile dieser Ladungsmenge auf.

Für die Richtung der wirkenden Coulomb-Kraft gilt:

- Sind die Vorzeichen beider Ladungen gleich, so ist die wirkende Kraft positiv und die Ladungen stoßen sich ab.
- Haben beide Ladungen hingegen unterschiedliche Vorzeichen, so ist die Coulomb-Kraft negativ, und die Ladungen ziehen einander an.

Sind mehrere Ladungen räumlich getrennt angeordnet, so kann man zunächst die Coulomb-Kräfte paarweise berechnen und anschließend die wirkenden Gesamt-Kräfte durch Addition der Teilkräfte ermitteln.

5.5.1 Elektrische Feldstärke

Liegt eine kontinuierliche Verteilung vieler einzelner Ladungen vor, so wäre es zumindest sehr mühsam, die resultierende Wirkung auf eine weitere Probeladung als Überlagerung der zahlreichen einzelnen Coulomb-Kräfte zu beschreiben. Stattdessen verwendet man den Begriff der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$; diese gibt an, welche Kraftwirkung $\vec{F}_{el}$ eine Probeladung Q_P durch eine bereits vorhandene Ladung oder Ladungsverteilung erfährt:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{el}}{Q_P}$$

Die elektrische Feldstärke wird in der Einheit $\frac{N}{C}$ angegeben. Als Vektor gibt die elektrische Feldstärke die Richtung der Kraft an, die auf eine positive Probeladung wirkt. Die einzelnen Feldlinien gehen deshalb senkrecht von positiven Ladungen aus und enden senkrecht auf negativen Ladungen. Die Dichte der Feldlinien kann als Maß für die Stärke des elektrischen Felds angesehen werden.

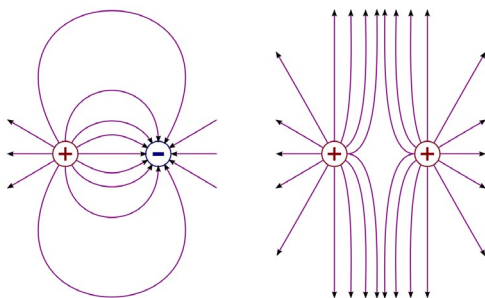


Abb. 5.15 Feldlinien von unterschiedlichen und gleichen elektrischen Ladungen gleicher Ladungsmenge.

Die Kraftwirkung auf negative Probeladungen ergibt sich, indem man sich die Pfeilrichtung der Feldlinien vertauscht vorstellt.

5.5.2 Elektrisches Feld eines Plattenkondensators

Ein elektrisches Feld mit gleichmäßig verteilten und in die gleiche Richtung zeigenden Feldlinien erhält man, wenn man zwei metallische, zueinander parallel angeordnete Platten mit entgegengesetzten Ladungsträgern bestückt. Im Inneren eines solchen „Plattenkondensators“ ist die elektrische Feldstärke an allen Stellen gleich („homogen“).

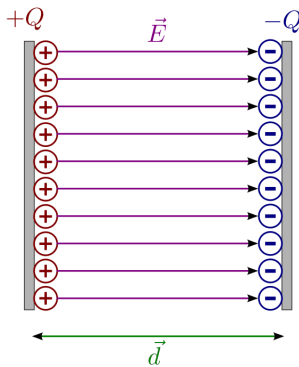


Abb. 5.16 Das elektrische Feld im Inneren eines Plattenkondensators.

Der Betrag der elektrischen Feldstärke eines Plattenkondensators ist davon abhängig, wie viele zusätzliche Ladungen sich über den Plattenflächen befinden. Das Verhältnis aus der gespeicherten Ladungsmenge Q und der Plattenfläche A wird auch als „elektrische Flussdichte“ $\vec{D}$ bezeichnet. Für ihren Betrag gilt: $D = \frac{Q}{A}$

Die elektrische Flussdichte $\vec{D}$ steht, wie auch die elektrische Feldstärke $\vec{E}$, senkrecht zu den Kondensatorplatten. Der Zusammenhang zwischen der elektrischen Flussdichte $\vec{D}$, welche die Ladungsverteilung beschreibt, und der elektrischen Feldstärke $\vec{E}$, welche die Kraftwirkung auf geladene Teilchen angibt, kann wiederum mittels der elektrischen Feldkonstante ϵ_0 formuliert werden:

$$D = \epsilon_0 \cdot E \quad \Leftrightarrow \quad E = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot D = \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \frac{Q}{A}$$

Um einen noch einfacheren Ausdruck für die Elektrische Feldstärke herzuleiten, ist ein kurzes Gedankenexperiment hilfreich: Wird eine einzelne positive Probeladung Q_p entgegen den Feldlinien von der negativen zur positiv geladenen Platte verschoben, so muss dafür eine Arbeit $W = F_{el} \cdot d = Q_p \cdot E \cdot d$ verrichtet werden, wobei d den Plattenabstand bezeichnet. Befindet sich die Ladung anschließend an der positiven Seite, so besitzt sie eine ebenso große potentielle Energie E_{pot} . Als elektrische Spannung U bezeichnet man eben diese potentielle Energie gegenüber der negativen Plattenseite, bezogen auf die Größe Q_p der Probeladung: $U = \frac{E_{pot}}{Q_p}$

Da sowohl die elektrische Spannung U als auch der Abstand d zwischen den geladenen Platten leicht messbare Größen sind, kann das elektrische Feld eines Plattenkondensators sehr einfach bestimmt werden.

Während das elektrische Feld an allen Stellen im Plattenkondensator gleich ist, nimmt die elektrische Spannung im Kondensator von der positiven zur negativen Platte linear auf Null ab.

5.5.2.1 Elektrische Influenz und Faradayscher Käfig

In Metallen gibt es stets eine Vielzahl an frei beweglichen Elektronen. Im neutralen Zustand werden die negativen Ladungen der Elektronen durch die positiven Ladungen der Atomrümpfe ausgeglichen. Lädt man ein einzelnes Stück Metall mit weiteren Elektronen auf, so verteilen sich diese ausschließlich entlang der Oberfläche, da die zusätzlichen Elektronen ebenfalls frei beweglich sind und sich gegenseitig abstoßen.

Bringt man ein Stück Metall in ein elektrisches Feld ein, so bewirkt dieses eine Verschiebung der frei beweglichen Elektronen zur positiven Platte hin; an der zur negativen Platte hin orientierten Seite bleiben die positiv geladenen Atomrümpfe übrig. Dieser als „elektrische Influenz“ bezeichnete Effekt hält so lange an, bis sich im Metall durch die Ladungsverschiebung ein gleich starkes, aber entgegengesetzt gerichtetes Feld einstellt.

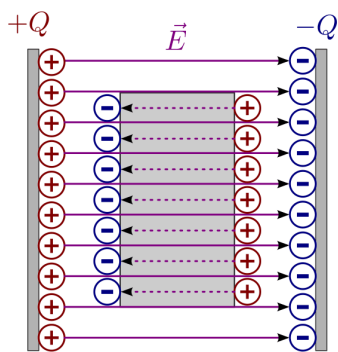


Abb. 5.17 Elektrische Influenz im Feld eines Plattenkondensators.

Im Inneren des Metalls überlagern sich das äußere und das induzierte elektrische Feld. Da beide Felder gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet sind, bleibt das Innere des Metalls somit feldfrei. Dies gilt nicht nur für massive metallische Körper, sondern auch für metallische Hohlkörper. In der Technik stellen beispielsweise Autokarosserien so genannte „Faradaysche Käfige“ dar (benannt nach Michael Faraday), welche die Insassen vor elektrischen Feldern und damit auch vor Stromflüssen, beispielsweise Blitzen, schützen.

5.5.3 Kapazität eines Plattenkondensators

Die Kapazität eines Plattenkondensators gibt an, wie viel die Ladungsmenge Q ist, die der Kondensator bei einer anliegenden Spannung U insgesamt aufnehmen kann:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Die Einheit der Kapazität ist Farad ($1F = \frac{1C}{1V}$). Da ein Coulomb eine sehr große Ladungsmenge darstellt, ist ebenso eine Kapazitätmenge von einem Farad sehr groß. In der Praxis übliche Kondensatoren werden daher in Piko-, Nano- oder Mikrofarad angegeben.

Elektrische Energie in einem Plattenkondensator

Wird in einem Plattenkondensator eine Ladung positive Ladung Q entgegen der elektrischen Feldlinien bewegt, so muss Arbeit gegen die elektrische Kraft F_{el} verrichtet werden. Bewegt man die Ladung von der negativen zur positiven Platte, die voneinander den Plattenabstand d haben, so gilt für die verrichtete Arbeit W_{el} :

$$W_{el} = F_{el} \cdot d$$

Wird ein Kondensator geladen, so kann man sich die dabei verrichtete elektrische Arbeit als schrittweisen Transport von elektrischer Ladung von einer Kondensatorplatte zur anderen vorstellen – nicht über die Luft zwischen den Kondensatorplatten, aber über die Anschlussdrähte. Als Folge der Ladungstrennung baut sich im Kondensator zunehmend eine elektrische Spannung auf.

Hat die Spannung zwischen den Kondensatorplatten den Wert U , so musste während des Ladevorgangs schrittweise Spannungen zwischen Null und U überwunden werden.

5.5.4 Bewegung von geladenen Teilchen in elektrischen Feldern

Bringt man ein Teilchen mit einer elektrischen Ladung in ein elektrisches Feld mit einer Feldstärke, so erfährt es eine Kraftwirkung. Handelt es sich bei dem Teilchen um ein Elektron oder Proton, so kann die Gewichtskraft des Teilchens gegenüber der elektrischen Kraft meist vernachlässigt werden. Für technische Anwendungen ist insbesondere die Bewegung von Elektronen in elektrischen Feldern von Bedeutung.

Bewegung in Richtung des elektrischen Feldes

Angenommen, ein frei bewegliches Elektron befindet sich zunächst in unmittelbarer Nähe der negativ geladenen Seite eines Plattenkondensators. Durch die elektrische Feldstärke wird es dann zur positiven geladenen Seite hin beschleunigt. Diese Bewegung ähnelt dem freien Fall eines Gegenstands im Gravitationsfeld der Erde: Es wird potentielle Energie in kinetische Energie umgewandelt.

$$E_{pot} = Q \cdot U$$

Die potentielle Energie des Elektrons ist also ausschließlich abhängig von der im Plattenkondensator anliegenden Spannung U , da die Ladung des Elektrons konstant ist.

Da die Energiemengen bei einzelnen Elektronen ziemlich gering sind, ist es üblich, diese in der Einheit „Elektronenvolt“ anzugeben.

In klassischen Oszilloskopen und Braunschen Röhren werden die freien Elektronen von einem spiralförmig aufgewickelten Heizdraht ausgesendet („Glüh elektrischer Effekt“). Ohne ein weiteres wirksames elektrisches Feld würde sich der Draht dabei aufgrund der verbleibenden Atomrümpfe positiv aufladen, und die Elektronen würden zurück in Richtung des Drahtes beschleunigt. Als Folge davon ergäbe sich eine nur wenige Millimeter dicke „Elektronenwolke“ um den Heizdraht herum. Wird hingegen mittels einer (positiv geladenen) Anode ein elektrisches Feld angelegt, so werden die Elektronen entlang der Feldlinien in Richtung der Anode beschleunigt.

Bewegung senkrecht zum elektrischen Feld

Erfolgt die Bewegung eines geladenen Teilchens, beispielsweise eines Elektrons, (zunächst) senkrecht zur Richtung des elektrischen Felds eines Plattenkondensators, so gleicht die vom geladenen Teilchen durchlaufene Bahn derjenigen, die ein waagrecht geworfener Gegenstand im Gravitationsfeld der Erde durchläuft. Verläuft das elektrische Feld in vertikaler Richtung, so bleibt die horizontale Komponente der Geschwindigkeit des geladenen Teilchens unverändert.

Bei einem Strahl aus freien Elektronen treten diese mit einer jeweils gleichen Eintrittsgeschwindigkeit in das elektrische Feld ein. Durch eine Variation der Spannung an den Kondensatorplatten und damit einer Beeinflussung des elektrischen Feldes kann somit die Bahn der Elektronen unmittelbar beeinflusst werden. Dieser Effekt wird beispielsweise in Röhren-Oszilloskopen genutzt, um den zeitlichen Verlauf eines beziehungsweise zweier Spannungssignale auf einem Schirm sichtbar zu machen.

5.6 MAGNETISMUS

Bereits seit der Antike kennen und nutzen die Menschen magnetische Erscheinungen. Insbesondere die Verwendung von dünnen, drehbar gelagerten Magnetscheiben in Kompassen war in vielerlei Hinsicht „richtungsweisend“ für die Entwicklung der Menschheit. Inzwischen sind insbesondere Elektromagnete, Elektromotoren, Generatoren und Transformatoren aus unserer modernen Gesellschaft nicht mehr wegzudenken.

5.6.1 Permanentmagnete

Wohl am bekanntesten ist die anziehende Wirkung von Magneten auf Eisen. Stoffe, die ebenso wie Eisen von Magneten angezogen werden und dabei selbst magnetisiert werden, bezeichnet man nach dem lateinischen Namen von Eisen („ferrum“) als „ferromagnetisch“ oder umgangssprachlich kurz als „magnetisch“. Hierzu zählen Kobalt, Nickel, Neodym, und wenige Legierungen. Auf nicht-ferromagnetische Stoffe zeigen Magnete (fast) keine Wirkung.

Das Modell der Elementarmagnete

Magnete besitzen stets zwei gegenüberliegende Bereiche, an denen ihre magnetische Wirkung besonders stark ist. Diese Bereiche werden als Magnetpole bezeichnet.

Zerbricht ein Magnet in zwei Teile, so stellt man fest, dass beide Teilstücke ihrerseits zwei Magnetpole besitzen. Auch bei weiterer Teilung treten die Magnetpole stets paarweise auf. Umgekehrt kann jeder Magnet aus einer Vielzahl kleinster „Elementarmagnete“ aufgefasst werden:

- Zeigen alle Elementarmagnete eines Magneten geordnet in die gleiche Richtung, so verstärken sie sich in ihrer Wirkung – ein starkes Magnetfeld ist die Folge.
- Zeigen die Elementarmagnete in unterschiedliche Richtungen, so heben sich ihre Wirkungen gegenseitig auf.

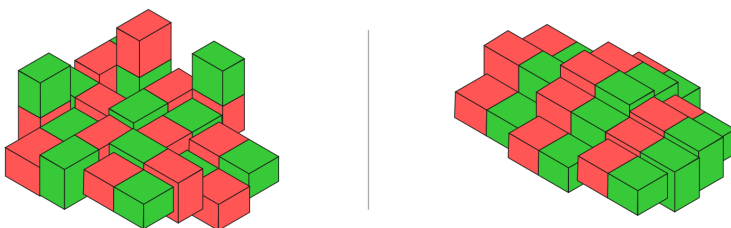


Abb. 5.18 Die Elementarmagnete eines magnetisierbaren Materials besitzen unterschiedliche Ausrichtungen. In einem magnetisierten Material weisen die Elementarmagnete hingegen eine einheitliche magnetische Ordnung auf.

Anders als bei elektrischen Ladungen existieren bei Magneten keine „Mono-Pole“, sondern nur „Di-Pole“: Bei einem Magneten treten Nord- und Südpol niemals einzeln, sondern stets in Kombination miteinander auf.

5.6.1.1 Magnetische Influenz

In nicht magnetisiertem Eisen sind die Elementarmagnete bereichsweise geordnet. Diese so genannten „Weißsche Bezirke“ besitzen ihrerseits allerdings unterschiedliche Ausrichtungen, so dass ein Stück Eisen von sich aus keine magnetische Wirkung auf andere Körper ausübt.

Eisen kann durch Annähern eines Magneten selbst zum Magneten werden. Bei diesem Vorgang, den man als „magnetische Influenz“ bezeichnet, folgen die einzelnen Elementarmagnete wie Kompassnadeln dem äußeren Magnetfeld. Da sich die Wirkungen der einzelnen Elementarmagnete addieren, wirkt das Eisen dadurch auch nach außen hin als Magnet.

In welchem Maß die magnetische Ordnung erhalten bleibt, wenn der äußere Magnet wieder entfernt wird, hängt von der Zusammensetzung des magnetisierten Stoffes ab:

- Bei magnetisch „weichen“ Materialien, beispielsweise Weicheisen, verschwindet der durch Influenz hervorgerufene Magnetismus (weitgehend) wieder.
- In magnetisch „harten“ Materialien, beispielsweise Stahl, bleibt die magnetische Wirkung dauerhaft erhalten.

Erschütterungen oder starkes Erhitzen können die Ordnung der Elementarmagnete wieder zerstören. Für alle Stoffe lässt sich eine bestimmte Temperatur („Curie-Temperatur“) angeben, oberhalb derer die thermische Bewegung der Stoffteilchen eine magnetische Ordnung verhindert. Beispielsweise ist Eisen ab 770°C nicht mehr magnetisierbar.

5.6.2 Das Magnetfeld

Die Kraft, die ein Magnet auf einen anderen magnetischen Körper ausübt, ist abhängig vom Abstand der Magnete, ihrer Form und von ihrer Ausrichtung zueinander.

Die stärkste Kraft zeigt ein Magnet an seinen beiden gegenüberliegenden Polen:

- Magnetisierbare Körper (beispielsweise Büroklammern aus Eisen) werden von beiden Magnetpolen gleichermaßen stark angezogen (Magnetische Influenz).
- Permanent- und Elektromagnete erfahren bei Annäherung ihrer Magnetpole je nach Ausrichtung eine starke anziehende oder abstoßende Wirkung. Werden die Magnetpole – in Anlehnung an das Erdmagnetfeld – als Nord- bzw. Südpol bezeichnet, so zeigt sich, dass sich Nord- und Südpole gegenseitig anziehen, während sich Nord- und Nordpole bzw. Süd- und Südpole gegenseitig abstoßen.

Die magnetische Kraft ist in unmittelbarer Nähe zu den Magnetpolen am stärksten und nimmt mit zunehmendem Abstand von den Magnetpolen ab.

Die Abhängigkeit der Magnetkräfte von der Form des Magneten lässt sich am leichtesten mit Hilfe von Eisenfeilspänen beobachten. Diese werden an unterschiedlichen Stellen um den Magneten herum verschieden stark ausgelenkt bzw. angezogen, so dass sich jeweils ein für die Form des Magneten charakteristisches Muster ergibt.

Auch eine Magnethadel lenkt sich, wenn sie um einen Magneten herumbewegt wird, an jeder Stelle in der gleichen Richtung wie die Eisenfeilspäne aus, wobei sich der Nordpol der Magnethadel stets zum Südpol des Magneten hin orientiert.

Die geschlossenen Linien, die sich in den Mustern der Eisenfeilspäne um den Magneten herum ergeben, deuten somit jeweils auf die Richtung der Magnetkraft hin. Man bezeichnet diese räumliche Verteilung der Magnetkräfte um den Magneten herum als „Magnetfeld“ und stellt sie in technischen Zeichnungen (etwas vereinfacht) durch einige stets geschlossene Linien dar. Oftmals werden noch entlang dieser „Magnetfeldlinien“ kleine Pfeile eingezeichnet, die jeweils am Nordpol aus dem Magneten aus- und am Südpol wieder eintreten.

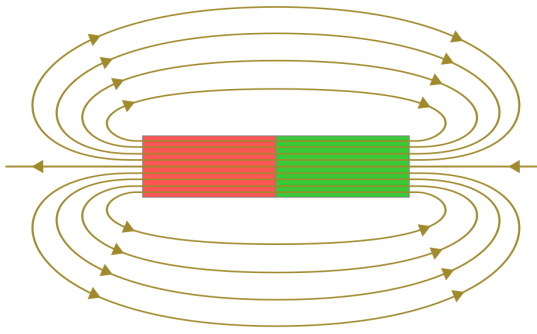


Abb. 5.19 Die Magnetfeldlinien eines Stabmagneten treten am magnetischen Nordpol aus und am Südpol wieder ein.

Auf diese Weise kann sowohl die Kraftwirkung eines Magneten visualisiert werden als auch sein Einfluss auf andere magnetische bzw. magnetisierbare Körper abgeschätzt werden.

Zusammenfassung:

- Magnetpole treten stets paarweise auf. Entlang diesen verlaufen die Magnetfeldlinien auf stets geschlossenen Bahnen.
- Die Pfeile der Magnetfeldlinien zeigen innerhalb des Magneten in Richtung Nordpol, außerhalb des Magneten in Richtung Südpol.
- Gleiche Magnetpole stoßen sich ab, unterschiedliche Magnetpole ziehen sich an.
- Die magnetische Wirkung nimmt mit zunehmendem Abstand von den Magnetpolen ab.
- Sind mehrere Magneten in gleicher Richtung ausgerichtet, so verstärken sich ihre Wirkungen zu einem Gesamtmagnetfeld. Bei wechselnder Ausrichtung ist nach außen hin (fast) keine magnetische Wirkung feststellbar.
- Magnetfelder lassen sich bereits durch dünne magnetisierbare Platten (beispielsweise aus Eisen) abschirmen, durchdringen hingegen nicht magnetisierbare Materialien nahezu ohne Abschwächung.

5.6.3 Elektromagnete

Im Jahr 1820 entdeckte Hans-Christian Oersted, dass auch von einem stromdurchflossenen elektrischen Leiter eine (schwache) Kraftwirkung auf eine nahe gelegene Kompassnadel ausgeht. Diese Feststellung widersprach der bis dahin gängigen Auffassung, dass es sich bei Elektrizität und Magnetismus um zwei voneinander getrennte Phänomene handele.

Durch verschiedene Positionierungen des elektrischen Leiters und der Magnetnadel(n) konnte Örsted in gleicher Weise wie bei Permanentmagneten das schwache Magnetfeld des Leiters bestimmen. Er konnte folgende Gesetzmäßigkeit beobachten:

Rechte-Hand-Regel (für Leiterbahnen):

Umfasst man einen stromdurchflossenen geraden Leiter mit der rechten Hand so, dass der ausgestreckte Daumen entlang der technischen Stromrichtung (von + nach -) zeigt, dann geben die übrigen Finger die Richtung der magnetischen Feldlinien an.

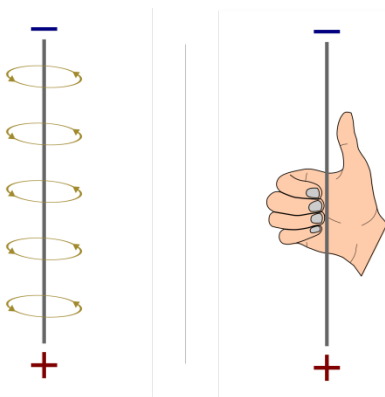


Abb. 5.20 Magnetfeldlinien und Rechte-Hand-Regel bei einem geraden, stromdurchflossenen Leiterstück.

Die Rechte-Hand-Regel gilt auch, wenn der elektrische Leiter zu einer Kreisform gebogen wird. Der Daumen muss hierbei mit der Krümmung des Leiters mitgeführt werden, um stets in die technische

Stromrichtung zu zeigen. Es stellt sich dabei heraus, dass das resultierende Magnetfeld an den verschiedenen Stellen der Leiterschleife stets in die gleiche Richtung zeigt.

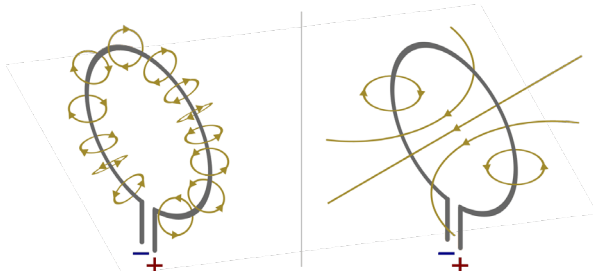


Abb. 5.21 Das Magnetfeld einer Leiterschleife.

Beispiel:

- Liegt die Leiterschleife auf einem Tisch und verläuft die technische Stromrichtung entgegen des Uhrzeigersinns, so zeigt das Magnetfeld im Inneren der Leiterschleife an jeder Stelle senkrecht nach oben. (Auf der Außenseite der Leiterschleife zeigt es senkrecht nach unten.)

Die Kraftwirkungen an den einzelnen Stellen des elektrischen Leiters addieren sich bei einer Leiterschleife somit zu einem Gesamtmagnetfeld, das an die Form eines Ringmagneten erinnert. Dieser Effekt lässt sich noch wesentlich verstärken, indem mehrere Leiterschleifen übereinandergelegt werden bzw. ein langer Leiter zu einer Spule gewickelt wird.

5.6.3.1 Das Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule

Eine lange stromdurchflossene Spule mit vielen Windungen erzeugt nach außen hin ein Magnetfeld, das dem eines Stabmagneten sehr ähnlich ist. Hierbei gibt wieder die Rechte-Hand-Regel Auskunft, in welcher Richtung sich der Nord- bzw. Südpol des „Elektromagneten“ befindet.

Rechte-Hand-Regel (für Spulen):

Umfasst man die Windungen einer Spule mit der rechten Hand so, dass die Finger in die technische Stromrichtung zeigen, dann liegt der magnetische Nordpol der Spule in Richtung des ausgestreckten Daumens.

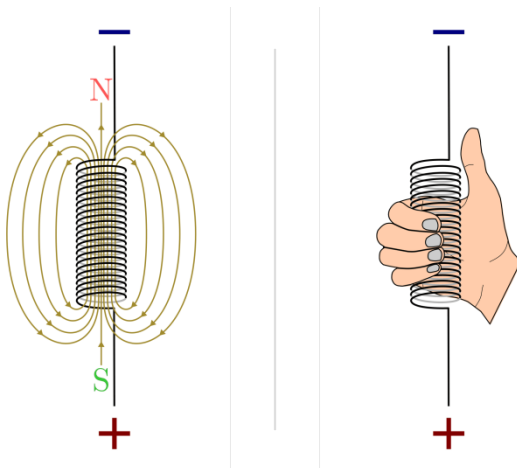


Abb. 5.22 Magnetfeldlinien und Rechte-Hand-Regel bei einer stromdurchflossenen Spule.

Die magnetische Wirkung einer stromdurchflossenen Spule kann zusätzlich gesteigert werden, indem durch die Spule ein Stück nicht magnetisiertes Eisen gelegt wird. Durch die magnetische Influenz wird das Eisen selbst magnetisch und verstärkt die magnetische Wirkung der Spule erheblich.

Elektromagnete haben gegenüber Permanentmagneten folgende Vorteile:

- Elektromagnete lassen sich ein- und ausschalten.
- Die Stärke eines Elektromagneten lässt sich durch die Stromstärke in der Spule regulieren.
- Nord- und Südpol eines Elektromagneten lassen sich vertauschen, indem die Plus- und Minuspol der anliegenden Spannung getauscht werden.

- Elektromagnete sind fast nicht zerbrechlich, verlieren im Lauf der Zeit nicht an Stärke, und sind kostengünstig herzustellen.

5.6.4 Magnetische Feldstärke und magnetische Flussdichte

Quantitativ kann die Kraftwirkung eines Magnetfelds durch die so genannte magnetische Feldstärke $\vec{H}$ beschrieben werden.

Bei einer geraden Leiterbahn ist die magnetische Feldstärke proportional zur fließenden Stromstärke I und umgekehrt proportional zum Abstand r von der Leiterbahn. Es gilt also:

$$H_{\text{Leiterbahn}} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Die Einheit der magnetischen Feldstärke ist gemäß der obigen Formel $\frac{A}{m}$.

Im Inneren einer Leiterschleife ist der Wert der magnetischen Feldstärke gegenüber einer geraden Leiterbahn um den Faktor π erhöht. Kombiniert man eine Zahl N an Leiterschleifen zu einer langen Spule, so ist die magnetische Feldstärke im Inneren der Spule nahezu „homogen“, die Feldlinien verlaufen also parallel zueinander.

Eine zweite wichtige Größe zur Beschreibung von magnetischen Feldern ist die so genannte magnetische Flussdichte $\vec{B}$. Sie gibt anschaulich an, wie viele Feldlinien durch eine bestimmte Fläche hindurchgehen. Zwischen der magnetischen Flussdichte, welche die räumliche Verteilung der Feldlinien kennzeichnet, und die magnetische Feldstärke, welche die Kraftwirkung auf andere Magneten beschreibt.

Die Einheit der magnetischen Flussdichte lautet: $[B] = 1 \frac{V \cdot s}{m^2} = 1 \text{ Tesla} = 1 \text{ T}$

Beispielsweise beträgt die magnetische Flussdichte der Erde rund $0,04 \text{ mT}$.

Der obige Zusammenhang gilt streng genommen nur im Vakuum, in guter Näherung jedoch auch in Luft. Befindet sich jedoch ein anderes Material im Magnetfeld, so muss dessen so genannte Permeabilität berücksichtigt werden, die angibt, ob die durch das Material laufenden Feldlinien durch das Material eher zusammengezogen oder aus dem Material hinausgedrängt werden.

5.6.5 Die Lorentz-Kraft

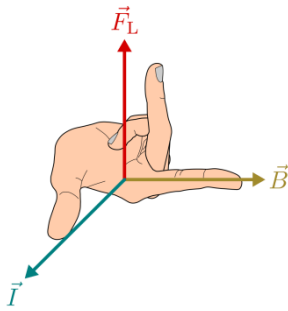
Während jeder elektrische Stromfluss ein Magnetfeld zur Folge hat, so hat gleichermaßen jedes Magnetfeld einen Einfluss auf einen elektrischen Strom.

Befindet sich ein Stück eines stromdurchflossenen Leiters in einem Magnetfeld, so wirkt auf das Leiterstück eine Kraft. Sie wird nach ihrem Entdecker Hendrik Antoon Lorentz als „Lorentz-Kraft“ bezeichnet. Der Betrag der Kraft hängt von der Stärke Stromflusses bzw. Magnetfeldes sowie vom Winkel zwischen Leiter und Magnetfeld ab:

- Der Betrag der Kraft ist am größten, wenn der Leiter senkrecht zum Magnetfeld ausgerichtet ist.
- Zeigen der Leiter und das Magnetfeld in die gleiche Richtung, so wirkt keine Kraft.

Die Lorentz-Kraft wirkt stets senkrecht zur Stromrichtung und senkrecht zum Magnetfeld. Für den Zusammenhang zwischen Stromfluss, Magnetfeld und Richtung der wirkenden Kraft gilt folgende Merkregel:

Drei-Finger-Regel:



Zeigt der Daumen der rechten Hand in Richtung der technischen Stromrichtung (von + nach -) und der Zeigefinger in Richtung des Magnetfeldes, so gibt der Mittelfinger die Richtung der wirkenden Kraft an.

Die Drei-Finger-Regel als Merkhilfe für die Richtungen der Lorentz Kraft $\vec{F}_L$, des Magnetfeldes $\vec{B}$ und der technischen Stromrichtung $\vec{I}$ (Abb.5.23).

Bezeichnet man die Länge des vom Strom I durchflossenen Leiterstücks, das sich im Magnetfeld $\vec{B}$ befindet, mit $\vec{s}$, so kann die Lorentzkraft $\vec{F}_L$ quantitativ mittels folgender Formel berechnet werden:

$$\vec{F}_L = I * (\vec{s} \times \vec{B})$$

Verläuft der stromdurchflossene Leiter senkrecht zum Magnetfeld, so ist der Betrag der Lorentz kraft gleich $F_L = I \cdot s \cdot B$. Wird nicht nur ein einzelnes Leiterstück, sondern beispielsweise eine Spule mit n Windungen in das Magnetfeld eingebracht, so ergibt sich auch eine n -fache Weglänge s und somit eine n -fache Kraftwirkung; dies wird beispielsweise bei der Konstruktion von Elektromotoren genutzt.

Bewegung geladener Teilchen in magnetischen Feldern

Ein elektrischer Strom entspricht einem zeitlichen Transport elektrischer Ladung. Setzt man den Zusammenhang $I = \frac{Q}{t}$ zwischen der Stromstärke I , der transportierten Ladungsmenge Q und der dafür benötigten Zeit t in die obige Formel ein, so folgt:

$$\vec{F}_L = \frac{Q}{t} * (\vec{s} \times \vec{B})$$

Anwendung: Massen-Spektrometer

Die Lorentz-Kraft kann genutzt werden, um die so genannte „spezifische Ladung“ eines Teilchens, das heißt das Verhältnis aus seiner Ladung Q und seiner Masse m zu bestimmen. Hierzu lässt man das Teilchen (bzw. ein Strahl gleichartiger Teilchen) mit einer Geschwindigkeit v senkrecht zu den Magnetfeldlinien in ein Magnetfeld eintreten.

Bewegt sich ein geladenes Teilchen, beispielsweise ein Ion oder ein Elektron, in der waagrechten Ebene und ist das Magnetfeld vertikal ausgelegt, so bleibt die Geschwindigkeit $\vec{v}$ des Teilchens auch bei einer Ablenkung durch die Lorentz-Kraft senkrecht zum Magnetfeld. Befindet sich die Anordnung in einem Vakuum, so herrschen keine Reibungskräfte, also ist der Betrag der Geschwindigkeit des Teilchens konstant. Hält man auch die magnetische Flussdichte B des Magnetfelds konstant, so bleibt ebenfalls der Betrag der Lorentz-Kraft F_L konstant.

Die Lorentz-Kraft zwingt das geladene Teilchen durch die kontinuierliche Ablenkung auf eine Kreisbahn. Als Gleichgewichtsbedingung müssen die dafür notwendige Radialkraft und die Lorentz-Kraft gleich groß sein.

Ist die Flussdichte B des Magnetfelds sowie die Eintrittsgeschwindigkeit v bekannt, so kann durch eine Messung des Radius r der Kreisbahn auf die spezifische Ladung des Teilchens geschlossen werden; eine derartige Anordnung wird Massen-Spektrometer genannt.

Handelt es sich bei dem Teilchen-Strahl um Ionen mit jeweils gleicher Ladung, so kann mit einem Massen-Spektrometer insbesondere bestimmt werden, in welchem Verhältnis einzelne Isotope des Ions auftreten; diese haben weitestgehend gleiche chemische und physikalische Eigenschaften, variieren jedoch in ihrer Masse m . In einem Massen-Spektrometer werden Isotope mit größerer Masse auf

Kreisbahnen mit größerem Radius gelenkt, so dass mittels entsprechender Detektoren die Häufigkeitsverteilung der einzelnen Isotope gemessen werden kann.

5.7 ELEKTROMAGNETISCHE INDUKTION

Bewegt man ein Stück Metall senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfelds, so bewirkt die Lorentz-Kraft im Inneren des Leiters eine Verschiebung der Elektronen senkrecht zur Bewegungsrichtung und ebenfalls senkrecht zur Richtung des Magnetfelds. Da sich nur die freien Elektronen, jedoch nicht die positiv geladenen Atomkerne bewegen, baut sich im Inneren des Metalls zwischen den beiden Enden ein elektrisches Feld beziehungsweise eine elektrische Spannung auf.

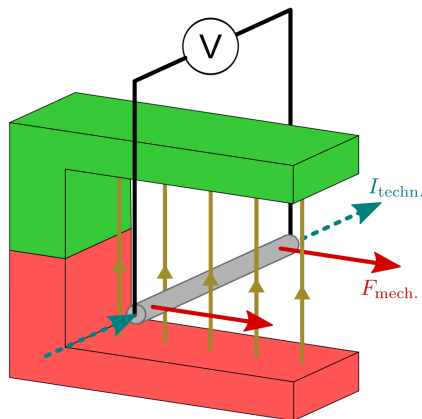


Abb. 5.24 Elektromagnetische Induktion durch mechanisches Bewegen einer Leiter-Schaukel.

Dieser Vorgang wird elektromagnetische Induktion genannt. Schließt man ein Messgerät oder einen Verbraucher (beispielsweise eine kleine Glühbirne) an die Enden des Leiters an, so kann prinzipiell die induzierte Spannung gemessen beziehungsweise als Stromquelle genutzt werden. Bei einem einzelnen kurzen Leiterstück ergeben sich jedoch nur sehr geringe Spannungswerte im Millivolt-Bereich; größere Spannungs- beziehungsweise Stromwerte ergeben sich wiederum, wenn das einzelne Leiterstück durch eine Spule mit möglichst vielen Windungen ersetzt wird.

In der obigen Abbildung ist auch die technische Stromrichtung eingezeichnet, die sich bei einer Bewegung der Leiterschaukel durch die angegebene mechanische Kraft ergibt (Lorentz-Kraft beziehungsweise Drei-Finger-Regel). Ist kein Verbraucher beziehungsweise Messgerät angeschlossen, so baut sich in gleicher Richtung ein elektrisches Feld auf, bedingt durch Ladungsverschiebungen im Inneren der Leiterschaukel. Im Gleichgewichtsfall wird die Lorentz-Kraft, welche die Elektronen im Inneren des durch das Magnetfeld bewegten Leiterstücks erfahren, durch das sich resultierende elektrische Feld ausgeglichen.

Die sich einstellende Spannung wird Induktionsspannung genannt. Es tritt nur dann eine Induktionsspannung auf, wenn der Leiter mit einer Geschwindigkeit v senkrecht zum Magnetfeld bewegt wird. Hat die Geschwindigkeit den Wert Null oder verläuft die Bewegung parallel zu den Magnetfeldlinien, so ist die induzierte Spannung gleich Null.

5.7.1.1 Das Faraday'sche Induktionsgesetz

Um eine allgemeinere Formel zur Beschreibung der einer elektromagnetischen Induktion auftretenden Spannung U_i aufstellen zu können, ist es sinnvoll, eine neue Größe Φ zu definieren, die man als „magnetischen Fluss“ bezeichnet: $\Phi = B \cdot A$

Bei der magnetischen Flussdichte geht es nicht um Ladungsträger, die durch eine bestimmte Fläche hindurch wandern, sondern um die Anzahl an Feldlinien, welche durch diese hindurchgehen. Der magnetische Fluss beschreibt entsprechend der Menge an Feldlinien, welche durch eine Fläche A verlaufen.

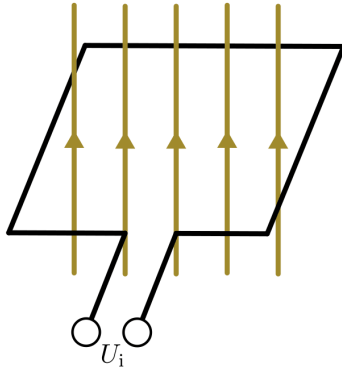


Abb. 5.25 Magnetischer Fluss Φ durch eine Leiterschleife.

Ist der magnetische Fluss Φ durch eine Fläche zeitlich konstant, so ist die induzierte Spannung U_i gleich Null. Ändert sich hingegen der magnetische Fluss Φ , indem man wahlweise die Stärke B der magnetischen Flussdichte und/oder die Größe der vom Magnetfeld durchfluteten Fläche A ändert, so wird eine Induktionsspannung U_i erzeugt, die umso größer ist, je schneller diese Änderung erfolgt. Als Zusammenhang ergibt sich somit für die Induktionsspannung in einer Leiterschleife:

$$U_i = - \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$

Diese Gesetzmäßigkeit, wonach die in einer Leiterschleife induzierte Spannung gleich der zeitlichen Änderung des magnetischen Flusses ist, wurde als erstes im Jahr 1831 von Michael Faraday entdeckt.

6 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1 Mazkariano, CC BY-SA 4.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>>, via Wikimedia Commons

Die Abbildungen Abb.2.2 bis inklusive Abb.5.25: Bernhard Grotz; <http://www.grund-wissen.de>

7 TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1	SI-Basiseinheiten
Tab. 1.2	Beispiele von Zehnerpotenzen und deren Schreibweise
Tab.2.1a&b	Beispiele Dichte unterschiedlicher Stoffe
Tab. 2.1c&d	Beispiele Dichte unterschiedlicher Flüssigkeiten
Tab. 2.1e&f	Beispiele Dichte unterschiedlicher Gase
Tab. 2.2	Aggregatzustände
Tab. 2.3	Beispiele für Kräfte in Natur und Technik
Tab.2.4	Beispiele Gewichtskraft
Tab. 2.5	Beispiele für Leistungen in Natur und Technik
Tab. 2.6	Viskositätswerte verschiedener Flüssigkeiten (bei 20°C)
Tab. 3.1	Werte der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Stoffen
Tab. 3.2	Brechzahlen gegenüber Vakuum für verschiedene Stoffe
Tab. 4.1	Spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe
Tab. 4.2	Schmelztemperaturen verschiedener Stoffe bei Normaldruck (1013 hPa)
Tab. 4.3	Siedetemperaturen verschiedener Stoffe bei Normaldruck (1013 hPa)
Tab. 4.4	Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien
Tab. 5.1	Stromstärken in Natur und Technik
Tab. 5.2	Spannungen in Natur und Technik