

t.

TRAUNER VERLAG

BILDUNG

*Bildung,
die begeistert!*

Naturwissen- schaften

Chemie ■ Biotechnologie ■ Physik
● inkl. Übungs-CD-ROM

HEINER ZECHMANN
BARBARA SCHWAIGER
ALFRED MAR
FRANZ JAKOB
JOHANNES JAKLIN
PETER FISCHER
ROMANA FIALA





Wir weisen darauf hin, dass das Kopieren zum Schulgebrauch aus diesem Buch verboten ist – § 42 Absatz (3) der Urheberrechtsgesetznovelle 1996:
„Die Befugnis zur Vervielfältigung zum eigenen Schulgebrauch gilt nicht für Werke, die ihrer Beschaffenheit und Bezeichnung nach zum Schul- oder Unterrichtsgebrauch bestimmt sind.“



Dieses Buch wurde auf FSC-zertifiziertes Papier gedruckt.

Das Zeichen für verantwortungsvolle Waldwirtschaft

Impressum

Naturwissenschaften III/IV HTL

Chemie ■ Biotechnologie ■ Physik

● inkl. Übungs-CD-ROM

1. Auflage 2013, Nachdruck 2014

Alle Drucke der 1. Auflage sind im Unterricht parallel verwendbar.

Schulbuch-Nr. 160.770

TRAUNER Verlag, Linz

Die Autorinnen und Autoren

DR. HEINER ZECHMANN,

Professor i. R. an der Höheren technischen Bundeslehr- und Versuchsanstalt Villach

DI BARBARA SCHWAIGER,

Professorin an der Höheren technischen Bundeslehranstalt Leonding

DI ALFRED MAR,

Direktor der Höheren technischen Lehranstalt für Lebensmitteltechnologie, Getreidewirtschaft und Biotechnologie Wels

MAG. DI FRANZ JAKOB,

Professor an der Höheren technischen Bundeslehranstalt Leonding

DI DR. JOHANNES JAKLIN,

Professor an der Höheren technischen Lehranstalt Pinkafeld

MAG. DI PETER FISCHER,

Professor an der Höheren technischen Bundeslehranstalt für Automatisierungstechnik und Betriebsinformatik Neufelden

MAG. ROMANA FIALA,

Professorin an der Höheren technischen Bundeslehranstalt Braunau

Approbiert an Höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten gemäß den derzeit geltenden Lehrplänen für den Unterrichtsgebrauch im Unterrichtsgegenstand Naturwissenschaften für den III. und IV. Jahrgang,

GZ BMUKK-5.048/0013-B/8/2012, 13. März 2013

Dieses Schulbuch wurde auf der Grundlage eines Rahmenlehrplanes erstellt. Die Auswahl und Gewichtung der Inhalte erfolgt durch den Lehrer/die Lehrerin.

Liebe Schülerin, lieber Schüler,

Sie bekommen dieses Schulbuch von der Republik Österreich für Ihre Ausbildung. Bücher helfen nicht nur beim Lernen, sondern stehen Ihnen auch im Berufsleben zum Nachlesen und Nachschlagen zur Verfügung.

© 2013
TRAUNER Verlag + Buchservice GmbH,
Köglerstraße 14, 4020 Linz,
Österreich/Austria

Alle Rechte vorbehalten.

Layout wurde vom Patentamt muster-
geschützt: © Österreich 2010

Nachdruck und sonstige Vervielfältigung,
auch auszugsweise, nur mit ausdrück-
licher Genehmigung des Verlages.

Lektorat/Produktmanagement:

Mag. Elisabeth Kindermann

Korrektorat: Mag. Silvia Wiedemann

Titelgestaltung: Mag. Wolfgang Kraml

Grafik und Gestaltung:

Michael Wenigwieser, Teresa Foisner,

Gertrud Šimec

Schulbuchvergütung/Bildrechte:

© VBK/Wien

Gesamtherstellung:

TRAUNER DRUCK GmbH & Co KG, Linz

ISBN 978-3-99033-005-0

Schulbuch-Nr. 160.770

www.trauner.at

Ziele und Aufbau dieses Lehrbuches

Dieses Buch bereitet Sie auf die in der Technik so häufigen naturwissenschaftlichen Anforderungen vor. Es bildet aber auch die Grundlage für die im Lehrplan vorgesehene verstärkte naturwissenschaftliche Allgemeinbildung. Nicht zuletzt wird die Reifeprüfung für viele von Ihnen die Hochschulreife bringen.

Reines Auswendiglernen kann nicht das Ziel einer höheren Schule und damit des naturwissenschaftlichen Unterrichts sein. Sie werden daher ständig aufgefordert, durch eigene Überlegungen am Lernfortschritt mitzuarbeiten.

Wesentliche Elemente und verwendete Symbole

Am Beginn eines Abschnittes erfahren Sie, welche Ziele gesteckt werden. Die **Ziele kennzeichnen**, was Sie nach Durcharbeiten des Kapitels können sollen. Die Ziele sind farblich nach der **Kompetenzstufe gekennzeichnet**.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- Blau (Wiedergeben, Verstehen)
- Rot (Anwenden)
- Schwarz (Analysieren und Entwickeln)

Beim Text der Grundlagen-Kapitel sind keine Kürzungen möglich. Es ist unumgänglich, das Basiswissen Schritt für Schritt zu erarbeiten. Bei anwendungsorientierten Kapiteln sind Schwerpunktsetzungen möglich.

Wesentliche Begriffe und Inhalte (Kernaussagen) sind blau unterlegt.

Beispiele zu den Inhalten sind sandfarben unterlegt.

Die Randspalte dient nicht nur der Illustration und unverbindlichen Ergänzung, sondern enthält zum Teil Aufforderungen und Informationen, die für eine entwickelnde Lernweise notwendig sind.

Am Ende eines Abschnitts finden Sie:



Ziele erreicht?

Zur Erarbeitung der Kenntnisse und Fertigkeiten sowie zur Kontrolle des Lernerfolgs stehen den Lernenden Wissensfragen, Aufgaben und Abschlusstests („Ziele erreicht?“) zur Verfügung. Die Aufgabenstellungen und „Ziele erreicht?“-Aufgaben sind ebenfalls nach dem Kompetenzmodell mit den Farben Blau, Rot und Schwarz gekennzeichnet. Es wird unterschieden zwischen Aufgaben, bei denen die Schüler/innen

- die gelernten Fachinhalte verstehen und wiedergeben;
- erworbenes Wissen anwenden können;
- eigenständig Probleme analysieren und Lösungen entwickeln.

Folgende Piktogramme unterstützen das Lehren und Lernen im Buch:

-  für Verknüpfungen zu anderen Kapiteln, zum zweiten Band dieser Serie oder zu anderen Gegenständen.
-  für Verweise zu Gesetzen, Normen, rechtlichen Rahmenbedingungen oder für Auszüge aus Gesetzestexten
-  weist auf ergänzende und vertiefende Inhalte und Aufgaben hin, die Sie auf der beiliegenden CD finden. Die Übungs-CD-ROM enthält auch interaktive Wissenstests zu den einzelnen Kapiteln.
-  Aufforderung, sich des Internets zu bedienen (ergänzende Angaben, Aktualisierungen, Recherchen). Die Antworten finden sich auf der Übungs-CD-ROM.
-  für Fragestellungen, die dem Verständnis der Inhalte dienen oder das Thema abrunden. Die Antworten finden sich auf der Übungs-CD-ROM.
-  für Wissenswertes und Tipps, für Fragestellungen komplexerer Natur. Die Antworten finden sich auf der Übungs-CD-ROM.
-  Aufforderung, mit den Kollegen und Kolleginnen in der Klasse ein Thema zu diskutieren. Die Antworten finden sich auf der Übungs-CD-ROM.
-  „Achtung!“ – „Beachten Sie!“. Vielfach wird mit diesem Piktogramm auf häufig vorkommende Fehler hingewiesen.
-  für Experimente.

Beim Experimentieren ist den Sicherheitsanweisungen des Buches und der Lehrkraft unbedingt Folge zu leisten. Vergewissern Sie sich zuvor, dass Ihnen die sicherheitsrelevanten Symbole geläufig sind und dass Sie die Sicherheitseinrichtungen im Physik- bzw. Chemiesaal kennen. Experimentbeschreibungen im Buch bzw. auf der Übungs-CD-ROM sind nicht als Anleitungen für Schülerinnen und Schüler gedacht.

Vorwort

„Naturwissenschaften III/IV HTL“ stellt – genau wie im Lehrplan vorgesehen – nach den allgemeinen Grundlagen und Übersichten des ersten und zweiten Jahrgangs für den dritten und vierten Jahrgang die Anwendungen und vertiefende Betrachtungen in den Vordergrund.

- Der Kompetenzbereich „Chemische Technologie“ aus „Naturwissenschaften I/II HTL“ wird betont praxisbezogen auf die organische Chemie fokussiert fortgesetzt.
- Die Biotechnologie ist als eigener Kompetenzbereich hinzugekommen. Das Buch vermittelt – weitab von einer oberflächlich-polemischen Behandlung der Gentechnologie – ein umfassendes Bild dieser Disziplin.
- Der Kompetenzbereich „Naturwissenschaften, Umwelt und Gesellschaft“ verlangt den Jugendlichen vermehrt die hohen Kompetenzstufen des Bewertens und Anwenders ab und vermittelt auch die geforderte staatsbürgerliche Erziehung. Das Ziel ist die Mündigkeit, die sich daraus ergibt, dass die Mündigen die Fähigkeiten und Möglichkeiten der Naturwissenschaften einerseits und ihre Grenzen andererseits einschätzen können.
- Im Kompetenzbereich „Physikalische Phänomene und Methoden“ wird neben der Mechanik, den Schwingungen und Wellenoptik, der Thermodynamik und der Elektrodynamik besonders auf den Bereich Moderne Physik eingegangen. Dabei werden grundsätzlich neue Konzepte und Modelle für das Naturverständnis vor gestellt.

Die Lehrkräfte können auswählen, ob sie im Bereich Biotechnologie mehr Gewicht auf die biochemischen Grundlagen oder auf die technologischen Aspekte legen. Die Auswahlmöglichkeiten betreffen aber auch andere Themen, beispielsweise in den ausführlich behandelten Bereichen Schwingungen und Wellen, Elektrodynamik, Thermodynamik, Relativitätstheorie, Quanten-, Kern- und Astrophysik sowie bei den Farbstoffen, Waschmitteln, Pharmazeutika und Kunststoffen. Das Buch bietet damit eine umfassende Grundlage für Maturantinnen und Maturanten im Fach Naturwissenschaften. Die Lehrplanintention einer verstärkten Allgemeinbildung und breiten Studierfähigkeit der Absolventinnen und Absolventen wird mit diesem Buch umgesetzt. Zur selbstständigen Festigung des Erlernten sowie für den Freizeitgenstand „Naturwissenschaftliches Laboratorium“ bietet die beigefügte CD einige Anregungen.

Johannes Jaklin, Alfred Mar, Barbara Schwaiger und Heiner Zechmann (Chemie und Biotechnologie) sowie Romana Fiala, Peter Fischer und Franz Jakob (Physik) sind für jede Art von Anregung und Kritik dankbar (office@trauner.at). Die Autoren danken der Firma NTL für die freundliche Unterstützung.

Linz, Juni 2013

Inhaltsverzeichnis

| | | | | | |
|----------|--|-----|----------|---|-----|
| A | Chemische Technologie | 9 | 4 | Mikrobiologie | 143 |
| 1 | Fossile Rohstoffe | 10 | 5 | Biotechnologische Verfahrenstechnik | 148 |
| 1.1 | Kohle | 10 | 5.1 | Fermenter und Prozessparameter | 148 |
| 1.2 | Erdöl und Erdgas | 11 | 5.2 | Ausgewählte Beispiele – Fermentationen | 153 |
| 2 | Petrochemie – Kohlenwasserstoffe | 16 | C | Naturwissenschaften, Umwelt und Gesellschaft | 159 |
| 2.1 | Methan | 17 | 1 | Fossile und erneuerbare Energieträger | 160 |
| 2.2 | Ethen | 18 | 2 | Halogenkohlenwasserstoffe | 168 |
| 2.3 | Propen | 18 | 3 | Kunststoffe | 173 |
| 2.4 | Buten | 19 | 4 | Suchtmittel und Gesellschaft | 177 |
| 2.5 | Diene – Gummi | 19 | 5 | Lebensmittel | 184 |
| 2.6 | Aromaten | 20 | 6 | Strahlenbelastung und Nanotechnologie | 189 |
| 2.7 | Mehrkerlige Aromaten | 24 | D | Physikalische Phänomene und Methoden | 193 |
| 2.8 | Verbundsystem in der chemischen Industrie | 25 | 1 | Mechanik | 194 |
| 3 | Halogenkohlenwasserstoffe | 26 | 1.1 | Bewegungsgleichungen für Translationen | 194 |
| 4 | Alkohole– Phenole – Ether | 29 | 1.2 | Bewegungsgleichungen für Rotationen | 198 |
| 5 | Aldehyde und Ketone | 37 | 2 | Schwingungen und Wellen | 201 |
| 6 | Carbonsäuren und Carbonsäureester | 42 | 2.1 | Schwingungen | 201 |
| 7 | Organische Stickstoffverbindungen | 55 | 2.1.1 | Federpendel | 204 |
| 7.1 | Nitroverbindungen, Amine und Amide | 55 | 2.1.2 | Fadenpendel | 206 |
| 7.2 | Aminosäuren und Peptide | 57 | 2.1.3 | Drehpendel | 208 |
| 7.3 | Heterocyclen | 59 | 2.1.4 | Physisches Pendel | 209 |
| 8 | Makromolekulare Substanzen | 60 | 2.1.5 | Überlagerung von Schwingungen | 210 |
| 8.1 | Cellulose und halb synthetische Kunststoffe | 61 | 2.1.6 | Erzwungene und gedämpfte Schwingung | 218 |
| 8.2 | Vollsynthetische Kunststoffe | 64 | 2.1.7 | Energieformen bei Schwingungen | 222 |
| 8.3 | Kunststoffverarbeitung | 77 | 2.1.8 | Kopplung von Pendeln | 223 |
| 8.4 | Kunststoffanalytik | 82 | 2.2 | Wellen | 224 |
| 9 | Wasch- und Reinigungsmittel | 83 | 2.2.1 | Das Prinzip von Huygens und mechanische Wellen | 228 |
| 10 | Farbstoffe | 89 | 2.2.2 | Brechung | 230 |
| 11 | Pharmazeutika – Drogen – Doping | 95 | 2.2.3 | Beugung und Interferenzen | 232 |
| 11.1 | Pharmazeutika | 96 | 2.3 | Geometrische und Wellenoptik | 235 |
| 11.2 | Drogen | 102 | 2.3.1 | Lichtausbreitung und Schattenbildung, Spektrum | 236 |
| 11.3 | Doping | 103 | 2.3.2 | Reflexion | 238 |
| B | Biotechnologie | 105 | 2.3.3 | Brechung | 239 |
| 1 | Grundlagen der Biochemie und Ernährung | 106 | 2.3.4 | Dispersion | 242 |
| 1.1 | Proteine | 106 | 2.3.5 | Spiegel | 243 |
| 1.2 | Fette | 110 | 2.3.6 | Linsen | 245 |
| 1.3 | Kohlenhydrate | 114 | 2.3.7 | Optische Instrumente | 248 |
| 2 | Molekulare Grundlagen der Zelle und Genetik | 119 | 2.3.8 | Das menschliche Auge | 254 |
| 2.1 | DNA und genetischer Code | 120 | 2.3.9 | Interferenz von Lichtwellen | 254 |
| 2.2 | Zellteilung und Proteinbiosynthese | 122 | 2.3.10 | Beugung von Lichtwellen | 256 |
| 2.3 | Molekularbiologische Analytik | 125 | 2.3.11 | Polarisation | 258 |
| 2.4 | Methoden der Gentechnik und DANN-Rekombinationstechnik | 127 | 2.4 | Akustik | 263 |
| 3 | Stoffwechselprozesse | 130 | 2.4.1 | Schallfeld und Schallausbreitung | 263 |
| 3.1 | Metabolismus und Enzyme | 130 | 2.4.2 | Schallfeldgrößen | 264 |
| 3.2 | Ausgewählte Stoffwechselwege | 135 | | | |

| | | | | | |
|----------|---|-----|-------|---|-----|
| 2.4.3 | Schallintensitätspegel | 267 | 5.1.1 | Die Lichtgeschwindigkeit | 321 |
| 2.4.4 | Schallquellen | 268 | 5.1.2 | Einsteinsche Postulate | 324 |
| 3 | Thermodynamik | 270 | 5.1.3 | Die einsteinsche Lichtuhr | 327 |
| 3.1 | Kinetische Gastheorie | 270 | 5.1.4 | Zeitdilatation und Längenkontraktion | 329 |
| 3.1.1 | Das ideale Gas | 270 | 5.1.5 | Transformationen | 330 |
| 3.1.2 | Zustandsgleichung eines idealen Gases | 272 | 5.1.6 | Relativistische Masse und relativistische Energie | 333 |
| 3.1.3 | Gasgesetze | 273 | 5.1.7 | Relativistischer Dopplereffekt | 335 |
| 3.1.4 | Zustandsänderungen des idealen Gases | 276 | 5.1.8 | Allgemeine Relativitätstheorie (ART) | 336 |
| 3.1.5 | Kinetische Gastheorie: Maxwell-Boltzmann-Verteilung | 278 | 5.2 | Quantenphysik | 339 |
| 3.2 | Hauptsätze der Thermodynamik | 279 | 5.2.1 | Die Lichtquantenhypothese | 339 |
| 3.2.1 | Temperatur | 279 | 5.2.2 | Die De-Broglie-Welle | 343 |
| 3.2.2 | Erster Hauptsatz der Thermodynamik | 281 | 5.2.3 | Die heisenbergsche Unschärferelation | 347 |
| 3.2.3 | Zustandsänderung des idealen Gases und erster Hauptsatz | 284 | 5.2.4 | Der Tunneleffekt | 348 |
| 3.2.4 | Kreisprozesse | 288 | 5.2.5 | Die Schrödingergleichung | 350 |
| 3.2.5 | Carnotscher Kreisprozess | 289 | 5.2.6 | Verschränkte Teilchen | 352 |
| 3.2.6 | Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik | 292 | 5.3 | Atom- und Kernphysik | 354 |
| 3.2.7 | Wärmekraftmaschinen | 295 | 5.3.1 | Das bohrsche Atommodell | 354 |
| 4 | Elektrodynamik | 299 | 5.3.2 | Das Atommodell von Bohr und Sommerfeld und das Pauliprinzip | 359 |
| 4.1 | Elektromagnetische Induktion | 299 | 5.3.3 | Kernphysik | 361 |
| 4.1.1 | Magnetfeld und Leiterschleife | 299 | 5.3.4 | Radioaktivität | 362 |
| 4.1.2 | Lenzsche Regel, allgemeines Induktionsgesetz | 300 | 5.3.5 | Kernspaltung und Kernfusion | 365 |
| 4.1.3 | Selbstinduktion einer Spule | 303 | 5.4 | Astrophysik, Gravitation | 369 |
| 4.1.4 | Energie des Magnetfeldes einer Spule | 307 | 5.4.1 | Gravitationsfeld und Planetenbewegung | 369 |
| 4.2 | Wechselstrom | 309 | 5.4.2 | Das Universum | 372 |
| 4.2.1 | Wechselspannung | 309 | 5.4.3 | Die Entwicklung von Sternen | 373 |
| 4.2.2 | Wechselstromwiderstände | 310 | 5.5 | Higgs, das Standardmodell, SUSY und TOE | 377 |
| 4.2.3 | Schaltung von Wechselstromwiderständen | 314 | 5.5.1 | Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik | 377 |
| 4.2.4 | Energie und Leistung im Wechselstromkreis | 317 | 5.5.2 | Theory of Everything – TOE | 380 |
| 4.2.5 | Der Transformator | 319 | | | |
| 5 | Moderne Physik | 321 | | | |
| 5.1 | Relativitätstheorie | 321 | | | |
| | | | | Antworten | 381 |
| | | | | Bildnachweis | 411 |
| | | | | Stichwortverzeichnis | 413 |



A Chemische Technologie

Wir nutzen täglich – ob direkt oder indirekt – Rohstoffe und Produkte der organisch-chemischen Industrie. Tragetaschen aus Kunststoff, atmungsaktive Freizeitjacken, Medikamente, Duftstoffe und Aromen, Farben und Lacke sind nur einige von zahlreichen Beispielen. Diese vielen verschiedenen Produkte bestehen aus wenigen gleichen Grundstoffen, die heutzutage fast ausschließlich aus Erdöl und Erdgas gewonnen werden. Sie lernen in diesem Kapitel wichtige Rohstoffe und Produkte kennen und werden über ihre Bedeutung für Wirtschaft, Technik, Gesellschaft und Umwelt informiert.

| | |
|--|-----------------|
| 1 Fossile Rohstoffe | Seite 10 |
| 2 Petrochemie – Kohlenwasserstoffe | Seite 16 |
| 3 Halogenkohlenwasserstoffe | Seite 26 |
| 4 Alkohole – Phenole – Ether | Seite 29 |
| 5 Aldehyde und Ketone | Seite 37 |
| 6 Carbonsäuren und Carbonsäureester | Seite 42 |
| 7 Organische Stickstoffverbindungen | Seite 55 |
| 8 Makromolekulare Substanzen | Seite 60 |
| 9 Wasch- und Reinigungsmittel | Seite 83 |
| 10 Farbstoffe | Seite 89 |
| 11 Pharmazeutika – Drogen – Doping | Seite 95 |

1 Fossile Rohstoffe



Braunkohlebagger



Anthrazit, eine besonders wertvolle Steinkohlenart



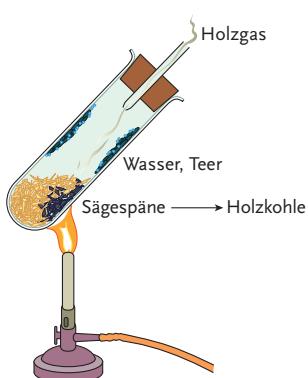
Besprechen Sie die Wirtschaftlichkeit (Förderung, Transport etc.) von Kohle sowie ihre Umwelt(un)freundlichkeit im Vergleich mit anderen Energieträgern.



Was soll diese Abbildung aussagen?



Stellen Sie Holzkohle her, indem Sie in einem Reagenzglas Sägespäne erhitzen. Die Abgase können entzündet werden. Die Produkte (Teer, Methanol etc.) sind denen des Zigarettenrauchs ähnlich.



Vor 50 Jahren wurde gesagt, dass die weltweiten Erdölvorräte den Bedarf 30 bis 40 Jahre lang decken werden können. Diese Aussage gilt durch Neuentdeckungen und bessere Fördermethoden heute immer noch. Die Kohlevorkommen reichen für weit größere Zeiträume und könnten auch für die Herstellung von Treibstoffen herangezogen werden. Die Frage ist aber, wollen wir weiterhin ungebremst Kohle und Erdölprodukte verbrennen? Wir belasten dabei die Umwelt und verändern das Weltklima. Statt die fossilen Rohstoffe zu verbrennen, ist ihr Einsatz zur Herstellung organischer Produkte wie Kunststoffe, Düngemittel, Pharmazeutika, Reinigungsmittel, Farben und Lacke usw. viel sinnvoller.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- beschreiben, auf welchen Säulen die **Energieversorgung** beruht;
- die derzeitige **Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen** erklären;
- die **Komplexität der Raffinerieprozesse** bis hin zu den kommerziellen Endprodukten nachvollziehen.

Fossile Rohstoffe entstanden in geologischer Vorzeit durch Zersetzung abgestorbener Pflanzen oder Tiere. 90 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs basieren auf fossilen Energieträgern.

1.1 Kohle

Wenn sich über lange Zeiträume hinweg Pflanzenreste unter Druck und Luftabschluss zersetzen, entsteht Kohle. Je älter die Kohle ist, desto geringer ist ihr Wassergehalt und desto höher ihr Kohlenstoffgehalt. Sie enthält außer C, H und O auch N- und S-Verbindungen. Nach dem Verbrennen bleiben anorganische Verbindungen als Asche zurück.

Braunkohle stammt aus dem Tertiär (ca. 50 Millionen Jahre alt, C-Gehalt ca. 70 %, Heizwert ca. 25 000 kJ/kg), Steinkohle aus dem Erdaltertum (ca. 300 Millionen Jahre alt, C-Gehalt ca. 80 %, Heizwert ca. 30 000 kJ/kg). Braunkohle wird weitgehend im Tagebau abgebaut, Steinkohle im Untertagebau gefördert.

Weniger als ein Prozent der bekannten Kohlevorkommen werden jährlich verbraucht. Kohle könnte den Weltenergieverbrauch daher über einen längeren Zeitraum decken. Die Umwandlung von Kohle in flüssige Treibstoffe ist möglich, aber derzeit zu teuer.

Verwendung von Kohle:

- Braunkohle: 87 % zur Stromerzeugung (kalorische Kraftwerke).
 - Steinkohle: 44 % für die Roheisenerzeugung (Koks zur Beschickung der Hochofen), 32 % zur Stromerzeugung, 6 % für die chemische Industrie.
- Als Brennstoff in Haushalten spielt Kohle in westlichen Ländern nur mehr eine geringe Rolle.

Das wichtigste österreichische Kohlekraftwerk wird in Dürnrohr (NÖ) mit polnischer Steinkohle betrieben.

1.2 Erdöl und Erdgas

Erdöl und Erdgas sind fossile Rohstoffe, die aus abgestorbenen Kleinstlebewesen, die sich am Meeresgrund ablagerten, entstanden sind. Sie bestehen hauptsächlich aus einem Gemisch verschiedener aliphatischer und cyclischer Kohlenwasserstoffe. Erdöl und Erdgas bilden das Rückgrat unserer Industriegesellschaft. Der überwiegende Teil wird verbrannt, d. h., es wird chemische Energie in andere Energieformen überführt. Nur ein geringer Teil dient als Schmiermittel, Baustoff oder zur Erzeugung organischer Produkte.

Suche, Förderung und Transport

Erdgas und Erdöl kommen oft gemeinsam vor; es gibt auch reine Gasvorkommen. Erdölvorkommen stellen keine unterirdischen Seen dar, sondern das Öl findet sich meist aufgesaugt in porösen Gesteinsschichten. Daher ist nie eine vollständige Förderung möglich. Die **Suche (Exploration)** erfolgt vor allem mit seismischen Methoden. Dabei wird die Reflexion von künstlichen Erdbebenwellen an ölhältigen Gesteinsschichten ausgewertet. Trotzdem sind Bohrungen nach Öl bzw. Gas nicht immer erfolgreich (fündig).

Beim **Rotary-Tiefbohrverfahren** werden rotierende Bohrköpfe (meist Rollenmeißel aus Edelstahl; Diamantbohrer werden nur selten verwendet) über zusammensetzbare Bohrstangen angetrieben. Das Bohrgestänge ist doppelmantelig und kann mit Spülflüssigkeit den Gesteinsabrieb hochpumpen. Eine fündige Bohrung hat zunächst oft genügend Druck, um das Öl an die Oberfläche zu bringen. Wenn der Lagerstättendruck nachlässt, muss mit Pumpe weiter gefördert werden. Das vor Ort von Erdgas, Wasser und Schlamm befreite Erdöl wird Rohöl genannt.

Der **Transport** kann mit **Pipeline** (Rohrleitung mit ca. 1 m Durchmesser) oder **Schiff** erfolgen. LNG-Schiffe transportieren bis zu 160 000 t **Liquid Natural Gas** (gekühlt und unter Druck verflüssigt). Öltanker sind bis zu 400 m lang und haben ein Fassungsvermögen von bis zu 550 000 t.

Österreich besitzt zwar noch kleinere Vorkommen in Nieder- und Oberösterreich, muss aber den Großteil an Öl und Gas importieren. Der Transport erfolgt hauptsächlich mit Öltankern, die arabisches oder lybisches Öl in Triest in die **Adria-Wien-Pipeline AWP** einspeisen.

Erdgas bezieht Österreich vorzugsweise aus Russland. Die Übernahme- und Verdichterstation Baumgarten an der March versorgt dabei etwa ein Drittel von Westeuropa mit russischem Gas. Die **Trans-Austria-Gasleitung TAG** führt nach Italien und Slowenien, die **West-Austria-Gasleitung WAG** nach Deutschland und Frankreich. Ehemalige Gasvorkommen im Marchfeld wurden als Energiereserve wieder mit russischem Erdgas aufgefüllt.

Aufarbeitung von Erdgas

Erdgas besteht hauptsächlich aus Methan, ein wenig Ethan, Propan und Butan sowie je nach Quelle stark schwankenden Mengen an Wasser und Dihydrogensulfid (Schwefelwasserstoff H_2S). Wasser, Stickstoff, Schwefelverbindungen und Helium werden meist noch am Gasfeld abgetrennt. Das Erdgas wird mit Geruchsstoffen versetzt, damit ausströmendes Gas aus Pipelines bzw. im Haushalt schneller bemerkt und aufgespürt werden kann.



Was ist älter – Erdöl oder Erdgas? Begründen Sie Ihre Entscheidung.



Bohrtürme (werden wieder abgebaut), elektrische Pumpe



Rollenmeißel aus Edelstahl



Öltanker



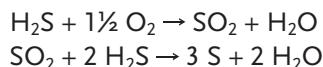
Ein mittlerer Öltanker fasst so viel wie ein Kesselwagenzug von 100 km Länge.



Pipeline (in Alaska und Sibirien oberirdisch)

Clausverfahren

Aus Gründen des Umweltschutzes (und weil S-Verbindungen Katalysatoren schädigen) werden Erdölprodukte entschwefelt. H₂S aus Erdgas und aus der Entschwefelung von Treibstoffen dient zur Produktion von Schwefel. Dabei wird H₂S verbrannt und das entstandene SO₂ mit weiterem H₂S zu Schwefel umgesetzt:

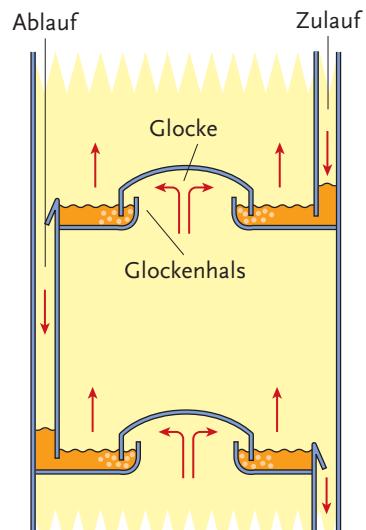


Der Schwefel dient vor allem zur Herstellung von Schwefelsäure und Gummi.



OMV-Raffinerie Schwechat (die schlanken Türme sind Destillierkolonnen)

Prinzip einer Glockenbodenkolonne



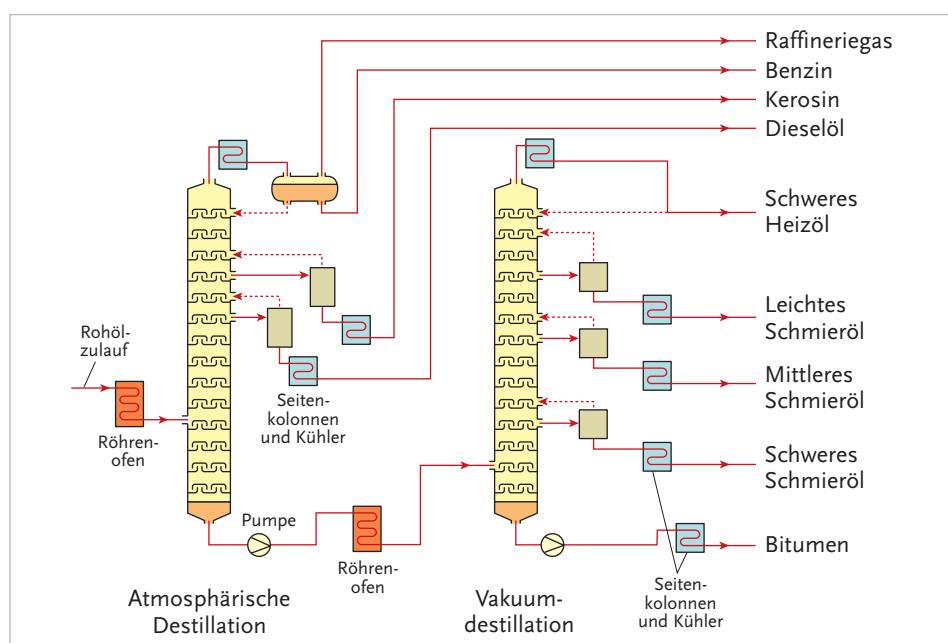
Der aufsteigende Dampf wird auf jedem Boden durch Glocken gezwungen, die flüssige Fraktion zu durchströmen



Glockenboden

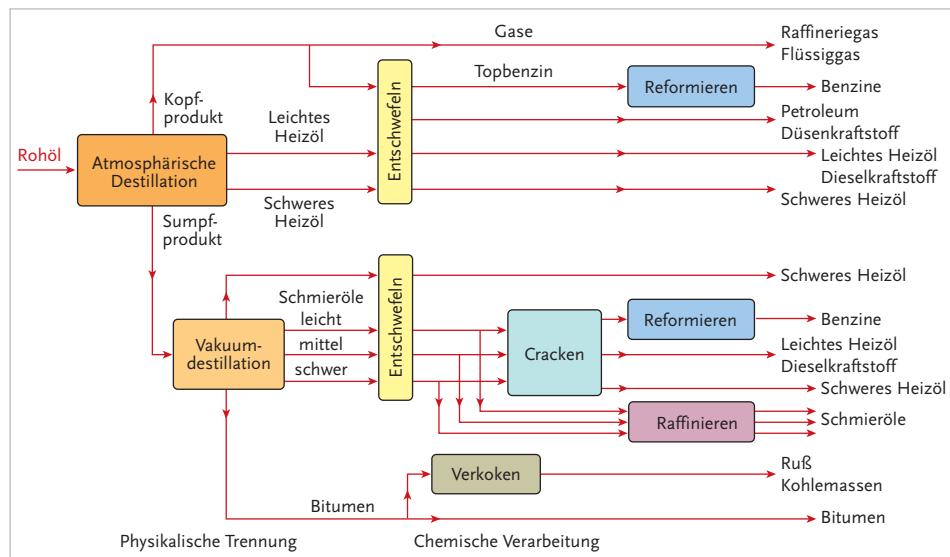
Aufarbeitung von Rohöl in der Raffinerie

Rohöl als homogenes Flüssigkeitsgemisch wird durch Destillation in seine Bestandteile zerlegt. Genauer gesagt: Man erhitzt Rohöl auf etwa 400 °C, sodass der Großteil dampfförmig vorliegt, und trennt aufgrund der unterschiedlichen Siedepunkte beim Kondensieren. Die Dämpfe steigen in einer Glockenbodenkolonne sich abkühlend von Boden zu Boden auf. Substanzen mit niedrigen Siedepunkten (aus kleinen Molekülen aufgebaut) gelangen am höchsten. Man erhält dabei aber nicht reine Stoffe, sondern Fraktionen (Gemische, die aus Stoffen ähnlicher Moleküle bestehen).



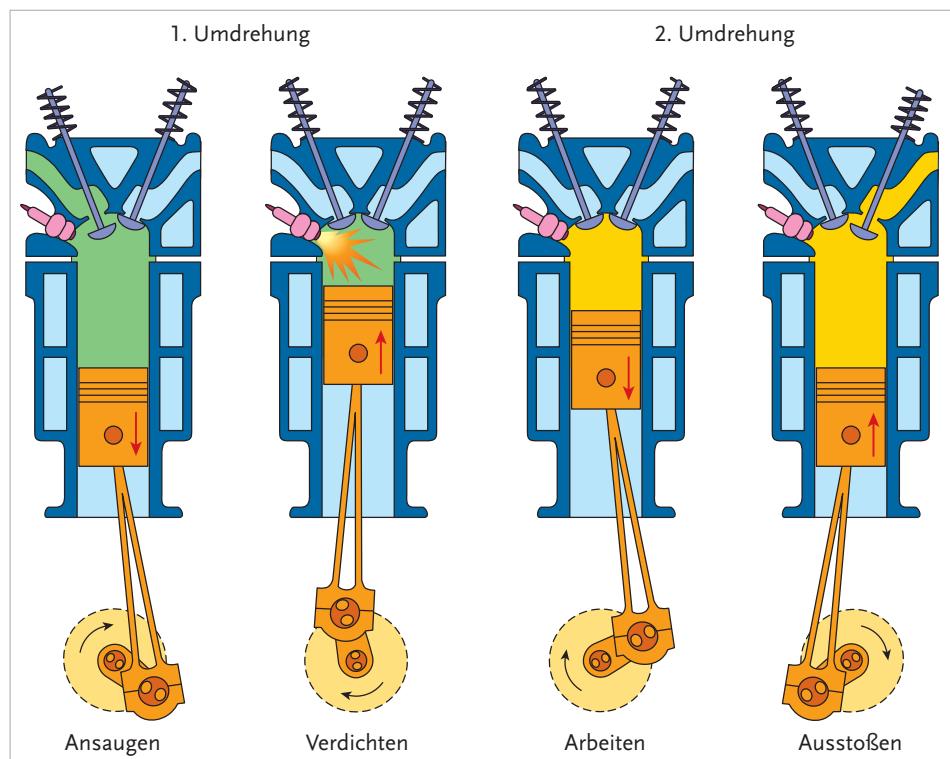
Der Vorgang wird in zwei Stufen durchgeführt. In der **Primärdestillation** (atmosphärischen Destillation) erhält man die im Rohöl gelösten Gase sowie Treibstofffraktionen (siehe Abbildung). Es handelt sich um Stoffe mit Molekülgrößen bis etwa 20 Kohlenstoffatome. Der nicht verdampfte Anteil der Primärdestillation (enthält Substanzen aus größeren Molekülen) dient als Heizöl oder wird in der **Vakuumdestillation** in Schmieröle aufgetrennt. Dabei wird nicht bei erhöhter Temperatur verdampft (dies würde viele Stoffe unkontrolliert zersetzen), sondern bei verringertem Druck gearbeitet. Der unverdampfte Rückstand ist Bitumen.

Produkte der Raffinerie



Benzin

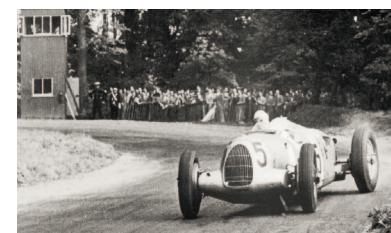
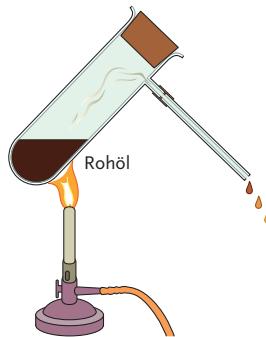
Benzine verschiedener Fraktionen (d. h. verschiedener Siedebereiche) werden als Lösungsmittel – beispielsweise in der Lackindustrie – verwendet. Der weitaus überwiegende Teil dient aber dem Antrieb von Ottomotoren. Ein Maß für die Qualität von Ottokraftstoff ist die **Octanzahl OZ (Klopffestigkeit)**. Eine hohe OZ bedeutet eine gleichmäßige Explosion des Benzin-Luft-Gemisches im Arbeitstakt des Motors sowie geringe Neigung zu Frühzündungen durch die Verdichtung. Ungleichmäßige sowie verfrühte Explosions führen zum Klopfen oder Klingeln, wobei die Lager stark belastet werden und die Lebensdauer des Motors verringert wird.



Die OZ ist eine Vergleichsgröße, die in Testmotoren festgestellt wird. Man vergleicht dabei den Treibstoff mit Mischungen aus **Heptan** (ist mit **OZ = 0** festgelegt) und **2,2,4-Trimethylpentan** (die auch iso-Octan genannte Verbindung ist mit **OZ = 100** festgelegt). Verhält sich beispielsweise ein Treibstoff im Testmotor wie ein Gemisch



Als primitive Destillationsapparatur wird ein großes Reagenzglas mit seitlichem Ansatz und angesetztem Glasrohr verwendet. Man destilliert Rohöl und wechselt nach jedem Milliliter die Reagenzglasvorlage. Die Entzündlichkeit der erhaltenen Fraktionen kann auf einer Platte mit dem Zündholz geprüft werden.



1936



Heute

Die Formel 1 war vor 80 Jahren ungefähr gleich schnell wie heute. Während in diesen Frühzeiten des Motorsports oft abenteuerlich giftige und explosive Treibstoffe verwendet wurden, ist heute die Formel 1 verpflichtet, Benzin mit maximal ROZ 102 einzusetzen.



NICOLAUS AUGUST OTTO,
1832 BIS 1891

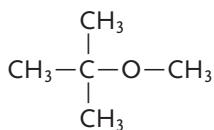


Wie sieht die Strukturformel von iso-Octan aus?



In Brasilien wird aus Zuckerrohr hergestelltes Ethanol nicht nur als Zusatz, sondern als Hauptkomponente des Treibstoffs verwendet.

MTBE = Methyl-tertiärbutyl-ether (Methoxy-methyl-propan)



Cracken siehe Kap. A, 2.



Auftanken eines Flugzeugs

aus 5 % Heptan und 95 % iso-Octan, erhält er die Octanzahl 95. Geradkettige Alkane zeigen niedrige Werte, während verzweigte Alkane, Cycloalkane und Aromaten hohe Werte haben. Mit Alkoholen (z. B. Ethanol) und Ethern (z. B. **MTBE**) kann die Octanzahl gesteigert werden. Damit sind sogar Werte über 100 möglich. Die Verwendung von Bleiverbindungen zur Steigerung der OZ ist in Österreich nicht mehr zulässig.

ROZ einiger Verbindungen (das „R“ steht für „Research“):

| | |
|---|-----|
| Heptan | 0 |
| Octan | 0 |
| Hexan | 26 |
| Cyclohexan | 83 |
| Benzen | 99 |
| 2,2,4-Trimethylpentan (iso-Octan) | 100 |
| 2,3-Dimethylbutan | 102 |
| Ethanol | 109 |
| Methyl-tertiärbutyl-ether (MTBE) | 118 |

Platforming (Reformieren) ist ein Raffinerieprozess, bei dem geradkettige in verzweigte und ringförmige Kohlenwasserstoffe umgewandelt werden. Der Name resultiert aus der Verwendung von Platin als Katalysator.

Beim **Cracken** werden die weniger benötigten längerkettigen Kohlenwasserstoffe zu Verbindungen mit Kettenlängen der Benzin- und Dieselfraktionen gespalten.

Kerosin (Petroleum)

Für die Luftfahrtindustrie bedeutete es einen großen Fortschritt, als statt der Benzinmotoren, die teures Flugbenzin von ROZ 100 benötigen, Strahltriebwerke zur Verfügung standen. Diese können bei höherer Leistung mit dem billigen Kerosin (Petroleum) betrieben werden.

Die verschiedenen Sorten von Kerosin haben Siedebereiche zwischen 150 und 250 °C. Sie werden für die Strahltriebwerke der Düsenflugzeuge und die Turbinen von Turbopropflugzeugen und Hubschraubern verwendet. Die OMV hat eine eigene Pipeline eingerichtet, die den Flughafen Wien-Schwechat direkt von der Raffinerie mit Kerosin der Sorte Jet-A1 versorgt.

Dieseltreibstoff (Heizöl extraleicht)

Der Treibstoff für Dieselmotoren ist identisch mit dem extraleichten Heizöl (HEL). Den Unterschied macht lediglich die steuerliche Belastung aus. Um Missbrauch zu verhindern, werden Dieselöl und HEL unterschiedlich gefärbt (einer der Farbstoffe des HEL kann nur sehr schwer entfernt werden).

Der Dieselmotor benötigt keine Zündkerze. Das Dieselöl-Luft-Gemisch wird durch die durch die Kompression erzeugte Wärme gezündet. Die von **Robert Bosch** 1927 entwickelte **Einspritzpumpe** sorgte mit dem im Vergleich zum Ottomotor besseren Wirkungsgrad für die große Verbreitung des **1892 von Rudolf Diesel erfundenen Dieselmotors**. Ein Nachteil des Dieselmotors ist, dass sich seine Abgase deutlich weniger gut entgiften lassen als die des Ottomotors. An der Oberfläche von Rußteilchen (Partikeln) im Abgas von Dieselmotoren haften sehr viele problematische Substanzen (u. a. krebserregende Stoffe). Partikelfilter bringen nur teilweise Abhilfe.



RUDOLF DIESEL, 1858 BIS 1913

Dieseltreibstoff enthält überwiegend Moleküle mit 9 bis 22 C-Atomen. Die **Cetanzahl CZ** gibt die **Zündwilligkeit von Dieseltreibstoff** an. Kohlenwasserstoffe aus kürzeren und geradkettigen Molekülen sind leichter entzündbar als verzweigte und ringförmige Verbindungen. Die Cetanzahl wird über die aromatische Verbindung 1-Methylnaphthalen ($\text{CZ} = 0$) und Hexadecan ($\text{CZ} = 100$) definiert. Bei zu niedriger Cetanzahl werden Zündungen verzögert oder verhindert (der Motor „nagelt“). Übliche Cetanzahlen liegen bei 50 bis 60. Verbindungen aus zu großen Molekülen verringern nicht nur die CZ, sondern bergen auch die Gefahr, dass der Treibstoff bei tiefen Temperaturen in der Einspritzpumpe stockt.



Dieselmotoren sind aufgrund des höheren Drucks bei der Verdichtung schwerer als Benzinmotoren

Schmieröle

Schmieröle verringern die Reibung zwischen festen Flächen. Der Schmierfilm zwischen Zylinder und Kolben soll auch bei schneller Bewegung und hohen Temperaturen nicht reißen. Schmieröle werden in **Viskositätsklassen (SAE-Klassen)** eingeteilt. Damit wird die Zähflüssigkeit des Öls angeben. Die gängigen Mehrbereichsöle haben eine dünnflüssige Basis. **Zusätze (Additive)** sorgen dafür, dass die Viskosität bei höheren Temperaturen nur wenig abnimmt. Daher sind derartige Motor- bzw. Getriebeöle für den Sommer- und auch für den Winterbetrieb geeignet. Die **Wintertauglichkeit** wird durch den **Zusatz „W“** gekennzeichnet.

Die Kennzeichnung eines Schmieröls mit „SAE 5W-30“ bedeutet, dass es sich um ein Mehrbereichsöl handelt, das im Winter dünnflüssig ist („5W“) und im Sommer durch Additive die Viskosität bis zur Kennzahl „30“ steigt.

Mit Additiven versehene Öle heißen auch „**legierte**“ oder **HD-Öle („heavy duty“)**. Synthetische Öle bestehen im Gegensatz zu den Mineralölen aus der Vakuumdestillation aus einheitlichen Molekülsorten. Man erzeugt sie aus Synthesegas (Gemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff). Sie werden durch Zusatz von Estern und Siliconölen exakt auf die gewünschten Eigenschaften eingestellt. Sie sind deutlich teurer, aber sie verlängern die Ölwechselintervalle.



Schmieröl (Motoröl)



Asphaltiermaschine

! Der Bitumenanteil von Asphalt wird oft überschätzt. Er beträgt nur 4 bis 5 %.



Ziele erreicht? – „Fossile Rohstoffe“

- 1.01** Begründen Sie die unterschiedlichen Heizwerte von Braunkohle und Steinkohle.
- 1.02** Geben Sie die Summenformel von Hexadecan an. Welche Bedeutung hat die Verbindung für die Beschreibung eines Treibstoffs?
- 1.03** Stellen Sie mithilfe des Fließbildschemas die Verfahrensschritte vom Rohöl bis zu einem Benzin mit ROZ 98 bzw. bis zu einem Dieseltreibstoff dar.
- 1.04** Welche Testmischung dient in einem ROZ-Testmotor dem Vergleich für einen Treibstoff mit ROZ 98?
- 1.05** Wie kann man die Octanzahl für Flugbenzin auf über 100 anheben?

- 1.06** Recherchieren Sie, wie viel Tonnen Braunkohle, Steinkohle, Erdöl und wie viel Kubikmeter Erdgas jährlich weltweit gefördert werden.
- 1.07** 2,2,4-Trimethylpentan zeigt eine Verbrennungswärme von 5 461 kJ/mol. Wie viel Wärme wird frei, wenn ein Liter ($\rho = 0,69 \text{ kg/dm}^3$) verbrannt wird?
- 1.08** Welche Vorteile bringen der Autoabgaskatalysator (siehe NAWI I/II, Kap. C, 3.2 und Kap. E, 5.2) bzw. der Partikelfilter? Wie funktionieren sie?

2 Petrochemie – Kohlenwasserstoffe

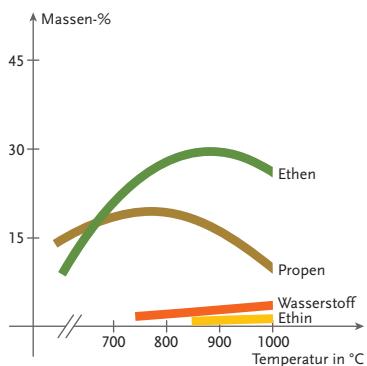
Bis in die 50er-Jahre des vorigen Jahrhunderts bildete Steinkohlenteer – ein Produkt, das neben Koks beim Erhitzen von Kohle unter Luftausschluss entsteht – die Basis der organischen chemischen Industrie. Derzeit werden fast alle organischen Stoffe aus Erdöl und Erdgas produziert. Der Schlüsselvorgang zur Erzeugung der Rohstoffe ist das Cracken.



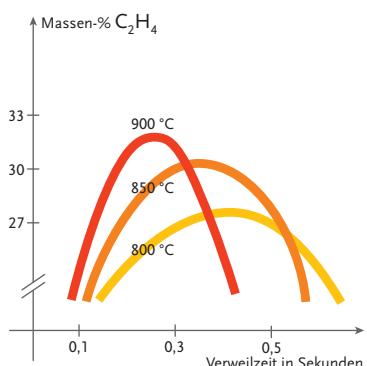
Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

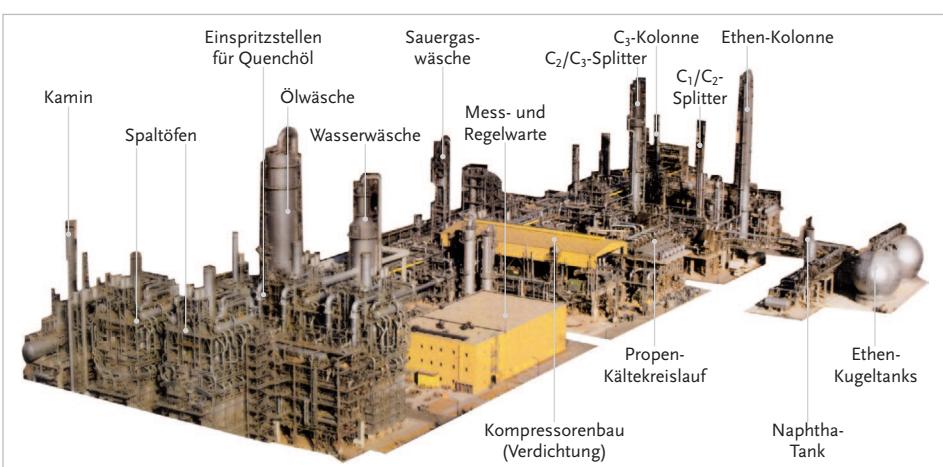
- die **technische Bedeutung der Crackprozesse** erkennen;
- erklären, welche Wege zu Treibstoffen, Kunststoffen, Pharmazeutika, Sprengstoffen, Farbstoffen und Reinigungsmitteln führen;
- die **Vernetzung von anorganischer und organischer Chemie** nachvollziehen.



Einfluss der Cracktemperatur auf die Spaltgaszusammensetzung



Einfluss der Cracktemperatur und der Verweilzeit im Spaltreaktor auf die Ethenausbeute



Steamcracker der BASF (produziert 1 Million t Ethen pro Jahr)

Typische Zusammensetzung der beim Steamcracken erhaltenen wichtigsten **Spaltprodukte** (Angabe in Massenprozent, Hauptverwendungen):

| | |
|---------------------|---------------------------------------|
| 1 % Wasserstoff | Hydrierungen |
| 15 % Methan | Beheizen des Steamcrackers |
| 24 % Ethen | Kunststoffe, Ethanol |
| 5 % Ethan | Umwandlung in Ethen |
| 15 % Propen | Kunststoffe, Propanole |
| 5 % Butadien | Kautschuk (Gummi) |
| 5 % Butene | Kunststoffe |
| 25 % Pyrolysebenzin | Benzin, Lösungsmittel, Aromatenchemie |

Durch Wahl der **Reaktionsbedingungen** (Cracktemperatur, Verweilzeit) können die Prozentsätze der Ausbeuten in gewissen Grenzen variiert werden. **Je höher man die Temperatur wählt, desto kleinere Moleküle entstehen.**

Beispielsweise steuert man das Verhältnis Ethen C_2H_4 zu Propen C_3H_6 durch Veränderung der Temperatur bzw. der Verweilzeit im Spaltreaktor des Crackers. Unmittelbar nach dem Erhitzen muss das Gasgemisch abgekühlt (gequencht) werden, damit die Crackprodukte nicht miteinander reagieren.

Bei **aliphatischen Kohlenwasserstoffen** unterscheidet man:

Alkane = Kohlenwasserstoffe mit durchwegs Einfachbindungen zwischen den C-Atomen, gesättigt, Name endet auf „-an“, allgemeine Summenformel C_nH_{2n+2}

Alkene = ungesättigte Kohlenwasserstoffe mit einer Doppelbindung zwischen zwei C-Atomen (ansonsten Einfachbindungen), Name endet auf „-en“, allgemeine Summenformel C_nH_{2n}

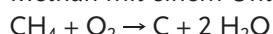
Alkine = ungesättigte Kohlenwasserstoffe mit einer Dreifachbindung zwischen zwei C-Atomen, Name endet auf „-in“, allgemeine Summenformel C_nH_{2n-2}

Nachfolgend werden die wichtigsten Kohlenwasserstoffe besprochen.

2.1 Methan

Methan ist der Hauptbestandteil von Erdgas und fällt außerdem beim Cracken an. In erster Linie wird es als Heizgas verwendet, aber es bildet in der Petrochemie auch die Grundlage vieler Produkte.

Ruß ist eine feine Form von Grafit. Die Herstellung erfolgt durch Verbrennen von Methan mit einem Unterschuss an Luft.



Verwendung von Ruß: schwarzes Farbpigment, Füllstoff für Gummi.

Ethin (Acetylen) C_2H_2 wird mit einem Katalysator bei hohen Temperaturen hergestellt:



Aufgrund der Dreifachbindung $CH \equiv CH$ (zwei π -Bindungen!) ist Ethin sehr reaktionsfähig. Es verbrennt mit sehr heißer und heller Flamme. Ethin-Luft-Gemische sind hochexplosiv. Ethin ist das übliche Schweißgas (kastanienbraune Kennzeichnung der Druckgasflaschen).

Chloriertes Methan

Durch S_R -Reaktionen entstehen aus Methan und Chlorgas die Lösungsmittel Chloroform, Dichlormethan, Trichlormethan (Chloroform) und Tetrachlormethan.



Warum wird in der Tabelle der Produkte des Steamcrackers bei Propanol und Buten die Mehrzahl verwendet?



Carbidlampen waren als Grubenlampen in Verwendung



Streuen Sie auf eine Platte ein wenig Calciumcarbid, besprühen Sie es mit Wasser und zünden Sie die Gasblasen mit einem brennenden Span an.



Dissousgas



S_R (Methanchlorierung)
siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.4.

2.2 Ethen

Das Crackgas Ethen C_2H_4 ist Ausgangspunkt für eine Vielzahl von Synthesen.

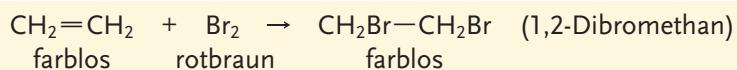
Die Doppelbindung besteht nicht aus zwei gleichwertigen Bindungen: Um die komplette Doppelbindung zu spalten, sind 614 kJ/mol notwendig. Für die Spaltung der Einfachbindung (σ -Bindung) des Ethan sind es 348 kJ/mol. Daraus ergibt sich, dass die π -Bindung schwächer ist, denn für ihre Spaltung sind nur $614 - 348 = 266$ kJ/mol notwendig. Alkene sind daher reaktionsfreudiger als Alkane.

 A_E und A_R siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.4.

 Vergleichen Sie Cyclohexan und Cyclohexen, indem Sie kleine Proben mit wässriger Bromlösung durchschütteln.

Als ungesättigte Verbindung bevorzugt Ethen Additionsreaktionen. Üblicherweise erfolgen Additionen nach einem A_E -Mechanismus. Polymerisationen zu Kunststoffen laufen meist nach einem A_R -Mechanismus ab.

Der Nachweis von Doppelbindungen (besser gesagt von π -Bindungen) erfolgt meist durch Addition von Brom unter milden Bedingungen. Die Farbe des Broms verschwindet dabei.

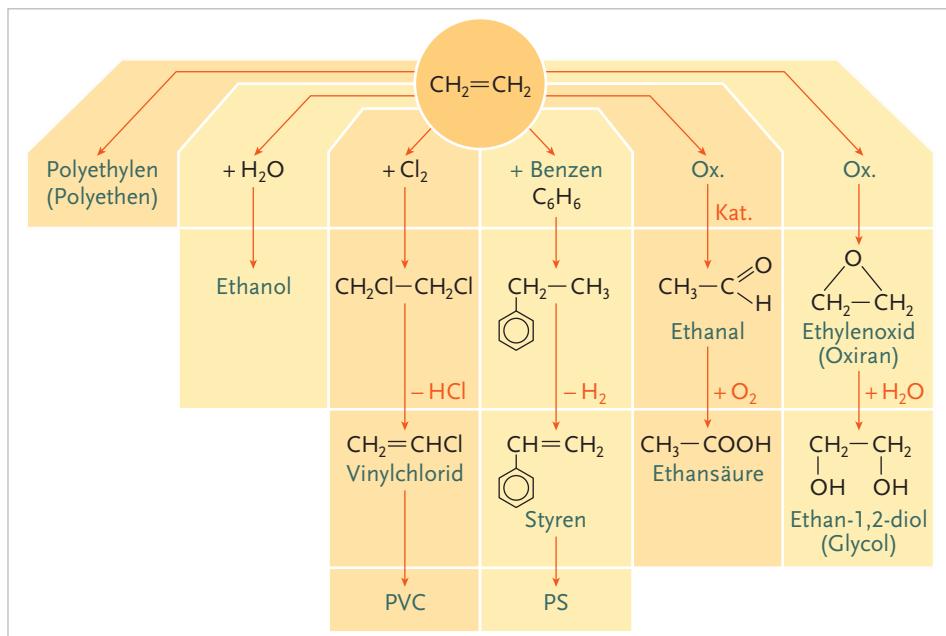


Einen kleinen Teil der aus Ethen erzeugten Zwischen- und Endprodukte zeigt der nachstehende „Ethenbaum“:

 Kunststoffe siehe Kap. A, 8.

 Nomenklatur siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.2; funktionelle Gruppen NAWI I/II, Kap. C, 4.3.

 Wie lautet der IUPAC-Name von Vinylchlorid?



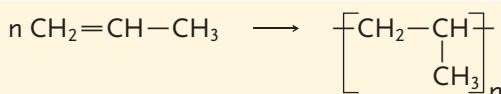
Von Ethen leiten sich drei der vier wichtigsten Kunststoffe ab: PE = Polyethylen (Polyethen), PVC = Polychlorethen (Polyvinylchlorid), PS = Polystyren (Polystyrol). Der vierte wichtige Kunststoff ist Polypropen. Ethylenoxid ist ein Vorprodukt für Epoxidharze. Glycol ist ein Frostschutzmittel.



Gegenstände aus Polypropen

2.3 Propen

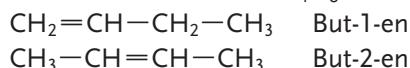
Der „Propenbaum“ ist dem „Ethenbaum“ sehr ähnlich, d. h., die Produkte sind analog. Allerdings ist bei Propen die Vielfalt größer, weil Gruppen an die 1- oder 2-Position addieren können. Das wichtigste Produkt ist **Polypropen (PP)**, der leichteste Kunststoff: Man erhält PP durch Polymerisation von Propen:



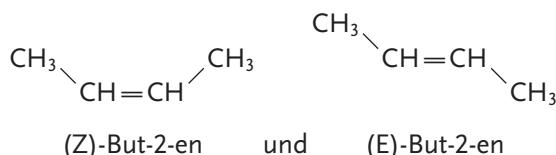
Addition von Wasser an Propen liefert das Isomerengemisch Propan-1-ol und Propan-2-ol. Durch Wahl der Reaktionsbedingungen kann das Isomerenverhältnis beeinflusst werden. Man erhält überwiegend Propan-2-ol, das gegen Vereisung eingesetzt wird und zur Produktion von Propanon (Aceton) dient.

2.4 Buten

Für die Summenformel C_4H_8 sind einige Isomere denkbar. Zwei davon sind:



Allerdings existieren von But-2-en wiederum zwei Varianten, die sich ergeben, weil die π -Bindung eine freie Drehbarkeit um die Bindungsachse verhindert:



Butene dienen der Herstellung von Alkoholen, Antiklopfmitteln und Kunststoffen.

2.5 Diene – Gummi

Diene (Alkadiene) sind ungesättigte Kohlenwasserstoffe mit zwei Doppelbindungen zwischen C-Atomen. Die allgemeine Summenformel lautet $\text{C}_n\text{H}_{2n-2}$.

Das wichtigste Dien ist das **Buta-1,3-dien** $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$. Es entsteht beim Cracken. Buta-1,3-dien ist das einfachste konjugierte Dien. Der Begriff „konjugiert“ bedeutet, dass sich zwischen zwei Doppelbindungen formal genau eine Einfachbindung befindet. Im Unterschied dazu sind **kumulierte Doppelbindungen** benachbart. **Isolierte Doppelbindungen** sind durch mehr als eine Einfachbindung getrennt.

Dass die Formelschreibweise nicht exakt der Wirklichkeit entspricht, erkennt man aus dem Orbitalmodell. Jedes C-Atom des Buta-1,3-dien ist sp^2 -hybridisiert, d. h., es hat für die vier Valenzelektronen außer je drei sp^2 -Hybridorbitalen je ein p_z -Orbital. Die p_z -Orbitale ermöglichen durch Überlappungen einen durchgehenden Mehrfachbindungscharakter. Insgesamt fünf Elektronenpaare verteilen sich auf drei Bindungsstellen, womit drei 5/3-Bindungen entstehen. Statt der in der Formel ausgedrückten Reihenfolge Doppel-, Einfach-, Doppelbindung existiert daher durchgehend eine (formelmäßig schlecht anschreibbare) Bindungsordnung BO von 1,67. Es liegt **Mesomerie** vor.

Das in der Natur von vielen Pflanzen (besonders vom brasilianischen Gummibaum) produzierte Isopren $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)-\text{CH}=\text{CH}_2$ polymerisiert leicht. Weil durch die Mesomerie der Mehrfachbindungscharakter vom ersten bis zum letzten Kohlenstoffatom reicht, geht diese 1,4-Polymerisation von den Molekülen aus.



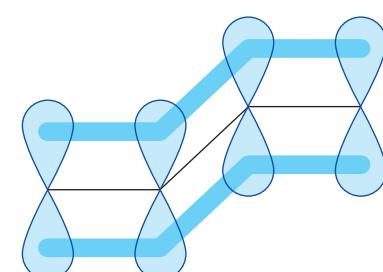
Welche weiteren Isomere sind für C_4H_8 vorstellbar?



Starre π -Bindung siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.1.

Die Bezeichnungen „Z“ und „E“ leiten sich von „zusammen“ bzw. „entgegen“ ab.

$= - =$ konjugiert
 $= =$ kumuliert
 $= =$ isoliert



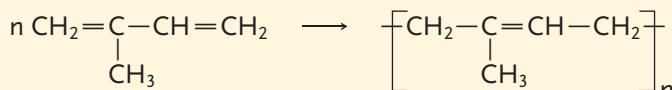
Orbitalmodell von Buta-1,3-dien



Mesomerie siehe NAWI I/II, Kap. C, 2.4.3.



Wie lautet der IUPAC-Name von Isopren?



Der Name **Kautschuk** leitet sich vom indianischen „cahutschu“ (Holzträne) ab.

Der US-Amerikaner **Charles Goodyear** fand 1839 durch Zufall die **Vulkanisation**. Der Engländer **Henry Wickham** schmuggelte **Samen des Gummibaums** 1876 aus Brasilien, worauf die Plantagen in der damaligen britischen Kolonie Malaysia entstanden. Der Schotte **John Dunlop** erfand 1888 den **luftgefüllten Reifen**.

 Reifen werden **nicht** aus **Hart-**, sondern aus **Weichgummi** hergestellt.

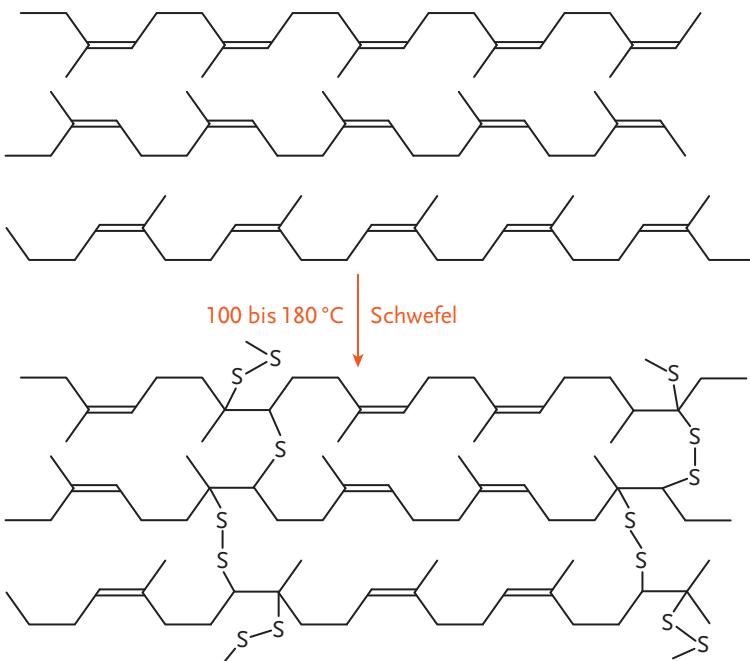


Querschnitt eines Winterreifens

 Autoreifen werden mit Fasern verstärkt: Meist mit Stahl und Cellulose, aber auch mit Polyamid oder Polyester.

Das Polymerisat heißt **Kautschuk**. Durch die an jedem vierten Kohlenstoffatom wiederkehrende Doppelbindung ist Kautschuk reaktionsfähig.

Bei der **Vulkanisation** werden die Ketten der Kautschukmoleküle unter Aufreißen von π -Bindungen mit Schwefel quervernetzt: Man erhält **Gummi**.



Die Schwefelbrücken zwischen den ehemaligen fadenförmigen Molekülen des Kautschuks bestehen aus ein oder meist zwei Schwefelatomen. Schwache Vernetzung (1 bis 3 % Schwefel) liefert Weichgummi, starke Vernetzung (etwa 30 % Schwefel) Hartgummi.

Weichgummi zählt zu den Elastomeren. Gummi wird mit der Zeit brüchig: Er verprüdet, weil die noch vorhandenen Doppelbindungen mit dem Sauerstoff der Luft reagieren. Um Gummi unempfindlicher gegen UV-Licht sowie hitze-, kälte- und alterungsbeständiger sowie ölfester zu machen, wird er mit Antioxidantien versetzt und mit verschiedenen Kunststoffen angereichert. Als Füllstoff dient Ruß, womit auch eine UV-Stabilisierung erzielt wird.

Seit dem Ersten Weltkrieg gibt es auch **synthetische Kautschuksorten**. Die bekannte Gummiart „Buna S“ erhielt diese Bezeichnung, weil man von Buta-1,3-dien ausgeht, Polystyren als Kunststoff eingefügt ist und Natrium als Katalysator bei der Herstellung dient. Ein üblicher Autoreifen wird mehrheitlich aus synthetischem, aber auch aus Naturkautschuk produziert. Winterreifen haben nicht nur ein tieferes Profil, sondern auch eine weichere Gummimischung.

2.6 Aromaten

Einige bekannte Verbindungen, deren Moleküle einen stark ungesättigten Ring enthalten (z. B. Vanillin), riechen sehr angenehm. Die Chemie definiert „**aromatisch**“ heute aber nicht als wohlriechend, sondern es ist dies eine Bezeichnung für **mesomeriestabilisierte Ringsysteme**.

Das Pyrolysebenzin des Steamcrackers enthält 30 % Benzen, 15 % Toluol (Methylbenzen, Toluol) und 20 % C₈-Aromaten. Unter C₈-Aromaten versteht man Ethylbenzen und die drei isomeren Xylene (Dimethylbenzen, Xylool). Die genannten Anteile nennt man **BTX-Fraktion**. Diese einfachen Aromaten sind bedeutende Syntheserohstoffe.

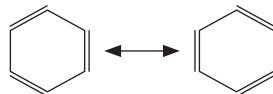
Aromat = mesomeriestabilisiertes Ringsystem (meist mit der Bindungsordnung BO = 1,5).

Benzen

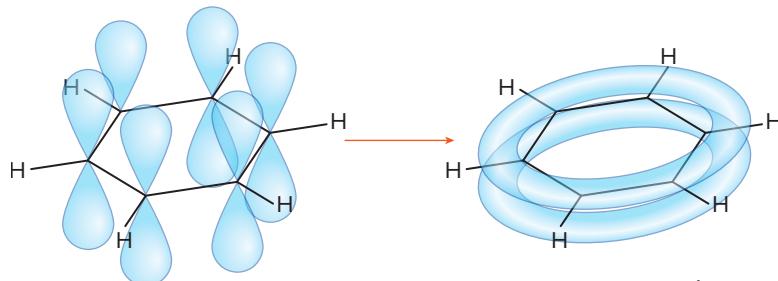
Benzen (alter Name: Benzol) ist die wichtigste aromatische Verbindung. Für seine Summenformel C₆H₆ könnte man 157 Isomere formulieren. Aber von diesen ist nur das Benzen eine stabile Substanz.

Benzen ist eine farblose, benzinähnlich riechende, giftige und krebsfördernde Flüssigkeit (Siedepunkt $t_b = 80^\circ\text{C}$, $\rho = 0,88 \text{ g/cm}^3$). Obwohl Benzen gesundheitlich bedenklich ist, darf in Benzin 1 % Benzen enthalten sein. Hingegen sind mehr als 0,2 % Benzen als Lösungsmittel in Lacken verboten.

Die Entdeckung der **Benzenformel** wird dem deutschen Chemiker **August Kekulé** zugeschrieben. Tatsächlich gebührt aber dem Österreicher **Joseph Loschmidt** die Ehre, die Struktur des Benzols 1861 als Erster erkannt zu haben.



Kekulé nahm an, dass die Doppelbindungen oszillieren (springen). Heute ist man der Ansicht, dass nach dem Orbitalmodell jedes C-Atom sp²-hybridisiert ist. Die an jedem C-Atom vorhandenen p_z-Orbitale überlappen so, dass oberhalb und unterhalb der Ringebene ringförmige π -Elektronenwolken entstehen. Die experimentelle Bestätigung liefert die Messung der Elektronendichte: Sie ergibt, dass sich nicht Doppel- und Einfachbindungen abwechseln, sondern dass die von der Molekülorbital-Theorie vorhergesagten durchgehenden Eineinhalfbachbindungen vorliegen. Benzen ist mesomer.



Seit dieser Erkenntnis verwendet man meist folgende Formel:



Einen weiteren Beweis liefert die Vermessung der Bindungslängen:

In Alkanen beträgt die Bindungslänge zwischen zwei C-Atomen 0,154 nm. In Alkenen beträgt die Bindungslänge zwischen zwei C-Atomen einer Doppelbindung 0,134 nm. Im Benzen sind alle Bindungen zwischen den C-Atomen mit 0,139 nm gleich lang.



Benzen ist giftig. Viele Verbindungen, die den Benzenring enthalten, sind aber ungiftig, zum Teil sogar lebensnotwendig.



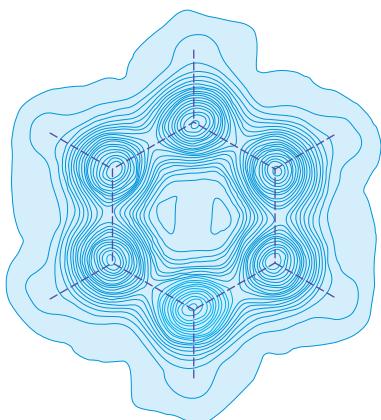
JOSEPH LOSCHMIDT, 1821
BIS 1895, ÖSTERREICHISCHER
PHYSIKER UND CHEMIKER



Siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.1.



Nicht vergessen: An jedem C-Atom hängt ein H-Atom.



Elektronendichtevertteilung in Benzen



Für das Entstehen eines Aromaten bestehen auch quantenmechanische Vorgaben.

Allgemein lässt sich als Voraussetzung für den aromatischen Zustand festhalten: Es muss sich um ein (halbwegs) ebenes Ringsystem handeln, in dem durchgehend konjugierte Doppelbindungen vorliegen. Die Konjugation sorgt dafür, dass an jedem Ringglied eine p_z -Hantel für Überlappungen oberhalb und unterhalb der Bindungsebene zur Verfügung steht.

Aromaten sind im Vergleich zu anderen ungesättigten Verbindungen stabil. Dass das Benzen deutlich stabiler ist als ein hypothetisches Cyclohexa-1,3,5-trien zeigt folgende Modellrechnung:

Die Addition von 1 mol H_2 an eine Doppelbindung liefert 120 kJ. Daher müsste die Addition von 3 mol H_2 an Cyclohexatrien 360 kJ erbringen. Tatsächlich erhält man bei Addition von 3 mol H_2 an 1 mol Benzen 209 kJ. Der Differenzbetrag von 151 kJ/mol wird als **Mesomerieenergie** bezeichnet.

Damit wird quantitativ angegeben, um wie viel das Benzen stabiler ist als eine Verbindung mit drei echten Doppelbindungen.

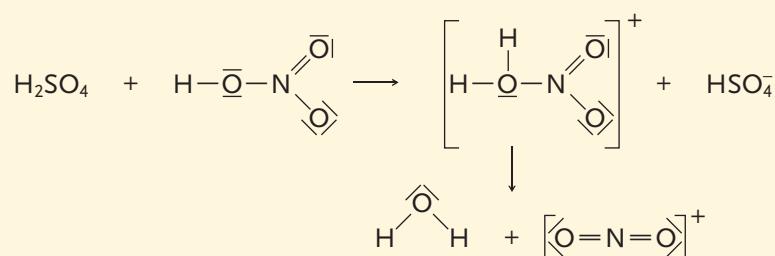
Weiters bestimmt die im Vergleich zu den aliphatischen Verbindungen (mit dominierenden Einfachbindungen) erhöhte Elektronendichte das chemische Verhalten der Aromaten.

Wegen der Stabilität der Aromaten scheiden Additionsreaktionen, die zwangsläufig den aromatischen Zustand aufheben, weitgehend aus. Aufgrund der vor allem an der Außenseite erhöhten Elektronendichte werden elektrophile (positive) Angreifer bevorzugt.

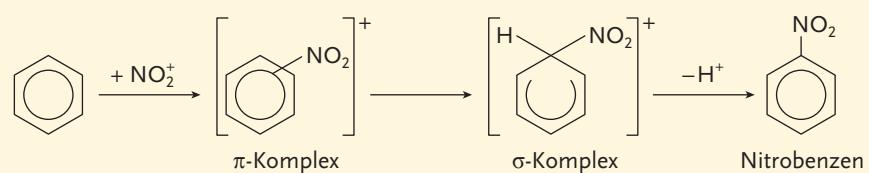
Der bevorzugte Reaktionsmechanismus der Aromaten ist die **S_E -Reaktion**.

Elektrophile Substitution (S_E) am Beispiel der Nitrierung von Benzen:

1. Erzeugung des positiven Angreifers mithilfe von Schwefelsäure als Katalysator: Die Schwefelsäure als stärkere Säure protoniert die Salpetersäure, die in der Folge in Wasser und den Angreifer NO_2^+ zerfällt.

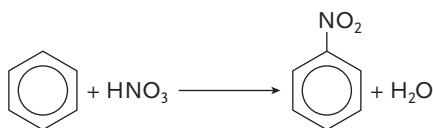


2. Angriff des elektrophilen NO_2^+ am Benzen: Der Angreifer „beißt“ zunächst am π -Elektronenring des Benzols an und bildet den π -Komplex. Dieser wandelt sich in den σ -Komplex um, bei dem sich der Angreifer für ein bestimmtes C-Atom entschieden hat. Dieses C-Atom hat nun vier Bindungspartner, ist daher sp^3 -hybridisiert, womit der Aromat vorübergehend nicht existiert. Schließlich wird ein Proton abgespalten, wodurch der stabile Aromat wiederhergestellt wird.



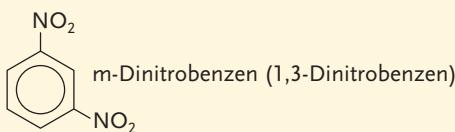
3. Das Proton kehrt zum Hydrogensulfation zurück (womit der Katalysator Schwefelsäure wiederhergestellt ist).

Die **Gesamtreaktion** kann daher kurz angeschrieben werden:

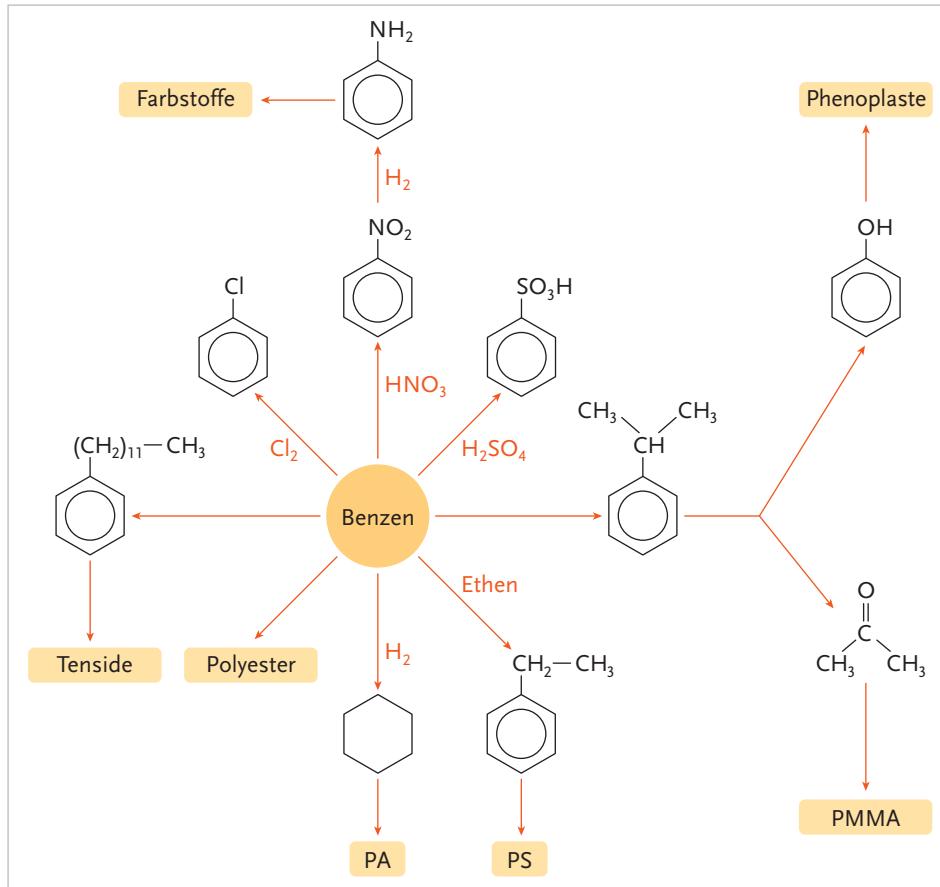


Für weiterführende Synthesen ist zu beachten, dass der Erstsubstituent den zweiteintretenden Substituenten in bestimmte Positionen lenkt. Methyl-, Amino- und Hydroxygruppen dirigieren bevorzugt in die Ortho- oder Paraposition. Nitro- und Sulfonsäuregruppen lenken bevorzugt in die Metaposition.

Beispiel: Die nochmalige Nitrierung von Nitrobenzen führt zu m-Dinitrobenzen (1,3-Dinitrobenzen).



Die wichtigsten vom Benzen ausgehenden **Synthesewege** („**Benzenbaum**“):



Das Schema zeigt vom Benzen ausgehend fast durchgehend S_E^- -Reaktionen. Eine Ausnahme ist die Hydrierung: Im Zuge von drei Additionen über die Zwischenstufen Cyclohexa-1,3-dien (weniger stabil als Benzen) und Cyclohexen (ebenfalls weniger stabil als Benzen) erhält man das stabile Cyclohexan.

Spezielle Positionsbezeichnungen am Benzen:

- 1,2 ortho (o)
- 1,3 meta (m)
- 1,4 para (p)



Die dirigierende Wirkung von Erstsubstituenten wird auf der CD begründet.



Versuchen Sie, allen im Schema aufgezeichneten Formeln Namen zuzuordnen (für Benzenol ist die Bezeichnung Phenol üblich).



Wie lauten die Gleichungen für die vollständige Hydrierung von Benzen?

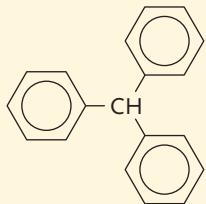


Die für Aromaten verwendete Bezeichnung „Kern“ hat nichts mit dem Atomkern zu tun.

2.7 Mehrkernige Aromaten

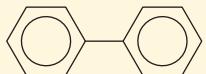
Der aromatische Ring wird auch als „Kern“ bezeichnet. Mehrkernige Verbindungen findet man im Steinkohlenteer, im Erdöl und vor allem in Crackgemischen.

Triphenylmethan (ein Grundgerüst für Farbstoffe) ist dreikernig.



„Phenyl“ ist (historisch bedingt) die Bezeichnung für den Benzenrest C_6H_5- , während „Benzyl“ den Rest $C_6H_5-CH_2-$ bezeichnet. Eine systematische Nomenklatur der mehrkernigen Aromaten hat sich bis jetzt noch nicht durchgesetzt.

Biphenyl ist zweikernig.



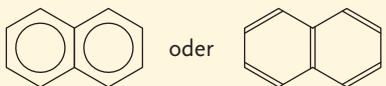
Das Wort „**kondensiert**“ hat unterschiedliche Bedeutungen:
a) verflüssigter Dampf;
b) verknüpft unter Abspaltung kleiner Moleküle;
c) über mehrere gemeinsame Kohlenstoffatome verbundene Ringe.



Wie lautet die Summenformel von Naphthalen?

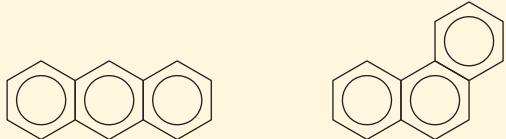
„Kondensierte Ringsysteme“: Miteinander verbundene Ringe besitzen mehrere gemeinsame Kohlenstoffatome.

Naphthalen (alt: Naphthalin) ist ein zweikerniges, kondensiertes System.



Wenn drei Ringe aneinander kondensiert werden, gibt es zwei Möglichkeiten:

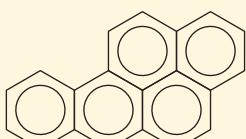
Anthracen und Phenanthren



Naphthalen und Anthracen sind Grundgerüste der Farbstoffindustrie.

Höher kondensierte Aromaten kommen in Tabakrauch und Dieselrauß vor. Sie sind stark krebserregende Substanzen.

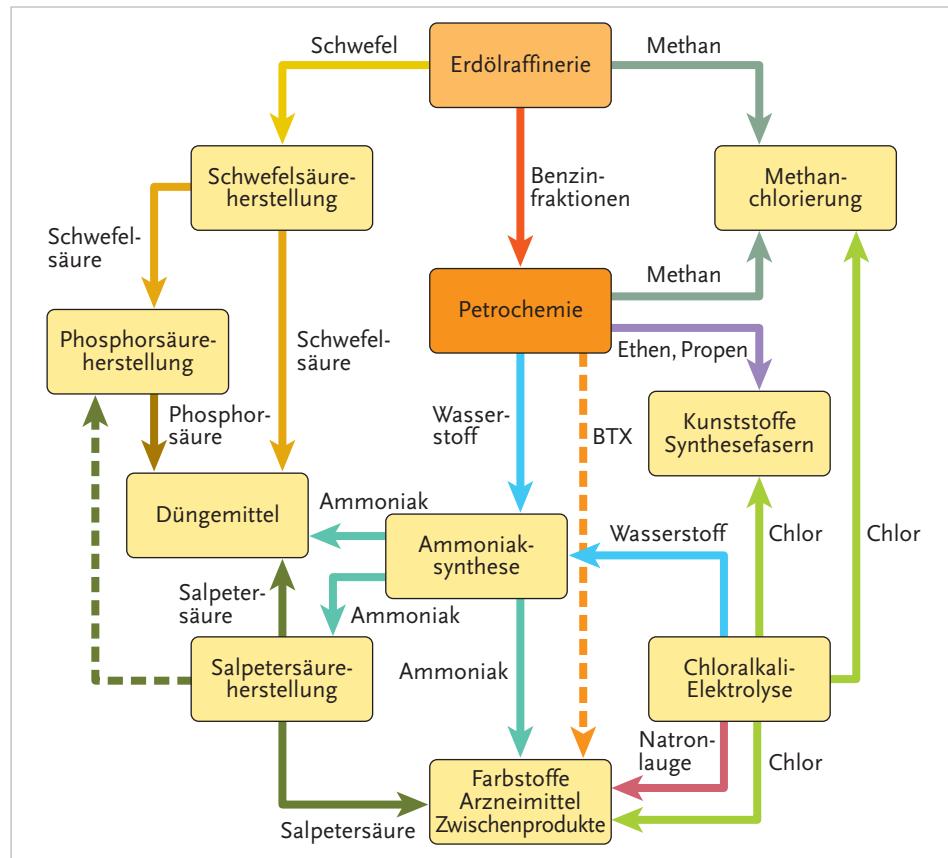
Das bekannteste Beispiel dafür ist die Verbindung Benzpyren.



2.8 Verbundsystem in der chemischen Industrie

Die Petrochemie nimmt in der chemischen Industrie eine zentrale Stellung ein.

Schema der **wichtigsten Verknüpfungen der Petrochemie mit anderen Bereichen der Chemie (Verbundwirtschaft der chemischen Industrie)**:



Die großen Chemiekonzerne haben viele der gezeigten Vorgänge auf einem Industriegelände konzentriert. Der Transport von Stoffen zwischen Betriebsstätten innerhalb einer Firma bzw. zwischen den Firmen wird nach Möglichkeit über Rohrleitungen durchgeführt. Zum Beispiel gibt es quer durch Deutschland ein Rohrleitungsnetz zur Verteilung von Ethen.



Versuchen Sie (auch mit Hilfe von NAWI I/II), möglichst viele Gleichungen zum Verbundschema anzuschreiben. Manche Wege sind dabei mehrstufig. Den unteren Kasten mit Farbstoffen lassen Sie aus (er wird erst in Folge besprochen).



Das BASF-Stammwerk in Ludwigshafen ist mit 10 km² das größte zusammenhängende Industriearreal Europas



Rohrleitungen sind typisch für die chemische Industrie



Ziele erreicht? – „Petrochemie – Kohlenwasserstoffe“

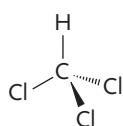
- 2.01** Bei welcher Verweilzeit im Spaltöfen des Steamcrackers bzw. bei welcher Temperatur erhält man eine möglichst gute Ausbeute an Ethen?
- 2.02** Schreiben Sie die Gleichung für die Reaktion von Methan mit Chlorgas an. Formulieren Sie dann die Gleichungen für weitere Chlorierungen des Chlormethans bis hin zum Tetrachlormethan (vier Gleichungen).
- 2.03** Formulieren Sie die Gleichungen für die Polymerisationen von Chlorethen (Vinylchlorid) bzw. von Styren (Styrol).
- 2.04** Geben Sie die Gleichung für die Verbrennung von Ethin an.
- 2.05** Formulieren Sie die Gleichungen für die zweistufige Herstellung von Ethin aus Kohle. Im ersten Schritt entsteht neben Calciumcarbid auch Kohlenstoffmonoxid, im zweiten Schritt ist das Nebenprodukt Calciumhydroxid.

- 2.06** Schreiben Sie die Gleichung für die Reaktion von Cyclohexen mit Brom an.
- 2.07** Geben Sie die Gleichung für die Erzeugung von Propan-2-ol an.
- 2.08** Geben Sie die Formel und den Namen für das einfachste kumulierte Dien an.
- 2.09** Schreiben Sie die Gleichungen an für:
a) 1,2-Addition von 1 mol Brom an 1 mol Buta-1,3-dien,
b) 1,4-Addition von 1 mol Brom an 1 mol Buta-1,3-dien.
- 2.10** Wie lautet die Summenformel von Ethylbenzen?
- 2.11** Geben Sie die Formeln und Namen für die isomeren Xylene an.
- 2.12** Die Verbindung existiert nicht. Warum?
- 
- 2.13** Warum enthält der Treibstoff Benzin das giftige Benzen?
- 2.14** Wie lautet die Summenformel von Phenanthren?
- 2.15** Wie viele Isomere gibt es für Nitronaphthalen? Wie viele für Chloranthracen? Wie viele für Dibromnaphthalen?
- 2.16** Geben Sie die Gleichung für die Reaktion von Benzen mit Schwefelsäure an.

3 Halogenkohlenwasserstoffe



Anwendung von Narkosegas



Strukturformel von Trichlormethan (Chloroform)



Diethylether siehe Kap. A, 4.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Eigenschaften und Verwendung** wichtiger Halogenkohlenwasserstoffe beschreiben;
- erklären, warum heute **Halogenkohlenwasserstoffe immer weniger zum Einsatz kommen**.

Kohlenwasserstoffe, deren Moleküle anstelle von Wasserstoffatomen Halogenatome (Fluor, Chlor, Brom oder Iod) enthalten, bezeichnet man als **Halogenkohlenwasserstoffe**. Diese Verbindungen wurden wegen ihrer positiven Eigenschaften vielfältig hergestellt und waren weit verbreitet. Ihre negativen Eigenschaften machten sie erst nach und nach zu Problemstoffen.

Eigenschaften von Halogenkohlenwasserstoffen

- Die meisten sind bei Raumtemperatur flüssig.
- Schwach polar, in Wasser nicht löslich (lipophil).
- Gute Lösungsmittel für organische Stoffe.
- Schwer bis gar nicht entflammbar.
- Sehr stabil, in der Natur schlecht abbaubar.
- Viele sind giftig (leberschädigend), manche krebserregend.
- Die meisten haben ein starkes Ozon zerstörendes Potenzial und fördern somit die Bildung des Ozonlochs.

Die Zwischen- und Endprodukte werden durch eine Halogenierung von Alkanen nach dem S_R -Mechanismus hergestellt.

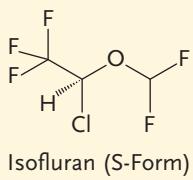
Lösungsmittel

Tetrachlorethen (Perchlorethylen, Per) ist ein ausgezeichnetes Fettlösemittel, das in der Metallindustrie und chemischen Textilreinigung angewandt wird. Das Pflegesymbol „P“ auf Textiletiketten weist auf die „Reinigung mit Perchlorethylen“ hin. **Trichlorethen** (Trichlorethylen, Tri) war ein weit verbreitetes Fleckputzmittel, das heute wegen seiner hohen Giftigkeit nicht mehr verwendet wird. Im Handel erhältliche Fleckputzmittel sind Germische aus n-Alkanen und Alkoholen, die eine ähnliche Fettlösekraft besitzen. Sie sind deutlich weniger schädlich, problematisch ist aber ihre leichte Entzündlichkeit.

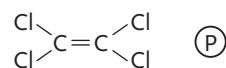
Narkosemittel

Zur Durchführung von schmerzfreien operativen Eingriffen werden heute leicht flüchtige **Flurane** in Kombination mit anderen Narkosemitteln eingesetzt. Sie dienen zur Aufrechterhaltung der Bewusstlosigkeit des Patienten, sind leicht verdampfbar, unbrennbar und haben nur geringe Nebenwirkungen. Flurane sind mit Fluor und Chlor halogenierte Ether.

Wichtige Flurane



S_R -Mechanismus siehe
NAWI I/II, Kap. C, 4.4.



Formel von Tetrachlorethen und Textilpflegesymbol



Etikette eines Fleckputzmittels



Welches chemische Strukturlement eines historischen Narkosmittels enthalten alle Flurane?

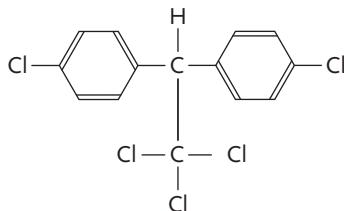
Pestizide

Zur Gruppe der Pestizide genannten Schädlingsbekämpfungsmittel gehören die Insektizide (gegen Insekten) und die Herbizide (gegen Unkräuter). Wichtige Vertreter der Pestizide waren in früheren Zeiten Chlorverbindungen von aromatischen Kohlenwasserstoffen.

So ermöglichte der Einsatz des hochwirksamen **Insektizids DDT** eine erfolgreiche Bekämpfung der durch die Anophelesmücke übertragenen Malariaerkrankung und anderer Tropenkrankheiten wie Gelbfieber und Denguefieber. Durch den breiten Einsatz und die hohe Umweltstabilität wird DDT über die Nahrungskette angereichert, sodass es in hohen Konzentrationen in fettreichen Nahrungsmitteln zu finden ist. DDT wurde daher in zahlreichen Ländern verboten. In der Folge nahmen und nehmen aber die Malariaerkrankungen wieder zu.



Anophelesmücke beim Stich



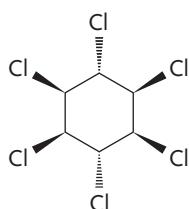
Dichlorodiphenyltrichlorethan DDT

TCDD siehe NAWI I/II,
Kap. C, 4.5.



Große Mengen an Dioxin wurden 1976 in Seveso (Norditalien) bei einem Chemieunfall in der Firma Icmesa freigesetzt. Viele Menschen erkrankten an Chlorakne. Bis heute leidet die Bevölkerung an den Spätfolgen.

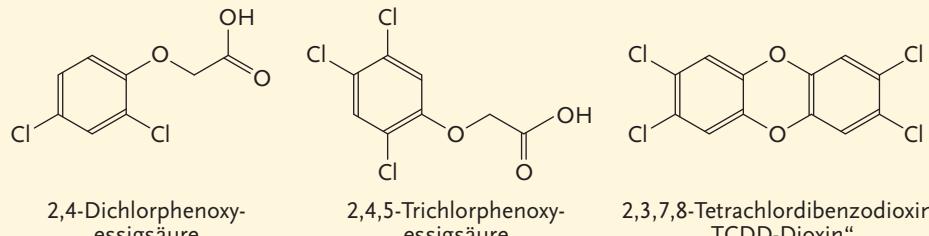
Integrierten Pflanzenschutz
siehe NAWI I/II, Kap. C, 7.

Lindan (γ -Hexachlorcyclohexan)

Halogenkohlenwasserstoffe
siehe Kap. C, 2.

Chlorhaltige Verbindungen der Phenoxyessigsäure sind äußerst wirksame **Herbizide**, die durch den Einsatz als Entlaubungsmittel im Vietnamkrieg („Agent Orange“) traurige Berühmtheit erlangten. Da sich produktionsbedingt Verunreinigungen mit dem Ultragift Dioxin nicht vermeiden lassen, sind diese Stoffe nicht mehr als Pflanzenschutzmittel zugelassen.

2,4-D, 2,4,5-T und Dioxin



Intensive landwirtschaftliche Nutzung, vor allem Monokulturen, erfordern den Einsatz von Pestiziden. Durch gezielter wirkende Stoffe und den Einsatz nicht chemischer Methoden können heute Pflanzenschutzverfahren mit geringer Pestizidverwendung eingesetzt werden (integrierter Pflanzenschutz).

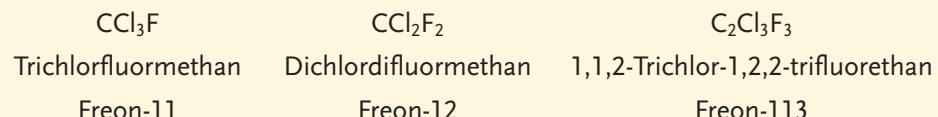
Das hochgiftige und umweltgefährdende Lindan (γ -Hexachlorcyclohexan) wurde früher nicht nur als Pflanzenschutzmittel, sondern vor allem in Holzschutzmitteln verwendet. Sein Einsatz ist heute verboten.

Fluorchlorkohlenwasserstoffe FCKW

FCKW sind eine Gruppe von Halogenkohlenwasserstoffen mit einem oder zwei C-Atomen, bei denen die H-Atome durch Fluor und Chlor teilweise bzw. vollständig ersetzt werden.

Gemäß IUPAC-Nomenklatur nennt man sie Chlorfluorkohlenwasserstoffe CFKW. Sind alle Wasserstoffatome durch Halogenatome ersetzt, so heißen sie Chlorfluorkohlenstoffe CFK. Bekannte Markennamen dieser Stoffe sind Freon, Frigen und Solkane.

Technisch wichtige CFK



FCKW eignen sich aufgrund ihrer Eigenschaften als Treibgase und Kältemittel und wurden zwischen 1960 und 1990 in enormen Mengen produziert und an die Umwelt abgegeben. Sie sind heute wegen ihres Ozon zerstörenden Potenzials weitgehend verboten.

Halone sind bromhaltige Halogenkohlenwasserstoffe, die in Feuerlöschnern und automatischen Löschanlagen verwendet wurden. Sie sind wegen ihrer Ozon zerstörenden Wirkung ebenfalls weitgehend verboten.



Ziele erreicht? – „Halogenkohlenwasserstoffe“

- 3.01** Erklären Sie die Funktionsweise eines Fleckputzmittels und erklären Sie, warum chlorfreie Produkte nicht nur Vorteile haben.
- 3.02** Woher kommt die Abkürzung DDT?
- 3.03** Warum findet man Rückstände von DDT und 2,4,5-T besonders in fettreichen Nahrungsmitteln?
- 3.04** Recherchieren Sie im Internet, woher die Bezeichnung „Agent Orange“ kommt und warum die US-Soldaten des Vietnamkrieges und die vietnamesische Bevölkerung bis heute an den Spätfolgen leiden.
- 3.05** Schreiben Sie die Strukturformeln von Freon-11, Freon-12 und Freon-113 an.

4 Alkohole – Phenole – Ether

Der Begriff Alkohol geht auf das arabische Wort „al-kuhl“ (auch „al kuhul“ bzw. „al ghawl“) zurück und bedeutete ursprünglich eine aus Antimonpulver zubereitete Augenschminke. Außerdem verwendete man den Begriff für etwas besonders Feines im Sinne eines Auszugs oder einer Essenz. Die Alchemisten übernahmen ihn für Produkte der Destillation. Reiner Alkohol (Ethanol) wurde erstmals etwa um 900 n. Chr. durch Destillation von Wein hergestellt. In der Alltagssprache bezeichnet man als Alkohol ausschließlich Ethanol oder Weingeist.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

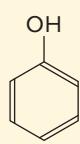
- **technisch wichtige Alkohole, Phenole und Ether** nennen und ihre Eigenschaften beschreiben;
- die **strukturellen Unterschiede dieser Stoffgruppen** und die daraus resultierenden Eigenschaften erklären;
- die Bedeutung der Alkohole, Phenole und Ether als **Grundstoffe der chemischen Industrie** bei der Herstellung von Massengütern beurteilen.

Gemeinsam ist diesen drei Substanzklassen das Sauerstoffatom. Bei den Alkoholen und Phenolen ist die funktionelle Gruppe die Hydroxygruppe (OH-Gruppe). Bei den Ethern bildet das Sauerstoffatom die Brücke zwischen zwei Kohlenstoffatomen. Etherbrücken zählen nicht zu den funktionellen Gruppen, leiten sich aber von den Alkoholen ab.

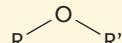
Überblick über die chemischen Strukturen



Alkohole



Phenole



Ether



Frauen beim Destillieren, aus „Georgica curiosa“, Lehrbuch über alle Aspekte der Haus- und Landwirtschaft, Wolf Helmhardt von Hohberg (1612–1688)



Alkotestgerät: Der Atemalkoholgehalt wird heute mit elektronischen Messgeräten bestimmt



Nomenklatur siehe NAWI I / II, Kap. C, 4.2, funktionelle Gruppen siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.3.

Alkohole

Leiten sich Alkohole von Alkanen ab, werden sie gemäß IUPAC als Alkanole bezeichnet. Sie werden nach zwei Gesichtspunkten eingeteilt: nach der Anzahl der im Molekül vorhandenen OH-Gruppen und nach der Stellung der OH-Gruppen.

Wertigkeit der Alkohole (Anzahl der OH-Gruppen)

| | | |
|------------------------|---|-------------------------|
| Einwertige Alkohole: | z. B. $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—OH}$ | Ethanol |
| Zweiwertige Alkohole: | z. B. $\text{HO—CH}_2\text{—CH}_2\text{—OH}$ | Ethan-1,2-diol |
| Dreiwertige Alkohole: | z. B. $\begin{array}{c} \text{OH} & \text{OH} & \text{OH} \\ & & \\ \text{H} & \text{C} & \text{C} & \text{C} & \text{H} \\ & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ | Propan-1,2,3-triol |
| Sechswertige Alkohole: | z. B. $\begin{array}{c} \text{OH} & \text{OH} & \text{OH} & \text{OH} & \text{OH} & \text{OH} \\ & & & & & \\ \text{H} & \text{C} & \text{C} & \text{C} & \text{C} & \text{C} & \text{H} \\ & & & & & \\ \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} & \text{H} \end{array}$ | Hexan-1,2,3,4,5,6-hexol |

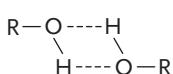
Stellung der OH-Gruppe

| Primärer Alkohol | Sekundärer Alkohol | Tertiärer Alkohol |
|---|--|---|
| $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—OH}$ | $\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3\text{—CH}—\text{CH}_3 \end{array}$ | $\begin{array}{c} \text{OH} \\ \\ \text{CH}_3\text{—C}—\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$ |
| Propan-1-ol | Propan-2-ol | Methyl-propan-2-ol |

Physikalische Eigenschaften



Dipol der OH-Gruppe

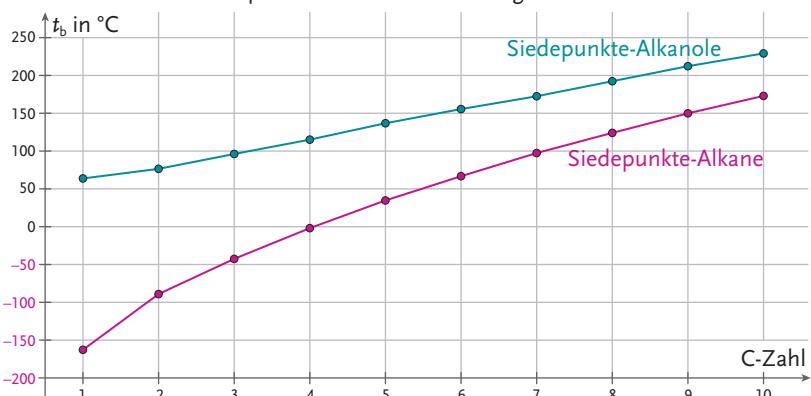


Wasserstoffbrücken zwischen zwei Alkoholmolekülen

Siedepunkte der Alkohole

- Deutlich höher als bei Alkanen mit annähernd gleicher Molmasse.
Z. B. Propan $M = 44 \text{ g/mol}$, $t_b = -45^\circ\text{C}$, Ethanol $M = 46 \text{ g/mol}$, $t_b = 78,3^\circ\text{C}$.
- Linearer Anstieg der Siedepunkte bei einwertigen Alkanolen.
- Bei höherer Wertigkeit steigt der Siedepunkt stark an.
Z. B. Propan-1-ol $t_b = 97,2^\circ\text{C}$, Propan-1,2,3-triol $t_b = 290^\circ\text{C}$ (unter Zersetzung).

Siedepunkte n-Alkane – einwertige Alkanole

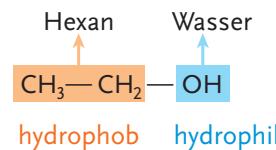


Die Krümmung der Siedepunktskurve der n-Alkane ist auf den Einfluss der unterschiedlich starken Van-der-Waals-Kräfte zwischen den Molekülen zurückzuführen (Kettenlänge!). Bei den einwertigen Alkanolen kommt ausgleichend der Effekt der Wasserstoffbrücken dazu, sodass die Kurve linear ist.

Das Alkoholmolekül besteht aus einem hydrophoben Kohlenwasserstoffrest R und der stark hydrophilen OH-Gruppe. Je nach Länge von R bzw. Anzahl der OH-Gruppen ist der Alkohol gut oder schlecht wasserlöslich.



Van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrücken siehe NAWI I/II, Kap. C, 2.4.5.



Ethanol $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ist sowohl mit Hexan als auch mit Wasser in jedem Verhältnis mischbar.

Wasserlöslichkeit der Alkohole

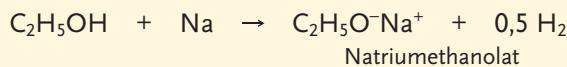
- Kurzkettige Alkohole sind gut wasserlöslich.
- Bei einwertigen Alkoholen nimmt die Wasserlöslichkeit ab Butan-1-ol mit zunehmender Kettenlänge stark ab.
- Mehrwertige Alkohole sind gut wasserlöslich.

Chemische Eigenschaften

Kurzkettige Alkohole wie Methanol und Ethanol sind leicht entzündlich und reagieren beim Verbrennen mit dem Luftsauerstoff zu CO_2 und H_2O . Auch Alkoholgemische mit Wasser sind ab einer Alkoholkonzentration von etwa 50 Vol.-% gut brennbar.

Alkohole reagieren in wässriger Lösung neutral. Es besteht eine kovalente Bindung zwischen dem C-Atom und der OH-Gruppe. Im Gegensatz dazu reagieren die ionischen Hydroxide basisch. Nur sehr starke Basen (z. B. metallisches Natrium) lösen bei Alkoholen eine Protolyse aus. Die Reaktionsprodukte nennt man Alkoholate.

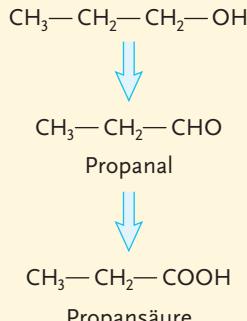
Bildung von Alkoholaten



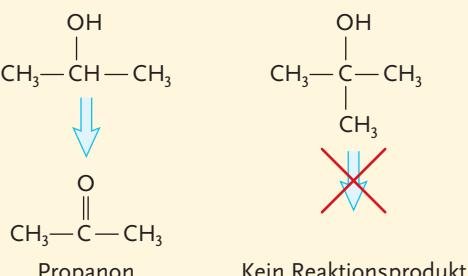
Bei der Oxidation von Alkoholen entscheidet die Stellung der OH-Gruppe über den Reaktionsverlauf:

Oxidation von Alkoholen

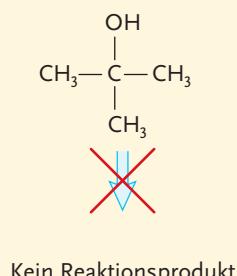
Primärer Alkohol



Sekundärer Alkohol



Tertiärer Alkohol



Aldehyde und Ketone siehe Kap. A, 5, Carbonsäuren siehe Kap. A, 6.

Primäre Alkohole können zum Aldehyd und zur Carbonsäure oxidiert werden. Bei sekundären Alkoholen endet die Oxidation beim Keton. Tertiäre Alkohole werden unter diesen Reaktionsbedingungen (z. B. Oxidation mit Kupferoxid) nicht oxidiert.



ASCANIO SOBRERO,
1812 BIS 1888, ENTDECKER DES
NITROGLYCERINS UND
LEHRER VON ALFRED NOBEL



Molekulare Grundlagen der Zelle siehe Kap. B, 2.



Carbonsäureester siehe
Kap. A, 6.

- Eigenschaften** von Methanol
- Farblose, alkoholisch riechende Flüssigkeit
 - $t_b = 65^\circ\text{C}$
 - Giftig, verursacht Erblindung



Synthesegas siehe NAWI I/II, Kap. D, 1.1; chemisches Gleichgewicht siehe NAWI I/II, Kap. C, 3.3.

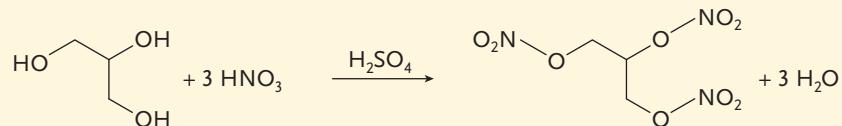


Recherchieren Sie, mit welcher Reaktion Methanol nachgewiesen werden kann.

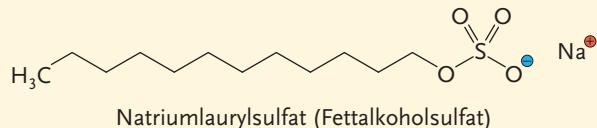
Alkohole bilden mit anorganischen Säuren und Carbonsäuren unter Wasserabspaltung Ester.

Beispiele von Estern mit anorganischen Säuren

Salpetersäure: Glyceroltrinitrat (Nitroglycerin)



Schwefelsäure: Langkettige Alkohole (Fettalkohole) bilden Fettalkoholsulfate, die als anionische Tenside in Waschmitteln verwendet werden.



Phosphorsäure: in biologisch wichtigen Molekülen (DNA, ADP, ATP), Insektiziden (E 605), Kampfstoffen (Sarin)

Chemische Eigenschaften der Alkohole

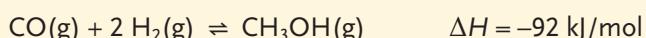
- Kurzkettige Alkohole sind leicht entzündlich.
- Alkohole reagieren in wässriger Lösung neutral.
- Primäre und sekundäre Alkohole werden unterschiedlich oxidiert, tertiäre unter vergleichbaren Bedingungen gar nicht.
- Alkohole bilden mit anorganischen Säuren Ester und mit organischen Säuren Carbonsäureester.

Technisch wichtige Alkohole

Methanol CH_3-OH

Bei der trockenen Destillation von Holz sind im Destillat etwa 3 % Methanol (Holzgeist) enthalten. Methanol wird großtechnisch aus Synthesegas hergestellt:

Erzeugung von Methanol aus Synthesegas



Für eine wirtschaftliche Produktion ist es erforderlich, das chemische Gleichgewicht in Richtung Produkt zu verschieben. Es wird möglichst hoher Druck (in der Praxis 340 bar) angewendet und eine Reaktionstemperatur von 380°C nicht überschritten. Für brauchbare Reaktionsgeschwindigkeiten wird die Reaktion mithilfe eines Katalysators beschleunigt.

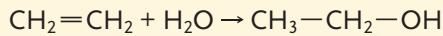
Technische Bedeutung von Methanol

- Sehr wichtiger Chemierohstoff (zur Herstellung von Formaldehyd, Essigsäure, Chlormethan, Methanamin)
- Energieträger (als Kraftstoff oder Kraftstoffzusatz)
- In Brennstoffzellen als Wasserstofflieferant

Ethanol (Alkohol) $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—OH}$

Ethanol wird durch Gärung von zuckerhaltigen Lösungen aus Naturstoffen gewonnen. Dabei kann eine Lösung mit etwa 17 Vol.-% erhalten werden. Bei dieser Konzentration stellen die meisten Hefen die Alkoholproduktion ein. Durch Destillation erreicht man 96 %igen Alkohol („Weingeist“). Technisches Ethanol wird durch Wasseranlagerung an Ethen gewonnen.

Erzeugung von technischem Ethanol



Technische Bedeutung von Ethanol

- Lösungsmittel im Haushalt (Kosmetik-, Reinigungsmittel)
- Technisches Lösungsmittel
- Desinfektionsmittel
- Zur Herstellung von Essigsäure
- Energieträger (in den Kraftstoffen E 85 und E 10)

Ethan-1,2-diol (Glycol) $\text{HO—CH}_2\text{—CH}_2\text{—OH}$

Die Herstellung erfolgt aus 1,2-Epoxyethan (Ethylenoxid) und Wasser.

Erzeugung von Ethan-1,2-diol



Technische Bedeutung von Ethan-1,2-diol

- Herstellung von Polyestern (z. B. PET)
- Frostschutzmittel, Enteisung von Flugzeugen
- In Kühlflüssigkeiten als Korrosionsschutzmittel

Propan-1,2,3-triol (Glycerol, Glycerin)

Glycerol ist am Aufbau aller pflanzlichen und tierischen Fette beteiligt und wird durch Verseifung aus ihnen hergestellt (Nebenprodukt der Seifenherstellung). Es ist ein Nebenprodukt bei der Biodieselherstellung, wo das Glycerol des Pflanzenöls durch Methanol ausgetauscht wird (Umesterung). Petrochemisch wird es aus Propen in einem mehrstufigen Prozess hergestellt.

Technische Bedeutung von Propan-1,2,3-triol

- Feuchthaltemittel in Lebensmitteln und Tabak
- In der Kosmetik für Salben und Cremen
- Zur Herstellung von Glyceroltrinitrat
- Als Gummipflegemittel
- Als Bremsflüssigkeit und Frostschutzmittel

Hexan-1,2,3,4,5,6-hexol (Sorbit, Sorbitol)

Sorbit ist ein Zuckeralkohol und kommt in der Natur in vielen Früchten, besonders in Kernobst, vor.

Technische Bedeutung von Hexan-1,2,3,4,5,6-hexol

- Zuckeraustauschstoff (für zuckerfreie Kaugummis und Bonbons)
- Zum Süßen von Diabetikerlebensmitteln
- Als Feuchthaltemittel in Lebensmitteln

Eigenschaften von Ethanol

- Farblose, charakteristisch riechende Flüssigkeit
- $t_b = 78,3^\circ\text{C}$
- Hat schon in geringen Dosen physiologische Effekte



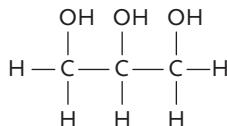
Alkoholische Gärung siehe Kap. B, 5.2; Drogen Alkohol siehe Kap. C, 4.

E 85: 85 % Ethanol, 15 % Benzin

E 10: 10 % Ethanol, 90 % Benzin

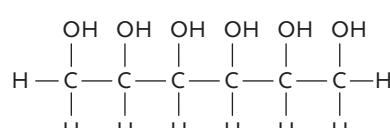
Eigenschaften von Ethan-1,2-diol

- Farblose, viskose Flüssigkeit
- $t_b = 197^\circ\text{C}$
- Gesundheitsschädlich



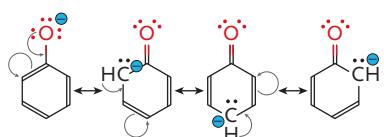
Eigenschaften von Propan-1,2,3-triol

- Farblose, hochviskose Flüssigkeit
- Stark hygroskopisch
- $t_b = 290^\circ\text{C}$
- Ungiftig, schmeckt süß



Eigenschaften von Hexan-1,2,3,4,5,6-hexol

- Farblose, hygroskopische Nadeln
- $t_m = 111^\circ\text{C}$
- Süßer Geschmack
- Nur schwach Karies fördernd
- Wirkt bei übermäßigem Verzehr abführend



Mesomere Grenzstrukturen des Phenolat-Ions

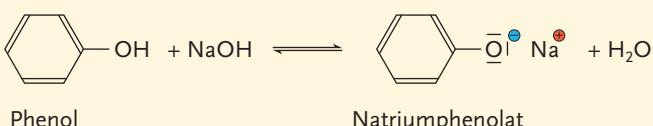


 Mesomerie siehe NAWI I/II,
Kap. C, 2.4.1.

Phenole

Phenole sind Verbindungen, die aus einem aromatischen Ring und daran gebundenen OH-Gruppen bestehen. Sie reagieren im Unterschied zu den Alkoholen im Wasser schwach sauer (alter Name für Phenol: Carbolsäure) und bilden mit Basen wasserlösliche Salze.

Reaktion von Phenol mit Wasser und mit Natronlauge



Der saure Charakter der Phenole wird durch die Stabilisierung des Phenolat-Ions durch Mesomerie hervorgerufen.

Phenol (Hydroxybenzen)

Bei der Destillation von Steinkohlenteer wurde Phenol im 19. Jahrhundert entdeckt. Der Arzt **Joseph Lister** erkannte die antiseptische Wirkung von Phenollösungen und setzte sie zur Wunddesinfektion ein. Wegen seiner hautirritierenden Nebenwirkungen wurden Phenollösungen bald durch schonendere Stoffe ersetzt.

Technische Bedeutung von Phenol

- Wichtige Grundchemikalie zur Herstellung zahlreicher organischer Verbindungen (z. B. Acetylsalicylsäure – Aspirin, Phenolphthalein)
 - Zur Herstellung von
 - ▶ Phenol-Formaldehydharzen (Bakelit)
 - ▶ Klebstoffen (Zweikomponentenklebern für Holz)
 - ▶ Herbiziden (Di- und Trichlorphenolen, 2,4-D, 2,4,5-T)

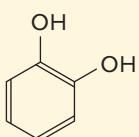


JOSEPH LISTER,
ENGLISCHER CHIRURG,
1827 BIS 1912, BEGRÜNDER DER
ANTISEPTISCHEN CHIRURGIE

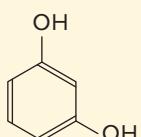
Dihydroxybenzene

Sind zwei OH-Gruppen am Benzen gebunden, ergeben sich drei isomere Verbindungen.

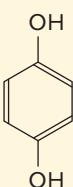
Dihydroxybenzene



Benzen-1,2-diol
Benzcatechin



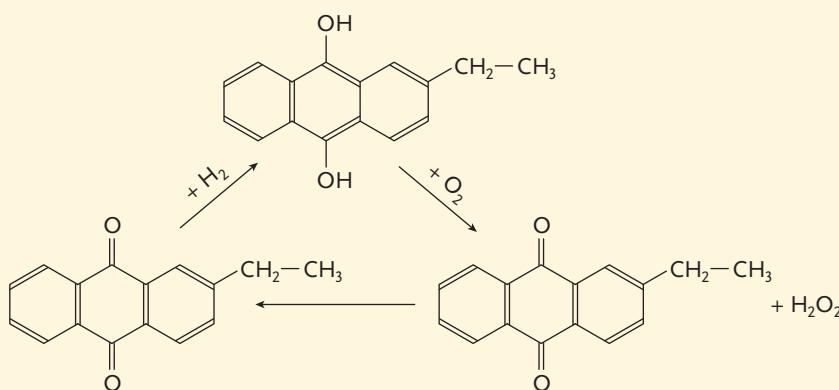
Benzen-1,3-diol
Resorcin



Benzen-1,4-diol
Hydrochinon

Brenzkatechin und Hydrochinon können leicht oxidiert werden. Deshalb wird besonders Hydrochinon als Reduktionsmittel bei der Entwicklung von Filmen verwendet. Ein analoges Redoxsystem spielt bei der großtechnischen Herstellung von Wasserstoffperoxid eine entscheidende Rolle:

Herstellung von H₂O₂ mithilfe von 2-Ethylhydroanthrachinon



Die Ausbildung einer mesomeriestabilisierten Chinonstruktur in Molekülen ist für die Farbigkeit von Stoffen verantwortlich. Dies zeigt sich am Beispiel des pH-Indikators Phenolphthalein und bei den Anthrachinonfarbstoffen.

Die **Gerbstoffe** (Tannine) sind hochmolekulare Verbindungen mit phenolischen OH-Gruppen. Sie werden bei der Ledererzeugung verwendet und sind für den herben Geschmack von fermentiertem Tee und Wein verantwortlich. Das Phenolderivat **2,4,6-Trichloranisol** verursacht den unangenehmen Korkgeschmack bei Weinen („Stoppeln“ des Weines).

Ether

Der Begriff Ether („ätherisch“) bedeutet leicht verdampfend, flüchtig und weist auf den niedrigen Siedepunkt einfacher Ether hin. Diese markante Verringerung des Siedepunktes gegenüber Alkoholen mit gleicher Summenformel hängt mit dem Fehlen von OH-Gruppen im Molekül zusammen. Ether bilden deshalb keine zwischenmolekularen Wasserstoffbrücken aus und sind daher in Wasser schlecht löslich.

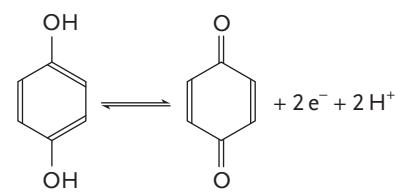
Vergleich von Ethanol und Methoxymethan (Dimethylether)

| | Summenformel | Siedepunkt | Wasserlöslichkeit (g/L bei 20 °C) |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------------------------|
| CH ₃ —CH ₂ —OH | C ₂ H ₆ O | t _b = +78,3 °C | beliebig mischbar |
| CH ₃ —O—CH ₃ | C ₂ H ₆ O | t _b = -24,8 °C | 70 g/L |

Viele Naturstoffe sind Ether, z. B. die Aromastoffe von Anis (Anethol), Eukalyptus (1,8-Cineol), Gewürznelken (Eugenol) und Vanille (Vanillin). Lineare, gesättigte Ether werden nach der IUPAC-Nomenklatur als Alkoxyalkane bezeichnet.

Ethoxyethan (Diethylether, Ether) CH₃—CH₂—O—CH₂—CH₃

Bereits im 19. Jahrhundert wurde Diethylether als Narkosemittel verwendet. Aufgrund der Nebenwirkungen (Übelkeit nach der Narkose) und seiner Feuergefährlichkeit kommt er als Narkotikum kaum mehr zum Einsatz. Die Herstellung erfolgt durch Reaktion von Ethanol mit konzentrierter Schwefelsäure bei ca. 130 °C.

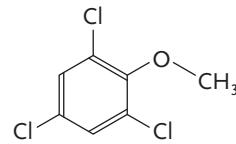


Oxidation von Hydrochinon zu Chinon (Chinon ist mesomeriestabilisiert)

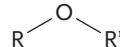
H₂O₂ ist ein starkes Oxidationsmittel und wird zum Bleichen verwendet.



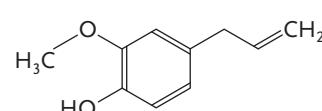
Phenolphthalein und Anthrachinonfarbstoffe siehe Kap. A, 10.



2,4,6-Trichloranisol



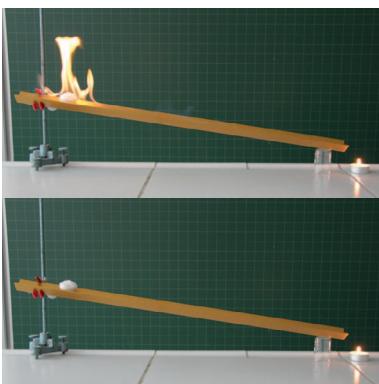
Allgemeine Formel linearer Ether



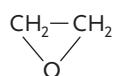
Strukturformel von Eugenol

Eigenschaften von Ethoxyethan

- Farblose, charakteristisch riechende Flüssigkeit
- t_b = 35 °C
- Hochentzündlich
- Dämpfe sind deutlich schwerer als Luft
- Wasserlöslichkeit: 69 g/L (20 °C)
- Gut mischbar mit organischen Lösungsmitteln



Wattebausch mit Ether getränkt; Etherdämpfe entzünden sich an der Kerzenflamme

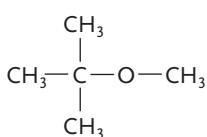


Eigenschaften von 1,2-Epoxyethan

- Farbloses, leicht entzündliches Gas
- Giftig, reizend und krebs-erregend
- Keimtötend

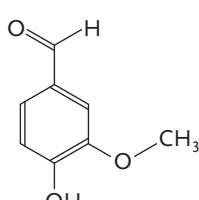


Einmalspritzen, mit Ethylenoxid (EO) sterilisiert



MTBE

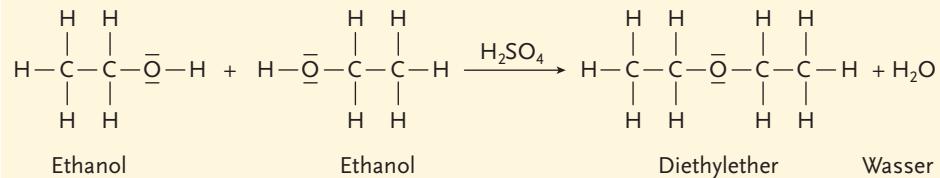
Oktanzahl siehe Kap. A, 1.2.



Vanillin

Recherchieren Sie Fakten zum Weinskandal und vor allem über die Auswirkungen auf die österreichische Weinwirtschaft.

Herstellung von Diethylether



Bei dieser Kondensationsreaktion wirkt die Schwefelsäure einerseits wasseranziehend und andererseits katalysiert die H_3O^+ -Ionen der Schwefelsäure die Reaktion.

Technische Bedeutung von Diethylether

- Sehr wichtiges Lösungsmittel in der präparativen organischen Chemie
- Extraktionsmittel für organische Stoffe in wässrigen Lösungen („Ausschütteln“)
- Starthilfespray beim Anlassen von Ottomotoren

1,2-Epoxyethan (Ethylenoxid, Oxiran)

Dieses einfachste Epoxid („innerer Ether“) wird durch katalytische Oxidation von Ethen hergestellt. Ethylenoxid ist aufgrund seiner Ringspannung sehr reaktiv.

Technische Bedeutung von Ethylenoxid

- Erzeugung von Glycol und Diethylenglycol
- Erzeugung von Polyester (z. B. PET)
- Zur Sterilisation von chirurgischen Instrumenten und Einmalspritzen

2-Methoxy-2-methylpropan (Methyl-tert-butylether, MTBE)

Wegen seiner hohen Oktanzahl ($\text{ROZ} = 118$) wird MTBE als Kraftstoffzusatz für hochklopffeste Treibstoffe verwendet. Er bildet – im Gegensatz zu Diethylether – keine explosiven Peroxide und wird daher statt Diethylether immer öfter als Lösungsmittel verwendet.

4-Hydroxy-3-methoxybenzencarbaldehyd (Vanillin)

Chemisch gesehen ist Vanillin ein aromatischer Aldehyd mit einer phenolischen OH-Gruppe und einer Ethergruppe. Es ist der Hauptaromastoff der Gewürzvanille. Vanillin für die Aromenindustrie wird größtenteils aus den bei der Zellstofferzeugung anfallenden Sulfitablaugen gewonnen. Mengenmäßig ist Vanillin der weltweit meistverwendete Aromastoff.

Diethylenglycol (2,2'-Oxydiethanol) $\text{OH}-\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3-\text{OH}$

Dieser Stoff ist sowohl ein Ether als auch ein zweiwertiger Alkohol. Die beiden OH-Gruppen ermöglichen die Ausbildung von Wasserstoffbrücken, sodass Diethylenglycol einen sehr hohen Siedepunkt hat ($t_b = 244^\circ\text{C}$) und sehr gut wasserlöslich ist. Daher eignet es sich – wie Glycol – als Frostschutzmittel und als Bremsflüssigkeit.

Traurige Berühmtheit erlangte Diethylenglycol beim Weinskandal 1985. Winzer verfälschten billigen, sauren Wein mit Frostschutzmitteln und täuschten so einen höheren Zuckergehalt vor (Diethylenglycol schmeckt süß und erhöht die Viskosität der Flüssigkeit). So wurde die Qualitätsstufe „Prädikatwein“ vorgetäuscht. Aufgrund der geringen Toxizität und der kleinen Konzentrationen im Wein kam es zu keinen Vergiftungen. Der Weinskandal hatte aber schwerwiegende Auswirkungen auf die österreichische Weinwirtschaft.



Ziele erreicht? – „Alkohole – Phenole – Ether“

- 4.01** Ist der Stoff 3-Methylbutan-2-ol ein primärer, sekundärer oder tertiärer Alkohol? Zeichnen Sie die Halbstrukturformel.
- 4.02** Erklären Sie, warum lineare, einwertige Alkohole einen deutlich höheren Siedepunkt haben als Alkane mit annähernd gleicher Molmasse.
- 4.03** Formulieren Sie die Reaktionsgleichung der Verbrennung von Ethanol.
- 4.04** Erklären Sie, warum der Heizwert von Methanol und Ethanol deutlich unter dem Heizwert von Benzin liegt.
- 4.05** Das Ethanolmolekül hat einen hydrophoben und einen hydrophilen Teil. Erklären Sie, warum dies wichtig ist für den Einsatz von Ethanol als Treibstoff E85 und E10 und warum kein reines Ethanol als Treibstoff verwendet wird.
- 4.06** Früher wurde Phenol durch Behandlung von Steinkohlenteer mit Natronlauge gewonnen. Erklären Sie, wie Phenol durch diese Behandlung vom Steinkohlenteer abgetrennt und in einem zweiten Schritt als Reinststoff gewonnen werden kann.
- 4.07** Der Stoff Guajacol leitet sich von Brenzkatechin ab. Er hat ein sehr intensives Raucharoma und trägt wesentlich zum Aroma von geräucherten Lebensmitteln und Kaffee bei. Sein IUPAC-Name ist 2-Methoxy-phenol. Zeichnen Sie die Halbstrukturformel.
- 4.08** Erklären Sie, warum Ether als Alkohole mit der gleichen Summenformel einen deutlich niedrigeren Siedepunkt haben.
- 4.09** Erhitzt man Methanol und Propan-1-ol mit konzentrierter Schwefelsäure, läuft eine chemische Reaktion ab. Formulieren Sie die Reaktionsgleichung und benennen Sie das Reaktionsprodukt.
- 4.10** Der Stoff Vanillin ist chemisch gesehen (kreuzen Sie die richtigen Antworten an):
- | | | | |
|---|------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> ein Ether | <input type="checkbox"/> ein Amin | <input type="checkbox"/> ein Phenol | <input type="checkbox"/> ein Aldehyd |
| <input type="checkbox"/> eine Carbonsäure | <input type="checkbox"/> ein Ester | <input type="checkbox"/> ein Keton | <input type="checkbox"/> ein FCKW |

5 Aldehyde und Ketone

Holz wird von der Menschheit seit Urzeiten als Werkstoff intensiv genutzt. Von entscheidender Bedeutung für eine optimale Nutzung sind dabei die Holzart und die durch Standort und Wuchsbedingungen geprägte Holzqualität. Holz unterliegt aber auch in optimaler Qualität gewissen Veränderungen. Es kann sich bei veränderter Luftfeuchtigkeit ausdehnen oder zusammenziehen. Um dies zu verhindern und um einen Werkstoff mit sehr einheitlicher Qualität in großflächigen Formaten herzustellen, wurde die Spanplatte entwickelt. Die Spanplatte ist ein Produkt aus Holzspänen, die mit einem Kunstharzbindemittel unter Hitzeeinwirkung zu einer Platte gepresst werden. Die Kunstharzbindemittel werden immer mithilfe des Aldehyds Methanal (Formaldehyd) hergestellt. Auch um Bakelit, den ersten industriell hergestellten Kunststoff, herzustellen, wurde Methanal mit Phenol zur Reaktion gebracht. Methanal zählt zu den wichtigsten organischen Grundstoffen der chemischen Industrie.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

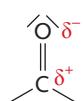
- die Aldehyde und die Ketone als **Oxidationsprodukte der Alkohole** darstellen;
- die **Eigenschaften und die Verwendung** dieser Substanzklassen beschreiben;
- anhand der Strukturformel auf das **chemische Verhalten** schließen;
- **Problemstellungen aus dieser Stoffklasse** analysieren und Lösungen finden.



Spanplatte mit Kunststoffbeschichtung



Telefon aus Bakelit



Carbonylgruppe mit positiven und negativen Teilladungen



Was bedeutet der Begriff Elektronegativität?



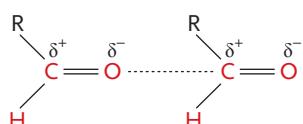
Ringbildung siehe Kap. B, 1.3.



Oxidation von Alkoholen siehe Kap. A, 4.



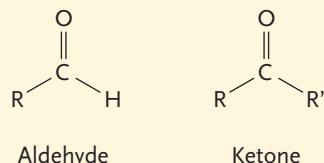
Oxidierte Kupferspirale in Ethanol



Dipol-Dipol-Wechselwirkungen zwischen zwei Aldehydmolekülen

Aldehyde und Ketone sind Substanzklassen, die in ihren funktionellen Gruppen die Carbonylgruppe enthalten. Sie besteht aus einem Kohlenstoffatom mit einer Doppelbindung zu einem Sauerstoffatom. Trägt das Kohlenstoffatom der Carbonylgruppe ein Wasserstoffatom, erhält man die Aldehydgruppe. Sind zwei organische Reste gebunden, erhält man die Ketogruppe, die für Ketone spezifisch ist.

Überblick über die chemischen Strukturen



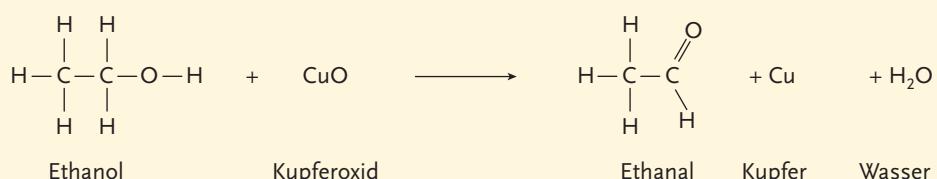
Die hohe Elektronegativität des Sauerstoffs führt dazu, dass die Carbonylgruppe stark polar und entsprechend reaktiv ist. Aus diesem Grund gehen Aldehyde typische Additions- und Polymerisationsreaktionen ein. Diese Reaktivität ist die Grundlage für viele technische Prozesse, wie z. B. die Erzeugung von Bakelit. Die intramolekulare Ringbildung bei Glucose und Fructose ist ebenfalls auf die Reaktivität der Carbonylgruppe zurückzuführen. Ketone haben eine deutlich geringere Reaktionsfreudigkeit.

Aldehyde und Ketone sind Oxidationsprodukte der primären bzw. sekundären Alkohole. Da Aldehyde weiter zu Carbonsäuren oxidiert werden können, haben sie im Unterschied zu den Ketonen eine reduzierende Wirkung. Dieser Unterschied wird zum Nachweis der Aldehyde verwendet.

Aldehyde

Das Wort „Aldehyd“ kommt aus dem Lateinischen (**a**lcohol **d**ehydrogenatus) und bezieht sich auf die Abspaltung von Wasserstoffatomen bei der Oxidation von Alkoholen zu Aldehyden.

Oxidation von Ethanol mit Kupferoxid zu Ethanal



Eigenschaften der Aldehyde

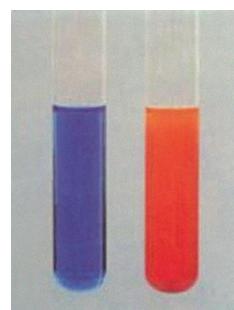
- Höhere Siedepunkte als die entsprechenden Alkane (Dipol-Dipol-Wechselwirkungen der Carbonylgruppen)
- Niedrigere Siedepunkte als bei den entsprechenden Alkoholen (keine Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Aldehydmolekülen)
- Kurzkettige Aldehyde sind gut wasserlöslich (zwischen Aldehyd und Wasser bilden sich Wasserstoffbrücken aus)
- Mit zunehmender Kettenlänge nimmt die Wasserlöslichkeit ab
- Kurzkettige Aldehyde haben einen stechenden, unangenehmen Geruch
- Höhere bzw. aromatische Aldehyde duften angenehm und sind Geruchsträger in vielen ätherischen Ölen (z. B. Vanille, Bittermandeln, Anis, Zitronen)
- Leicht oxidierbar zu Carbonsäuren
- Leicht reduzierbar zu primären Alkoholen

Nachweis von Aldehyden mit fehlingscher Lösung

In basischer Lösung werden Cu^{2+} -Ionen (blaue Lösung) zu einwertigen Cu^+ -Ionen (als Cu_2O) reduziert (orangeroter Niederschlag). Aldehyde werden zu Carbonsäuren oxidiert.

Mit der fehlingschen Lösung werden reduzierende Zucker (z. B. Glucose) nachgewiesen. Darauf beruhte die quantitative Glucosebestimmung im Harn nach Fehling, die den Nachweis von Zuckerkrankheit wesentlich erleichterte.

Diese Analysenmethode entdeckte **Hermann von Fehling** 1848.



Fehlingsche Lösung vor der Reaktion (links), positiver Aldehydnachweis (rechts)



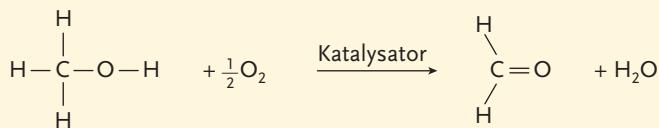
Reduzierende Zucker siehe Kap. B, 1.3.

Technisch wichtige Aldehyde

Methanal (Formaldehyd), $\text{H}-\text{CHO}$

Der Trivialname Formaldehyd des einfachsten Aldehyds leitet sich vom lateinischen Wort für Ameise („formica“) ab, denn Methanal kann leicht zu Armeisensäure (Methansäure) oxidiert werden.

Erzeugung von Methanal: katalytische Oxidation von Methanol



Methanal wird nach der Reaktion in Wasser gelöst und kommt als 40%ige Formalinlösung in den Handel.

Technische Bedeutung von Methanal

- Sehr wichtiger Chemierohstoff
- Zur Herstellung von
 - ▶ Kunstharzbindemitteln für die Spanplattenindustrie
 - ▶ Kunststoffen (Bakelit, Aminoplasten, Harnstoff- und Melaminharzen)
 - ▶ Farb- und Arzneistoffen
 - ▶ Stoffen zur Textilveredelung (knitterfrei-Ausrüstung)
 - ▶ Desinfektionsmitteln (Lysoform)
- Zur Konservierung anatomischer und biologischer Präparate
- Als Konservierungsmittel in Kosmetika (Shampoos, Duschgels)

Bei der Herstellung von Spanplatten wird das im Kunstharzbindemittel enthaltene Methanal nicht vollständig chemisch gebunden. Die vor allem im Möbelbau verwendeten Spanplatten geben geringe Mengen Methanal an die Raumluft ab, was zu gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Bewohner führen kann. Für diese Anwendungen sind daher nur Spanplatten der Emissionsklasse E1 zugelassen.

Ethanal (Acetaldehyd) CH_3-CHO

Ethanal ist ein häufig vorkommendes Zwischenprodukt bei biochemischen Stoffwechselvorgängen. Beim Alkoholabbau in der Leber wird Ethanal gebildet, das für das Unwohlsein („Kater“) nach Alkoholgenuss mitverantwortlich ist. In der chemischen Industrie spielt Ethanal vor allem als Zwischenprodukt eine wichtige Rolle.

Erzeugung von Ethanal: katalytische Oxidation von Ethen



Konservierung einer Schlange in Formalinlösung

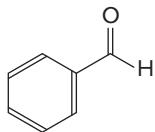
Emissionsklasse E1: Formaldehydausgasung max. 0,1 ppm



Ethanal sorgt für Unwohlsein nach Alkoholgenuss

Eigenschaften von Ethanal

- Farblose, stechend riechende Flüssigkeit
- $t_b = 20,4\text{ }^\circ\text{C}$
- Leicht entzündlich
- Reizend, vermutlich krebs-erregend
- Mit Wasser mischbar

**Eigenschaften von Benzencarbaldehyd**

- Farblose Flüssigkeit
- $t_b = 179\text{ }^\circ\text{C}$
- Typischer Geruch nach Bitter-mandeln
- Bei großen Aufnahmemengen gesundheitsschädlich

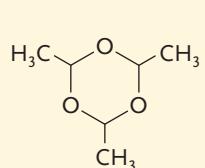


Marzipan wird durch intensives Vermahlen von Mandeln mit Zucker hergestellt

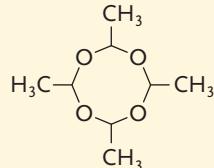
Eigenschaften von Propanon

- Farblose, angenehm riechende Flüssigkeit
- $t_b = 56\text{ }^\circ\text{C}$
- Leicht entzündlich
- Reizt Augen und Haut
- Dämpfe wirken narkotisierend
- Mit Wasser und vielen organischen Lösungsmitteln mischbar

Durch Cyclisierung von drei Molekülen Ethanal bildet sich der Stoff Paraldehyd, der als starkes Schlaf- und Beruhigungsmittel verwendet wird. Bilden vier Moleküle Ethanal ein ringförmiges Molekül, erhält man den Stoff Metaldehyd. Dieser Feststoff wird als Trockenbrennstoff (Trockenspiritus) und als Wirkstoff gegen Gartenschnecken (Schneckenkorn) verwendet.

Ringförmige Verbindungen aus Ethanal

Paraldehyd



Metaldehyd

Technische Bedeutung von Ethanal

Zur Herstellung von

- Ethansäure (Essigsäure)
- Ethylethanoat (Essigsäureethylester)

Benzencarbaldehyd (Benzaldehyd)

Benzencarbaldehyd wird wegen seines typischen Geruchs umgangssprachlich auch Bittermandelöl genannt. Die Substanz kommt in Fruchtkernen verschiedener Steinfrüchte (Aprikosenkernen, Bittermandeln) chemisch gebunden im Aromastoff Amygdalin vor. Durch das Einwirken von Säuren (z. B. Magensäure) zerfällt Amygdalin in Glucose, Benzencarbaldehyd und Hydrogencyanid (Cyanwasserstoff, Blausäure). Durch den Genuss einer größeren Menge von Aprikosenkernen kann es daher zu einer Blausäurevergiftung kommen.

Technische Bedeutung von Benzencarbaldehyd

- Aromastoff für Marzipan, Backwaren
- Als Duftstoff in Parfümerieartikeln

Ketone

Bei den Ketonen befindet sich die Carbonylgruppe immer zwischen zwei Kohlenstoffatomen. Dies bewirkt im Vergleich zu den Aldehyden mit einem Wasserstoffatom an der Carbonylgruppe eine deutlich geringere Reaktivität. Ketone entstehen durch Oxidation von sekundären Alkoholen.

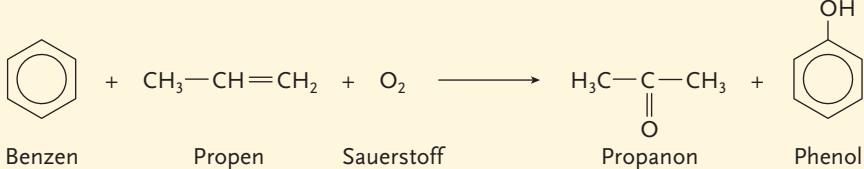
Eigenschaften der Ketone

- Höhere Siedepunkte als bei den entsprechenden Alkanen (Dipol-Dipol-Wechselwirkungen der Carbonylgruppen)
- Niedrigere Siedepunkte als bei den entsprechenden Alkoholen (keine Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Ketonmolekülen)
- Bessere Wasserlöslichkeit als bei den Aldehyden mit gleicher Kohlenstoffzahl
- Ketone zeigen keine positive Reaktion mit der fehlingschen Lösung

Technisch wichtige Ketone**Propanon (Aceton), $\text{CH}_3-\text{CO}-\text{CH}_3$**

Der Trivialname Aceton geht auf ein historisches Verfahren zurück, als Propanon durch trockenes Erhitzen von Calciumacetat (Kalksalzdestillation) hergestellt wurde.

Erzeugung von Propanon und Phenol: Hockverfahren



Inhalt einer Acetylen-Dissousgasflasche

| | |
|------------------|--------|
| Poröse Masse | ~ 8 % |
| Aceton | ~ 40 % |
| Acetylen, gelöst | ~ 40 % |
| Expansionsraum | ~ 12 % |



Technische Bedeutung von Propanon

- Sehr wichtiges Lösungsmittel für Lacke, Harze, Fette, Kunststoffe (Nagellackentferner)
- Zur Herstellung von Plexiglas
- Als Lösungsmittel für Ethin (Acetylen) in den Dissousgasflaschen
- Als Lösungsmittel bei der Herstellung von Celluloseacetatfasern (Kunstseide)
- Früher zur Herstellung von Tränengas (Bromaceton)

Bei Diabetes mellitus (Zuckerkrankheit) wird wegen des gestörten Stoffwechsels (Mangel an Insulin) Propanon im Blut angereichert, das im Harn und in der Atemluft nachgewiesen werden kann.

Butanon (Methylethylketon, MEK), $\text{CH}_3-\text{CO}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$

Ethanol, das nicht für Genusszwecke vorgesehen ist, wird mit einem Vergällungsmittel versetzt. Butanon wird aufgrund seines gleichen Siedepunktes dazu verwendet (siehe Etikette).

Erzeugung von Butanon

- Durch Oxidation (Dehydrierung) von Butan-2-ol
- Durch direkte katalytische Oxidation von n-Butan

Technische Bedeutung von Butanon

- Vergällungsmittel für Ethanol
- Lösungsmittel für Lacke, Harze und Nitrocellulose
- Dient zur Entparaffinierung von Schmierölen
- Extraktionsmittel zur Entcoffeinierung von Kaffee und Tee
- Als Treibstoffzusatz zur Erhöhung der Oktanzahl

Eigenschaften von Butanon

- Farblose, süßlich riechende Flüssigkeit
- $t_b = 80^\circ\text{C}$
- Leicht entzündlich
- Reizt Augen und Haut
- Dämpfe wirken narkotisierend
- Mäßig gut in Wasser löslich
- Mit organischen Lösungsmitteln gut mischbar

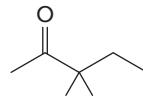


Etikette mit dem Hinweis auf die Vergällung mit MEK (Butanon) und dem Bitterstoff Bitrex

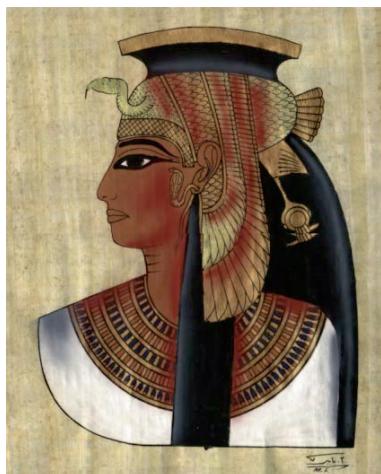


Ziele erreicht? – „Aldehyde und Ketone“

- 5.01 Vergleichen Sie die Eigenschaften der Aldehyde und der Ketone.
- 5.02 Welchen Stoff gewinnt man durch die Oxidation von Butan-1-ol? Schreiben Sie die Gerüstformel des Reaktionsproduktes.
- 5.03 Die Stoffe Propan-1-ol und Propanal haben unterschiedliche Siedepunkte. Welcher Stoff hat den höheren Siedepunkt? Begründen Sie Ihre Antwort.
- 5.04 Bei dem sogenannten Tollensreagens liegen Silberionen (Ag^+) in ammoniakalischer Lösung vor (die Lösung ist farblos!). Fügt man einen Aldehyd dazu, kommt es – ähnlich wie mit fehlingscher Lösung – zu einer erstaunlichen Reaktion. Welche Veränderung tritt nach Zugabe des Aldehyds ein? Versuchen Sie, die Reaktion zu erklären.
- 5.05 Erklären Sie die desinfizierende Wirkung von Formalin.
- 5.06 Die ringförmigen Verbindungen Paraldehyd und Metaldehyd verlieren durch die Cyclisierung ihre Aldehydfunktion. Zu welcher Substanzklasse gehören diese beiden Verbindungen?
- 5.07 Benennen Sie diese Substanz:
Erklären Sie, aus welchem Ausgangsstoff und mit welcher Reaktion sie herzustellen ist.



6 Carbonsäuren und Carbonsäureester



KLEOPATRA, 69 BIS 30 V. CHR., PHARAONIN DES ÄGYPTISCHEN PTOLEMÄERREICHES



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

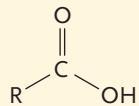
- die **chemischen Strukturen** der Carbonsäuren und Carbonsäureester erkennen und Stoffen zuordnen;
 - das **Vorkommen** von Carbonsäuren und Carbonsäureestern in Naturstoffen und ihre Verwendung beschreiben;
 - **chemische Reaktionen** dieser Stoffklasse erklären und auf neue Problemstellungen anwenden;
 - **Lösungskonzepte für Problemstellungen** aus dieser Stoffklasse erarbeiten.

Carbonsäuren enthalten eine oder mehrere Carboxygruppen als funktionelle Gruppen. Sie bestehen aus einer Carbonylgruppe, an die eine Hydroxygruppe gebunden ist. Durch die Kondensationsreaktion (Abspaltung von Wasser) mit einem Alkohol entsteht ein Carbonsäureester.

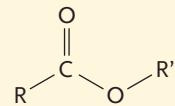


Citronensäure in Zitronen

Überblick über die chemischen Strukturen



Carbonsäure ($R-COOH$)



Carbonsäureester ($R-CO-O-R'$)

Carbonsäuren und Carbonsäureester sind in der Natur weit verbreitet und haben eine große biologische Bedeutung.



Bienenwachs, ein Carbonsäure-ester

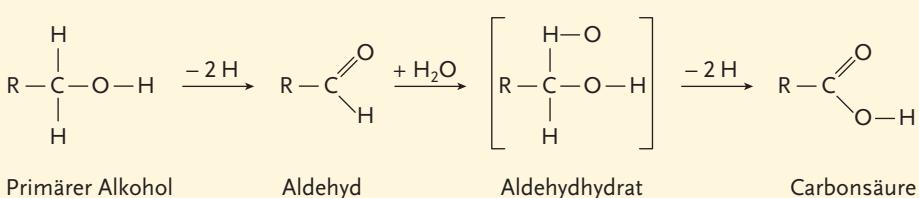


 Primärer Alkohol siehe
Kap. A, 4.

Carbonsäuren

Carbonsäuren werden durch Oxidation von primären Alkoholen mithilfe starker Oxidationsmittel gebildet. Als Zwischenprodukt entsteht ein Aldehyd bzw. ein instabiles Aldehydhydrat. Der Oxidationsschritt ist als Dehydrierung (Abspaltung von Wasserstoff) zu sehen.

Entstehung von Carbonsäuren



Nach IUPAC werden die Carbonsäuren mit dem Suffix „-säure“ bezeichnet. Da viele Carbonsäuren in der Natur vorkommen, sind Trivialnamen, die auf ihre Herkunft hinweisen, üblich. Carbonsäuren, die Bestandteil der Öle und Fette sind, nennt man Fettsäuren. Ihr Kohlenstoffgerüst ist unverzweigt, sie haben eine gerade C-Anzahl und eine Kettenlänge von mindestens vier C-Atomen.

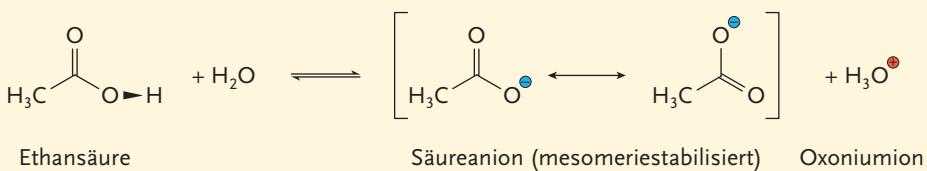
Monocarbonsäuren sind Carbonsäuren mit einer Carboxygruppe.

Beispiele von Carbonsäuren mit bekannten Trivialnamen

| IUPAC-Name | Trivialname | Summenformel | Vorkommen |
|-----------------------------|---------------|--------------------------------------|--|
| Methansäure | Ameisensäure | HCOOH | In vielen Organismen (u. a. im Ameisensekret, im Bienengift, in Nesseln) |
| Ethansäure | Essigsäure | CH ₃ COOH | Essig |
| Propansäure | Propionsäure | C ₂ H ₅ COOH | Käse |
| Butansäure | Buttersäure | C ₃ H ₇ COOH | Butter, Schweiß |
| Hexa-2,4-diensäure | Sorbinsäure | C ₅ H ₇ COOH | Vogelbeeren (als Vorstufe) |
| Hexadecansäure | Palmitinsäure | C ₁₅ H ₃₁ COOH | Öle und Fette |
| Octadecansäure | Stearinsäure | C ₁₇ H ₃₅ COOH | Öle und Fette |
| Octadeca-9-ensäure | Ölsäure | C ₁₇ H ₃₃ COOH | Öle und Fette |
| Octadeca-9,12-diensäure | Linolsäure | C ₁₇ H ₃₁ COOH | Pflanzenöle |
| Octadeca-9,12,15-triensäure | Linolensäure | C ₁₇ H ₂₉ COOH | Pflanzenöle |

Die Bindung des Protons an der Hydroxygruppe ist durch den Elektronen anziehenden Effekt der Carbonylgruppe stark polarisiert. Mit Wasser reagiert daher eine Carbonsäure unter Abspaltung dieses Protons zu Oxoniumion und Säureanion. Das Säureanion ist mesomeriestabilisiert, was seine Stabilität erhöht. Durch die Protolysereaktion bildet sich eine saure Lösung.

Protolyse von Ethansäure



Die Säurestärke – charakterisiert durch den pK_a -Wert – hängt bei Carbonsäuren sehr stark von Atomen bzw. Atomgruppen ab, die an ein der Carboxygruppe benachbartes C-Atom (α -C-Atom) gebunden sind. Bei stark Elektronen anziehenden Atomen (z. B. Chlor) wird durch den negativen induktiven Effekt ($-I$ -Effekt) die Bindung des Protons an die Hydroxygruppe stark polarisiert und die Abspaltung des Protons erleichtert.



Bei welchem Lebensmittel spielt der Gehalt an Linol- und Linolensäure eine große Rolle?

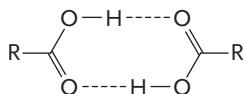


 Protopolyse siehe NAWI I/II,
Kap. C, 3.4.1.



 Die Nummerierung beginnt nach IUPAC immer beim C-Atom der Carboxygruppe. Das der Carboxygruppe benachbarte C-Atom trägt den Lokanten „2“, wird aber nach einer älteren Bezeichnung auch α -Kohlenstoffatom genannt.

 pK_a -Wert siehe NAWI I/II, Kap. C, 3.4.2.



Zwei Carbonsäuremoleküle bilden ein Dimer

Säurestärke und induktiver Effekt

| | | | |
|----------------------------------|---|---|--|
| | $\begin{array}{c} \text{H} & \text{H} \\ & \\ \text{H}-\text{C} & -\text{C}-\text{O}-\text{H} \\ & \\ \text{H} & \text{H} \end{array}$ Ethanol | $\begin{array}{c} \text{H} & & \text{O} \\ & & \\ \text{H}-\text{C} & -\text{C} & \text{O} \\ & & \backslash \\ \text{H} & & \text{O} \end{array}$ Ethansäure | $\begin{array}{c} \text{Cl} & \text{O} \\ & \\ \text{Cl}-\text{C} & -\text{C} & \text{O} \\ & & \backslash \\ \text{Cl} & & \text{H} \end{array}$ Trichlorethansäure |
| pK_a -Werte | 16 | 4,75 | 0,6 |
| pH-Wert einer 0,1-molaren Lösung | 7 | 2,9 | 1 |

Die Trichlorethansäure ist aufgrund des $-I$ -Effektes eine wesentlich stärkere Säure als die Ethansäure.

Die polarisierte Hydroxygruppe ermöglicht bei kurzkettigen Carbonsäuren die Ausbildung von Wasserstoffbrückenbindungen zwischen zwei Carbonsäuremolekülen, die auch im dampfförmigen Zustand stabil sind. Dies führt zu hohen Siedepunkten der Carbonsäuren.

Eigenschaften der Carbonsäuren

- Deutlich höhere Siedepunkte als bei entsprechenden Alkoholen (Dipol-Dipol-Wechselwirkungen und Ausbildung von Carbonsäuredimeren)
- Carbonsäuren ab zehn C-Atomen sind bei Raumtemperatur fest
- Carbonsäuren mit bis vier C-Atomen sind in Wasser gut löslich
- Carbonsäuren mit mehr als vier C-Atomen lösen sich gut in organischen Lösungsmitteln
- Kurzkettige Carbonsäuren haben einen stechenden Geruch
- Mit zunehmender Kettenlänge wird der Geruch unangenehm schweißartig
- Kettenförmige Monocarbonsäuren sind schwache Säuren ($pK_a = 3,75 - 4,85$)
- Carbonsäuren bilden Salze; die Natrium- und Kaliumsalze langkettiger Fett säuren wirken als Tenside und werden als Seifen verwendet

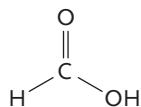
 Tenside und Seifen siehe Kap. A, 9.

Eigenschaften von Methansäure

- Farblose, stechend riechende Flüssigkeit
- $t_m = 8^\circ\text{C}$, $t_b = 101^\circ\text{C}$
- Ätzend
- Löslich in Wasser, Ethanol und Ethoxyethan
- Wirkt stark reduzierend



Welcher Teil des Methansäuremoleküls ist für die reduzierende Wirkung verantwortlich?



Technisch wichtige Carbonsäuren

Methansäure (Ameisensäure; Salze: Formiate), $\text{H}-\text{COOH}$

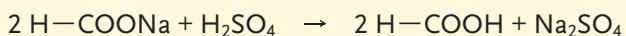
Die Methansäure ist in der Natur weit verbreitet und wird von Insekten, Nesseltieren (Quallen) und Brennnesselgewächsen als Abwehrflüssigkeit verwendet. Sie wurde bereits im 17. Jahrhundert aus Ameisen isoliert.

Erzeugung von Methansäure

Reaktion von Natronlauge mit Kohlenstoffmonooxid bei 130°C und 8 bar zu Natriumformiat:



Freisetzung der Methansäure durch Zugabe von verdünnter Schwefelsäure und Abtrennung durch anschließende Destillation:



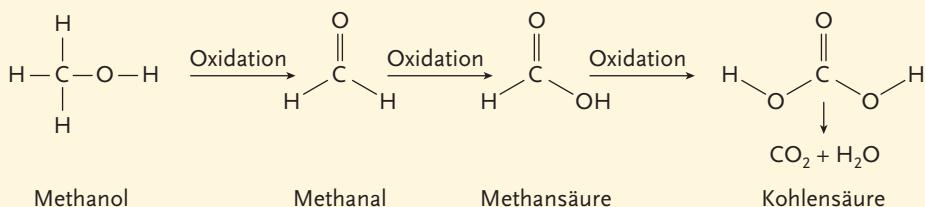
Technische Bedeutung von Methansäure

- Desinfektionsmittel (für Bier- und Weinfässer)
- Entkalkungsmittel im Haushalt
- Mittel zum Beizen und Imprägnieren in der Textil- und Lederindustrie

- Antirheumatikum
- Mittel zur Behandlung von Bienenstöcken gegen die Varroamilbe (einen Bienenparasiten)

In Gegenwart von konzentrierter Schwefelsäure zerfällt die Methansäure zu Kohlenstoffmonoxid und Wasser (Herstellung von CO im Labor!). Methansäure lässt sich leicht mit Sauerstoff oxidieren. Es entsteht Kohlensäure, die in CO_2 und Wasser zerfällt.

Oxidation von Methanol

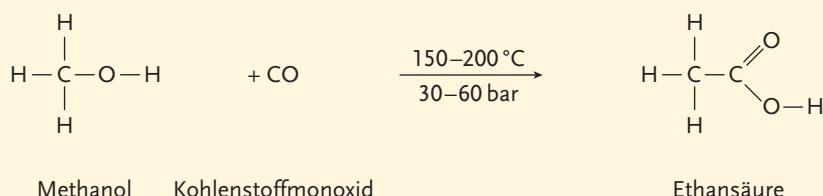


Ethansäure (Essigsäure; Salze: Acetate), $\text{CH}_3\text{—COOH}$

Seit der Antike ist die Herstellung von Ethansäurelösungen (Essig) aus alkoholhaltigen Flüssigkeiten bekannt. Dabei erfolgt die Oxidation von Ethanol zu Ethansäure durch Essigsäurebakterien mithilfe von Luftsauerstoff. Diese Essiggärung erfolgte früher in flachen, offenen Bottichen (Orleansverfahren). Später wurde die alkoholische Lösung langsam über Buchenholzspäne gegossen, wobei im Gegenstrom Luft durch den Behälter strömte. Heute wird Essig in geschlossenen Fermentern durch gezielten Eintrag von Luftsauerstoff und Kontrolle der Prozessparameter gewonnen (**Submersverfahren** – eine österreichische Erfindung).

Durch Essiggärung hergestellte Essige enthalten 5–6 % Ethansäure. Reine Ethansäure wird durch den Monsantoprozess hergestellt.

Erzeugung von Ethansäure (Monsantoprozess)



Wasserfreie Essigsäure erstarrt bei 17 °C und wird deshalb Eisessig genannt.

Technische Bedeutung von Ethansäure

- Sehr wichtiger Chemierohstoff
- Herstellung von
 - ▶ Ethansäurevinylester (Vinylacetat), Ausgangsstoff für Polyvinylacetat (PVA); PVA dient zur Herstellung von Farben, Lacken, Klebstoffen
 - ▶ Celluloseacetat (Kunstseide, Zigarettenfiltern, Folien, Kunststoffen)
 - ▶ Essigsäureanhydrid, einem wichtigen Reagenz für Pharmazeutika (Aspirin, Heroin)
 - ▶ Ethansäureestern (Lösungsmitteln, Aromastoffen)
- In Form von Essig bzw. Essigessenz (25 %) als
 - ▶ Geschmacksstoff und Säuerungsmittel
 - ▶ Konservierungsmittel
 - ▶ Entkalkungsmittel



Versetzen Sie in einem Reagenzglas wenige Milliliter Methansäure mit einigen Tropfen konzentrierter H_2SO_4 . Bei gelindem Erwärmen entsteht Kohlenstoffmonoxid, das an der Öffnung des Reagenzglases entzündet werden kann.



Kristalline Ethansäure (Eisessig)

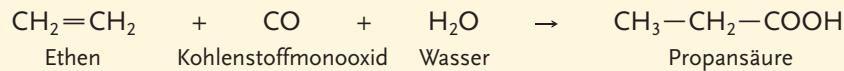
Eigenschaften von Propansäure

- Farblose, unangenehm riechende Flüssigkeit
 - $t_m = -22^\circ\text{C}$, $t_b = 141^\circ\text{C}$
 - Ätzend
 - Löslich in Wasser, Ethanol und Ethoxyethan

Propansäure (Propionsäure; Salze: Propionate), $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—COOH}$

Die Propansäure entsteht bei Gärungsvorgängen z. B. im Darm von Wiederkäuern oder bei der Reifung von Hartkäse (die Löcher des Emmentalers entstehen durch von Propansäurebakterien gebildetes CO_2 und Propansäure).

Erzeugung von Propansäure



Technische Bedeutung von Propansäure

- Herstellung von
 - ▶ Kunststoffen, Pharmazeutika, Herbiziden (Dichlorprop)
 - ▶ Propansäureestern (Lösungsmitteln, Geruchstoffen)
 - Konservierungsmittel für Backwaren und Futtermittel (Silage)

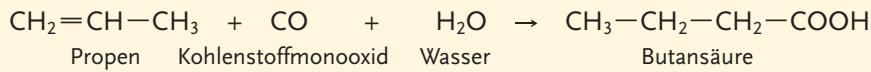
Eigenschaften von Butansäure

- Farblose, sehr unangenehm nach Schweiß und Erbrochenem riechende Flüssigkeit
 - $t_m = -5^\circ\text{C}$, $t_b = 163^\circ\text{C}$
 - Ätzend
 - Löslich in Wasser, Ethanol und Ethoxvethan

Butansäure (Buttersäure; Salze: Butyrate), $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—CH}_2\text{—COOH}$

Die Butansäure ist Bestandteil des Butterfettes und beim Fettverderb für den unangenehmen Geruch verantwortlich (Ranzigwerden). Weiters entsteht Butansäure bei der bakteriellen Zersetzung von Schweiß.

Erzeugung von Butansäure



Technische Bedeutung von Butansäure

Herstellung von

- Butansäureestern (Ananasaroma)
 - Cellulosebutyrat (schlagzähem Kunststoff)

Hexa-2,4-diensäure (Sorbinsäure; Salze: Sorbate),
 $\text{CH}_3-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-\text{COOH}$

Der Trivialname Sorbinsäure leitet sich von der lateinischen Bezeichnung der Vogelbeere *Sorbus aucuparia* ab. Die Beeren enthalten Parasorbinsäure, eine Vorstufe (Lacton) der Sorbinsäure. Die Herstellung erfolgt aus But-2-enal und Ethenon über eine mehrstufige Reaktion. (2E,4E)-Hexa-2,4-diensäure ist eine zweifach ungesättigte Carbonsäure.

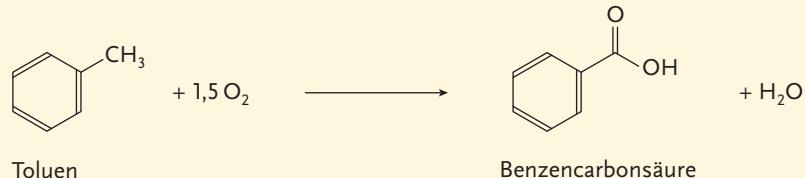
Technische Bedeutung von Hexa-2,4-diensäure

Sehr wichtiges Konservierungsmittel für Lebensmittel und Futtermittel (verwendet werden die freie Säure E 200 und das Kaliumsalz E 202)

Benzencarbonsäure (Benzoesäure; Salze: Benzoate)

Die einfachste aromatische Carbonsäure ist in vielen Früchten enthalten (Preiselbeeren, Himbeeren, Pflaumen) und kommt als wichtiger Bestandteil im Benzoeharz (Baumharz) vor.

Erzeugung von Benzencarbonsäure: Oxidation von Toluol



Technische Bedeutung von Benzencarbonsäure

- Wichtiges Konservierungsmittel für sauer eingelegte Lebensmittel (verwendet werden die freie Säure E 210, das Natriumsalz E 211, das Kaliumsalz E 212 und das Calciumsalz E 213)
- Herstellung von
 - ▶ Benzencarbonsäureestern (Aromastoffen)
 - ▶ Benzoylverbindungen (z. B. Dibenzoylperoxid; in Aknepräparaten, als Radikalstarter in Zweikomponentenklebstoffen)

Ethandisäure (Oxalsäure; Salze: Oxalate), HOOC—COOH

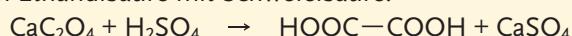
Der Trivialname der einfachsten Dicarbonsäure stammt vom lateinischen Namen für Sauerklee (*Oxalis acetosella*). Das Kaliumsalz der Ethandisäure wurde im 18. Jahrhundert in dieser Pflanze entdeckt und unter der Bezeichnung Kleesäure bekannt. Ethandisäure kommt in Rhabarber, Sauerklee, Spinat, Kakao, Roten Rüben und Petersilie vor. Mit Calciumionen bildet die Ethandisäure schwerlösliches Calciumoxalat. Diese Reaktion tritt bei gestörtem Stoffwechsel oder übermäßigem Genuss ethandisäurerreicher Nahrungsmittel in der Niere auf und verursacht die Bildung von Nieren- bzw. Harnsteinen.

Erzeugung von Ethandisäure

Erhitzen von Na-Formiat: $2 \text{H}-\text{COONa} \rightarrow \text{NaOOC}-\text{COONa} + \text{H}_2$

Umsetzung von Na-Oxalat mit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu schwerlöslichem Ca-Oxalat CaC_2O_4

Freisetzung von Ethandisäure mit Schwefelsäure:



Technische Bedeutung von Ethandisäure

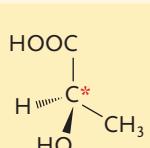
- Reduktiv wirkendes Bleichmittel für Wolle, Rohbaumwolle, Kork, Stroh
- Bleichmittel für Bergkristalle und Poliermittel für Marmor
- Entfernung von Rostflecken (reduzierende und komplexbildende Wirkung)
- Primärer Standard (Urtiter) in der Maßanalytik zur Herstellung von Maßlösungen mit exakt bemessenem Gehalt

2-Hydroxypropansäure (Milchsäure; Salze: Lactate), $\text{CH}_3-\text{CHOH}-\text{COOH}$

Die Herstellung von Sauermilchprodukten und Sauergemüsen ist der Menschheit schon seit Jahrtausenden bekannt. Bei diesen Fermentationsprozessen produzieren Milchsäurebakterien zwei verschiedenen Arten von Milchsäuren, die sich nur in ihrer Molekülsymmetrie unterscheiden. Sie verhalten sich zueinander wie Bild und Spiegelbild. Diese Moleküleigenschaft nennt man **Chiralität** und die beiden Molekülformen **Enantiomere**. Eine 1:1-Mischung beider Enantiomere wird **Racemat** genannt.

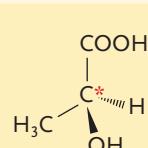
Enantiomere der Milchsäure

Beide Formen der Milchsäure entsprechen vergleichsweise einer linken und rechten Hand.



(R)-Milchsäure

linksdrehende D-(−)-Milchsäure



(S)-Milchsäure

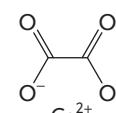
rechtsdrehende L-(+)-Milchsäure



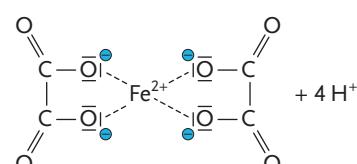
Etikette einer Fischkonserve mit Konservierungsmitteln

Eigenschaften von Ethandisäure

- Farbloser Feststoff
- $t_m = 189,5 \text{ }^\circ\text{C}$ (wasserfreie Säure)
- Gesundheitsschädlich beim Verschlucken und bei Hautkontakt
- Löslich in Wasser und Ethanol



Strukturformel von Ca-Oxalat



Löslicher Eisen-Oxalat-Komplex

Eigenschaften von

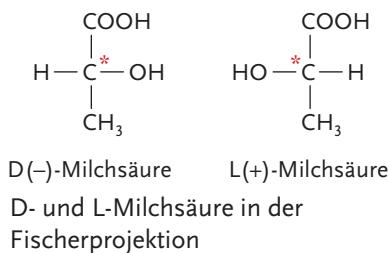
2-Hydroxypropansäure (Racemat)

- Farblose, sirupartige Flüssigkeit
- $t_m = 18 \text{ }^\circ\text{C}$
- $t_m = 53 \text{ }^\circ\text{C}$ (Enantiomere)
- Ätzend
- Löslich in Wasser und Ethanol



EMIL FISCHER, 1852 BIS 1919,
1902 NOBELPREIS FÜR
CHEMIE, ENTWICKELTE DIE
D-L-NOMENKLATUR

Chiralität bedeutet aus dem Griechischen übersetzt „Händigkeit“.



Chiralität tritt auf, wenn im Molekül ein Stereozentrum (ein C-Atom mit vier verschiedenen Substituenten; ältere Bezeichnung: asymmetrisches C-Atom) vorhanden ist. Es wird mit einem Stern (*) gekennzeichnet. Für die Benennung chiraler Verbindungen wird die D-L-Nomenklatur oder das R-S-System verwendet.

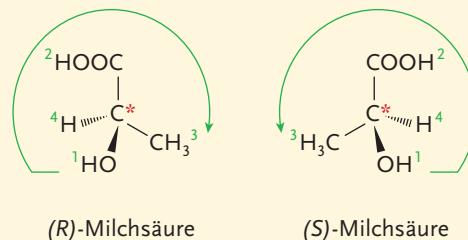
D-L-Nomenklatur (Fischerprojektion)

Zur Abbildung dreidimensionaler chiraler Moleküle in der Ebene wird die längste Kohlenstoffkette senkrecht angeordnet, wobei das C-Atom in der höchsten Oxidationsstufe oben steht. Nun wird die Kette so gedreht, dass die Substituenten mit C-Atomen (vom Stereozentrum aus gesehen) hinter die Zeichenebene zeigen (senkrechte Linie). Die anderen Substituenten zeigen nach vorne (waagrechte Linie). Weist der Substituent der waagrechten Linie mit der höheren Priorität (bei der Milchsäure die OH-Gruppe) nach rechts, wird mit D bezeichnet, weist er nach links, wird mit L bezeichnet.

R-S-System (Cahn-Ingold-Prelog-Konvention)

Nach Bestimmung des Stereozentrums werden die Atome der Substituenten nach ihrer Ordnungszahl gereiht. Priorität 1 erhält das Atom mit der höchsten Ordnungszahl. Bei gleichen Ordnungszahlen hat der Substituent die höhere Priorität, an den ein anderes Atom mit der höheren Ordnungszahl gebunden ist. Nun wird das Molekül so positioniert, dass der Substituent mit der niedrigsten Priorität 4 (zumeist der Wasserstoff) hinter die Zeichenebene weist. Dann umkreist man das Molekül von der Priorität 1 bis zur Priorität 3. Beschreibt man dabei einen Kreis im Uhrzeigersinn, so liegt die (R)-Konfiguration vor. Eine Beschreibung gegen den Uhrzeigersinn kennzeichnet die (S)-Konfiguration.

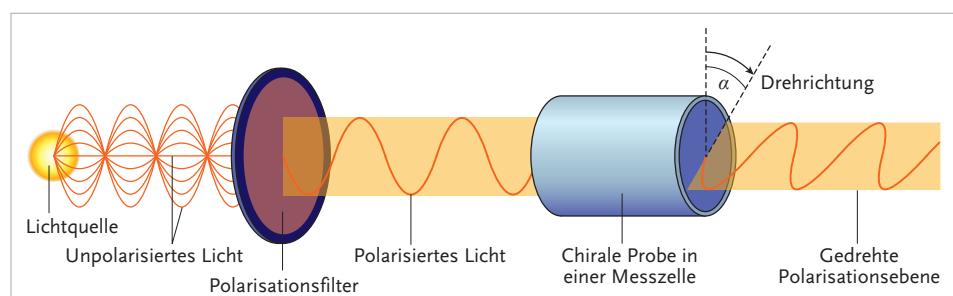
Benennung der Milchsäure nach dem R-S-System



Polarimeter

Optische Aktivität

Chirale Moleküle haben die Eigenschaft, die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht zu drehen. Sie sind optisch aktiv. Man unterscheidet rechtsdrehende (+) und linksdrehende (-) Enantiomere. Bei einem Racemat hebt sich die optische Aktivität auf. Gemessen wird die optische Aktivität mit einem Polarimeter.



Schematische Darstellung eines Polarimeters



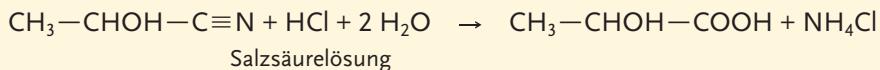
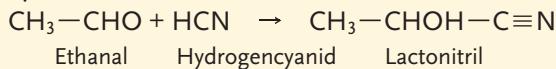
Polarisation siehe
Kap. D, 2.3.11.

Erzeugung von 2-Hydroxypropansäure

■ Biotechnologisch:

Es werden Fermentationsverfahren mit Milchsäurebakterien eingesetzt. Als Substrate kommen Milch, Molke und kohlenhydrathaltige Stoffe zum Einsatz. Dabei entsteht das Racemat der Milchsäure. Spezielle Bakterienstämme produzieren auch reine Enantiomere.

■ Synthetisch:



2-Hydroxypropansäure spielt im menschlichen und tierischen Stoffwechsel als Zwischenprodukt des Kohlenhydrat- und Aminosäurestoffwechsels eine große Rolle. Dabei kommt sie als (S)-Milchsäure im Blut, in Muskeln, der Niere und im Schweiß vor. Im Darm und auf der Haut verhindert die Milchsäure die Ausbreitung von krankheitserregenden Mikroorganismen.

Technische Bedeutung von 2-Hydroxypropansäure

- Herstellung von Lebensmitteln (Sauerkraut, Sauermilchprodukten, Rohwürsten, Sauerteig)
- In Futtermittelsilage
- Säuerungsmittel für Backwaren, Softdrinks (E 270)
- In kosmetischen und pharmazeutischen Präparaten (sie regt die Neubildung von Hautzellen an)
- Entkalken von Tierhäuten bei der Lederherstellung
- Herstellung biologisch abbaubarer Biokunststoffe

2,3-Dihydroxybutandisäure (Weinsäure; Salze: Tartrate)

Die Bezeichnung Weinsäure geht auf die schwer löslichen Ablagerungen (Weinstein, Kaliumhydrogentartrat) zurück, die bei der Lagerung von Wein auskristallisierten und für eine Säure gehalten wurden. In der Mitte des 18. Jahrhunderts wurde die Weinsäure im Weinstein entdeckt. Es existieren zwei natürlich vorkommende, optisch aktive Enantiomere. Synthetische und optisch inaktive Formen sind das Racemat (Traubensäure) und die Mesoweinsäure. Die optische Inaktivität der Mesoweinsäure beruht auf der intramolekularen Symmetrieebene.

Gewinnung von Weinsäure

Weinstein (Kaliumhydrogentartrat) wird mit Ca(OH)_2 in Calciumtartrat umgewandelt. Fügt man H_2SO_4 hinzu, bilden sich die freie Weinsäure und Gips.

Technische Bedeutung von Weinsäure

- Als Säuerungsmittel und Säureregulator in Lebensmitteln (E 334)
- Als Säurekomponente in Back- und Brausepulver

2-Hydroxypropan-1,2,3-tricarbonsäure (Citronensäure; Salze: Citrate)

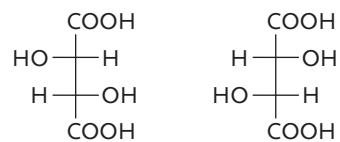
Die Citronensäure ist die dominierende Säure in Zitrusfrüchten und vielen anderen Früchten. Sie befindet sich in fast allen, bei Schülerinnen und Schülern so beliebten Erfrischungsgetränken (Limonaden, Eistee ...). Als Zwischenprodukt spielt sie im Kohlenhydrat- und Fettstoffwechsel eine entscheidende Rolle (Citratzyklus).



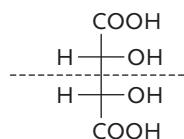
Milchsäuregärung siehe
Kap. B, 5.2.



Stoffwechsel siehe Kap. B, 3.



(2S,3S)-Weinsäure (2R,3R)-Weinsäure



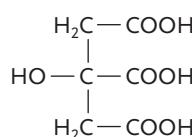
meso-Weinsäure

Eigenschaften von 2,3-Dihydroxybutandisäure

- Farblose Kristalle
- $t_m = 170^\circ\text{C}$ (Enantiomere)
- $t_m = 206^\circ\text{C}$ (Racemat)
- $t_m = 140^\circ\text{C}$ (Mesoform)
- Reizt Augen und Haut
- Löslich in Wasser und Ethanol



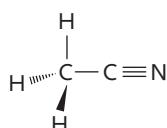
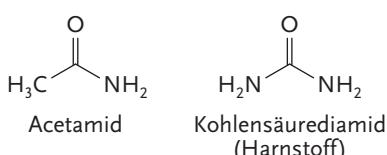
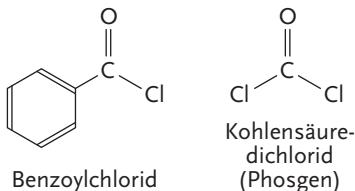
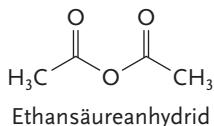
Weinsteinkristalle auf Korken



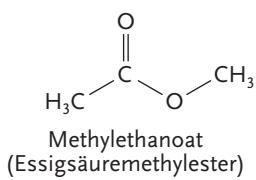
Eigenschaften von 2-Hydroxypropan-1,2,3-tricarbonsäure

- Farblose Kristalle
- $t_m = 153 \text{ }^\circ\text{C}$
- Reizt die Augen
- Gut löslich in Wasser

 Citratzyklus siehe
Kap. B, 3.2.



Methylcyanid (Acetonitril)



Die Bezeichnung „Ester“ leitet sich von der veralteten Bezeichnung „Essigäther“ für Ethyl-ethanoat ab.

Ursprünglich gewann man Citronensäure durch Reaktion von Zitronensaft mit Ammoniaklösung. Die durch Filtration gereinigte Ammoniumcitratlösung wurde mit CaCl_2 versetzt und das schwer lösliche Calciumcitrat abfiltriert. Durch Ansäuern mit H_2SO_4 bilden sich die freie Citronensäure und Gips. Nach Abtrennen des Gipses erhält man die Citronensäure durch Auskristallisieren.

Erzeugung von Citronensäure

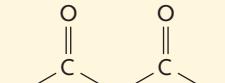
Durch Fermentation von zuckerhaltigen Rohstoffen mit dem Schimmelpilz *Aspergillus niger*.

Technische Bedeutung von Citronensäure

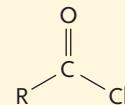
- Meistverwendetes Säuerungsmittel in Lebensmitteln (E 330)
- Antioxidationsmittel in Lebensmitteln
- Säurekomponente in Brausepulver
- Entkalkungsmittel
- Konservierungsmittel für Blutkonserven (Citronensäure verhindert die Blutgerinnung)

Derivate von Carbonsäuren (Strukturen)

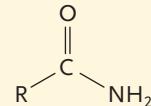
Carbonsäureanhydride: entstehen aus zwei Carbonsäuren durch Wasserabspaltung.



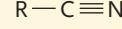
Carbonsäurechloride: Die Hydroxygruppe ist durch ein Chloratom ersetzt.



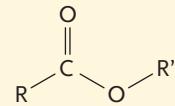
Carbonsäureamide: Die Hydroxygruppe ist durch eine Aminogruppe ersetzt.



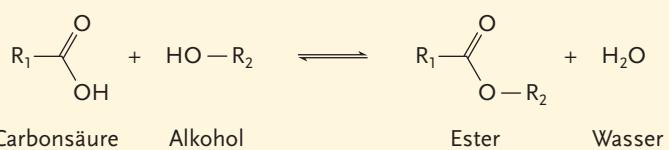
Nitrile: An den Kohlenstoff der Carboxygruppe ist nur ein Stickstoffatom gebunden.



Carbonsäureester: Sie entstehen aus einer Carbonsäure und einem Alkohol unter Wasserabspaltung.

**Carbonsäureester**

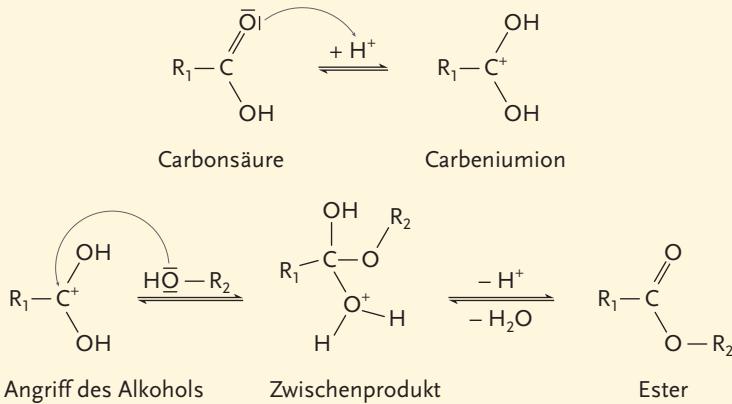
Die Reaktion einer Carbonsäure mit einem Alkohol oder einem Phenol wird Veresterung genannt. Bei dieser Kondensationsreaktion entstehen ein Carbonsäureester (kurz Ester genannt) und Wasser. Edukte und Produkte dieser Reaktion stehen miteinander im Gleichgewicht.

Die Veresterung ist eine Gleichgewichtsreaktion

 Chemisches Gleichgewicht
siehe NAWI I/II, Kap. C, 3.3.

Für die Veresterung wird eine starke Säure (meist H_2SO_4) als Katalysator benötigt. Sie leitet die Reaktion durch Protonierung der Carbonsäure zu einem Carbeniumion ein. Ein Elektronenpaar der Hydroxygruppe des Alkohols greift das Carbeniumion an. Das entstandene Zwischenprodukt spaltet Wasser ab und wird zum Ester deprotoniert.

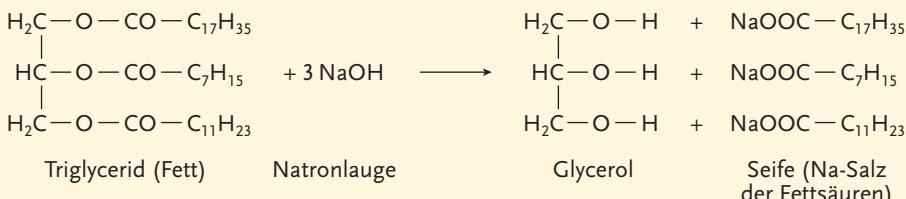
Mechanismus der Veresterung



Bei der Herstellung von Estern muss zur Erhöhung der Ausbeute das Gleichgewicht verschoben werden. Dies erreicht man entweder durch Abdestillieren des Esters bzw. des Wassers oder durch Zufügen eines Eduktes in den Überschuss.

Die Esterspaltung unter sauren Bedingungen (saure Esterhydrolyse) führt zu den Ausgangsstoffen Carbonsäure und Alkohol. Unter basischen Bedingungen entstehen ein Alkohol und das Alkalischmelz der Carbonsäure. Diese Reaktion wird Verseifung genannt, da bei der basischen Hydrolyse von Fetten die Seifen entstehen.

Verseifung eines Triglycerides (Fettes)



Eigenschaften der Carbonsäureester

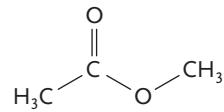
- Geringe Polarität der Carbonsäureester-Gruppe
 - ▶ Daher niedrigere Siedepunkte der Carbonsäureester als bei Carbonsäuren bzw. Alkoholen mit vergleichbarer molarer Masse
 - ▶ Daher schlechte bis keine Löslichkeit in Wasser
- Kurzkettige Ester sind gute Lösungsmittel für Fette, Wachse

Fruchtester

Ester aus kurzkettigen Carbonsäuren und Alkoholen sind Duft- und Aromastoffe, die für das Fruchtaroma verschiedener Obstsorten verantwortlich sind. Wenngleich das Aroma einer Frucht aus unterschiedlichen Verbindungen besteht, haben viele Fruchtester eine charakteristische Duftnote einer bestimmten Frucht.



Der Name von Estern wird aus Säure und Alkohol zusammengesetzt (z. B. Ethansäuremethylester).



Man kann aber Ester auch wie Salze bezeichnen (z. B. Methyl-ethanoat).



Warum ist aufgrund des Namens eine Verweichlung von Salz und Ester nicht möglich?



Seifen siehe Wasch- und Reinigungsmittel, Kap. A, 9.



Backaroma mit Rumgeschmack

Eigenschaften von Ethylethanoat

- Farblose Flüssigkeit mit typischem Geruch nach Klebstoff
 - $t_b = 77\text{ }^\circ\text{C}$
 - Leicht entzündlich, reizend
 - Führt beim Einatmen zu Schläfrigkeit und Benommenheit
 - Schlecht löslich in Wasser
 - Sehr gut löslich in Ethanol, Ethoxyethan und Aceton

Beispiele von Fruchtestern

| Aroma | Name | Formel |
|--------|------------------------|--|
| Ananas | Ethylbutanoat | $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ |
| Apfel | Methylbutanoat | $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_3$ |
| Banane | 2-Methylpropylethanoat | $\text{CH}_3-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}-(\text{CH}_3)_2$ |
| Birne | Methylbutylethanoat | $\text{CH}_3-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CH}-(\text{CH}_3)_2$ |
| Rum | Ethylmethanoat | $\text{H}-\text{CO}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ |

Ethylethanoat (Ethylacetat, Essigester), $\text{CH}_3\text{—CO—O—CH}_2\text{—CH}_3$

In geringen Konzentrationen kommt Ethylethanoat natürlich in Spirituosen vor. Im Wein ist es für den Weinfehler „Lösungsmittelton“ verantwortlich, wenn zur Herstellung durch Fäulnis geschädigte Trauben verwendet wurden. Da die Dämpfe narkotisierend wirken, werden Klebstoffe mit dem Lösungsmittel Ethylethanoat missbräuchlich als „Schnüffeldroge“ verwendet.

Technische Bedeutung von Ethylethanoat

- Lösungsmittel für Klebstoffe (Uhu, Pattex-Kraftkleber)
 - Vielseitig verwendetes Lösungsmittel (für schnell trocknende Lacke, für Fette, Öle und Harze)
 - Bestandteil von Nagellackentfernern
 - Duft- und Aromastoff

Wachse

Ester aus langkettigen Carbonsäuren (Fettsäuren) und langkettigen Alkoholen (Fettalkoholen) sind tierische und pflanzliche Wachse, die in vielen Naturstoffen vorkommen. Auf Blättern und Früchten schützen die Wachse die Pflanze vor dem Eindringen von Feuchtigkeit. Tierische Wachse haben ebenfalls Schutzfunktion und werden als Baumaterial verwendet.



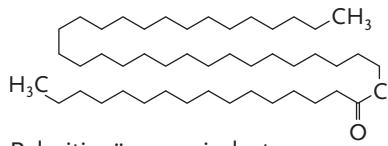
Karnaubawachs und Bienenwachs
als Trennmittel bei Gummibären

Beispiele von pflanzlichen Wachsen

| Wachs | Vorkommen | Verwendung |
|-------------------------------|----------------------------------|---|
| Karnaubawachs | Karnaubapalme | Überzugs- und Trennmittel in der Lebensmittelindustrie (z. B. für Gummibären) |
| Zuckerrohrwachs (Polycosanol) | Zuckerrohr | Lipidsenkendes Nahrungsergänzungsmittel |
| Jojobaöl (flüssiges Wachs) | In den Samen des Jojobastrauches | In Kosmetikprodukten und Polituren |

Beispiele von tierischen Wachsen

| Wachs | Vorkommen | Verwendung |
|------------------------|------------------|--|
| Bienenwachs | Bienenstock | In kosmetischen und pharmazeutischen Produkten, für Kerzen, Überzugs- und Trennmittel in der Lebensmittelindustrie |
| Wollwachs (Lanolin) | Schafwolle | In kosmetischen Präparaten, Wundsalben und Pflegecremes |



Palmitinsäuremyricylester
(C₁₅H₃₁-CO-O-C₃₀H₆₁) ist ein
Inhaltsstoff von Bienenwachs

Fette und Öle

Diese Naturstoffe sind Ester aus langkettigen Carbonsäuren (Fettsäuren) und dem dreiwertigen Alkohol Glycerol. Sie sind als Nahrungsmittel wichtige Energielieferanten.



Fette und Öle siehe Kap. B, 1.2.



Linoleum-Farbkollektion

Technische Bedeutung von Fetten und Ölen

- Herstellung von Biodiesel durch Umesterung von Rapsöl mit Methanol
- Treibstoff in modifizierten Dieselmotoren
- Herstellung von Seifen
- Biologisch abbaubare Schmiermittel (z. B. für Motorsägen)
- Herstellung von Ölfarben und Linoleum (Basis ist das trocknende Öl Leinöl, das durch Sauerstoffaufnahme aushärtet)

Polyester

Findet die Veresterung zwischen Carbonsäuren mit mehreren Carboxygruppen (z. B. Terephthalsäure, Benzen-1,4-dicarbonsäure) und mehrwertigen Alkoholen (z. B. Glycol, Ethandiol) statt, so entstehen Makromoleküle – die Polyester. Die technisch wichtigsten Polyester sind Polyethylenterephthalat (PET) und Polycarbonat (PC).

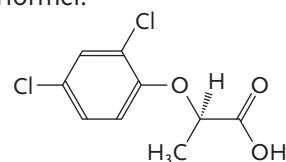


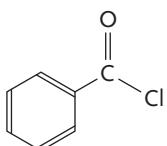
PET und PC siehe Kap. A, 8.2, Beispiele für Polykondensate.



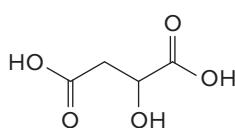
Ziele erreicht? – „Carbonsäuren und Carbonsäureester“

- 6.01** Beschreiben Sie die chemische Reaktion, die stattfand, als Kleopatra eine Perle in Essig tauchte. Formulieren Sie die Reaktionsgleichung.
- 6.02** Zeigen Sie anhand der Strukturformel einer Carbonsäure die Molekülteile Hydroxygruppe, Carbonylgruppe und Carboxygruppe.
- 6.03** Führen Sie aus, welche Carbonsäure durch Oxidation von Methylpropan-1-ol entsteht. Schreiben Sie die beiden Gerüstformeln auf.
- 6.04** Der pK_a -Wert von Chloorethansäure ist 2,9 und der pK_a -Wert von Trichlorethansäure ist 0,6. Analysieren Sie den Unterschied der pK_a -Werte.
- 6.05** Analysieren Sie die Schmelz- und Siedetemperaturen der ersten sechs Monocarbonsäuren und tragen Sie die Daten in je ein Diagramm ein. Welche Gesetzmäßigkeiten lassen sich aus den Daten ableiten? Worin könnten die Ursachen dafür liegen?
- 6.06** Bei der Oxidation von Methansäure mit $KMnO_4$ in saurer Lösung entsteht ein farb- und geruchloses Gas, das Kalkwasser beim Einleiten trübt. Erklären Sie, welche Reaktionsschritte erfolgen und welches Gas entsteht. Welche chemische Reaktion findet bei der Nachweisreaktion statt?
- 6.07** Warum wird reine Essigsäure auch Eisessig genannt?
- 6.08** Der Bezug von Essigsäureanhydrid unterliegt bestimmten Auflagen, da dieser Stoff für die Herstellung einer illegalen Droge unbedingt erforderlich ist. Welche Droge ist gemeint?
- 6.09** Das Herbizid Dichlorprop hat folgende Strukturformel:
Welche Carbonsäure wird zur Herstellung dieser Substanz verwendet? Das Molekül hat auch eine besondere optische Eigenschaft. Welche?

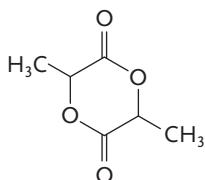




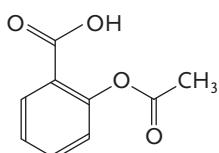
Benzoylchlorid



Hydroxybutandisäure



Lactid



2-Acetoxybenzencarbonsäure

- 6.10** Die Zutatenliste eines Lebensmittels enthält den Zusatzstoff E 202. Um welche Substanz handelt es sich?
- 6.11** Durch Reaktion einer Carbonsäure mit dem Reagenz Thionylchlorid (SOCl_2) entsteht die Verbindung Benzoylchlorid (Nebenprodukte sind SO_2 und HCl). Welche Carbonsäure wird für diese Reaktion eingesetzt?
- 6.12** Zeichnen Sie die Gerüstformel der Ethandisäure.
- 6.13** Zur Herstellung des Massenkunststoffes PET benötigt man die Terephthalsäure (Benzen-1,4-dicarbonsäure). Zeichnen Sie die Strukturformel.
- 6.14** Calciumoxalat ist in Wasser sehr schwer löslich. Was bedeutet dies, wenn durch eine Störung des Stoffwechsels Ca^{2+} -Ionen und Oxalationen z. B. in der Niere aufeinandertreffen?
- 6.15** Erklären Sie die Begriffe Chiralität, Enantiomere, Stereozentrum, optische Aktivität und Racemat.
- 6.16** Die Hydroxybutandisäure (Trivialname Apfelsäure, siehe Formel) ist eine Dicarbonsäure mit einem Stereozentrum. Zeichnen und benennen Sie beide Enantiomere in der Fischerprojektion und kennzeichnen Sie das Stereozentrum.
- 6.17** Die Verbindung Lactid (siehe Formel) entsteht durch Reaktion zweier Carbonsäuren. Welche Carbonsäuren reagieren miteinander und welche chemische Reaktion findet dabei statt?
- 6.18** Das schwer lösliche Calciumsalz der Citronensäure (Ca-Citrat) spielte bei der Gewinnung (Reinigung) der Citronensäure aus Zitronensaft eine wichtige Rolle. Es entsteht durch Reaktion von Citronensäure, $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, mit Calciumhydroxid, $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Geben Sie die Reaktionsgleichung dieser Reaktion (mit der Summenformel der Citronensäure) an.
- 6.19** Bei der Synthese einer Carbonsäure wird als Zwischenprodukt ein Nitril hergestellt und anschließend sauer hydrolysiert. Welches Nitril ist gemeint? Benennen Sie dieses Nitril nach der IUPAC-Nomenklatur.
- 6.20** Bei der Reaktion von 2-Hydroxybenzencarbonsäure (Salicylsäure) mit Methanol entsteht der Duft- und Geruchsstoff Wintergrünöl. Nennen Sie die Art der chemischen Reaktion und geben Sie die Reaktionsgleichung an.
- 6.21** 2-Acetoxybenzencarbonsäure (siehe Formel) ist das sehr bekannte Arzneimittel Aspirin. Aus welchen Rohstoffen kann dieser Stoff mit welcher chemischen Reaktion hergestellt werden?
- 6.22** Die Herstellung von Biodiesel erfolgt durch eine Umesterung: Die bestehende Esterbindung im Fett wird gelöst und mit Methanol neu gebildet. Welches Nebenprodukt entsteht bei dieser Reaktion?

7 Organische Stickstoffverbindungen

Das Wort „Protein“ kommt aus dem Griechischen und heißt übersetzt „das Erste“. Durch soll ausgedrückt werden, wie lebenswichtig Eiweiß ist. Sehr viele lebenswichtige Stoffe sind stickstoffhaltig. Andererseits handelt es sich auch bei einem Großteil der stärksten Gifte um stickstoffhaltige Stoffe. Ein Beispiel ist das Atropin, das Gift der Tollkirsche (lat. atropa belladonna, weil sich bei geringer Dosierung die Pupillen weiten, wodurch die Schönheit gesteigert wird). Die LD₅₀ von Atropin liegt bei etwa 450 mg für einen Erwachsenen. Auch bei nahezu allen Sprengstoffen handelt es sich um Stickstoffverbindungen.



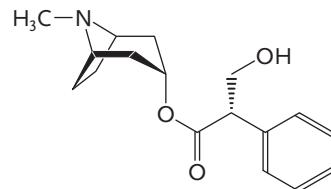
Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Einteilung und Herstellung** organischer Stickstoffverbindungen beschreiben;
- die Stickstoffverbindungen als **lebenswichtige Substanzen** einerseits und als wirtschaftlich **wichtige Zwischen- und Endprodukte** andererseits einschätzen;
- die **Basizität organischer Verbindungen** beurteilen.



Tollkirsche



Atropin (Gift der Tollkirsche)

7.1 Nitroverbindungen, Amine und Amide

Nitroverbindungen

Nitroverbindungen R—NO₂ werden mithilfe der Nitriersäure (eines Gemisches aus konzentrierter Schwefelsäure und konzentrierter Salpetersäure) aus Kohlenwasserstoffen hergestellt.

Nitroverbindungen tragen die stark Elektronen anziehende Nitrogruppe —NO₂.

Nitromethan CH₃—NO₂ wird durch Nitrierung von Methan erzeugt. Es wird vor allem als Zusatz zu Treibstoffen eingesetzt, um die Leistung erheblich zu steigern. Reines Nitromethan erbringt die doppelte Leistung von Benzin. Es wird bei Dragsterrennen (Beschleunigungsrennen) und Modellflugzeugen verwendet. Der 1939 mit 755 km/h aufgestellte Geschwindigkeitsweltrekord für Kolbenmotorflugzeuge wurde mithilfe von Nitromethan erzielt. In der Formel 1 ist die Verwendung von Nitromethan untersagt.

2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) kann relativ einfach durch dreifache Nitrierung von Toluol (Methylbenzen, C₆H₅—CH₃) hergestellt werden. Es wird militärisch und zivil genutzt und ist der für den militärischen Bereich wichtigste Sprengstoff.

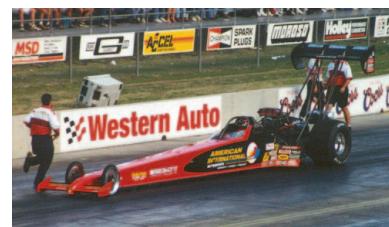
Die Explosion von TNT erfolgt hauptsächlich nach der Gleichung



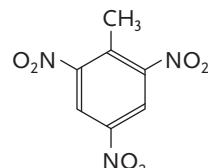
TNT ist ein guter Sprengstoff, weil nach der Zündung auch ohne Zufuhr von Luft (Sauerstoff) sehr große Mengen an Gasen entstehen. TNT gilt als Sicherheits-sprengstoff, weil es unempfindlich gegen Schlag und Hitze ist und nur durch einen Initialsprengstoff gezündet werden kann.



Nitrierung siehe Kap. A, 2.6.



Dragster



2,4,6-Trinitrotoluol (Trinitrotoluol)



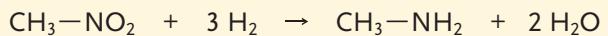
Die Detonationsstärke von Kernwaffen wird üblicherweise durch Vergleich mit TNT angegeben; z. B. kann eine H-Bombe die Sprengkraft von 100 Mt TNT haben.

TNT-Kennzahlen: Detonationsgeschwindigkeit 6 900 m/s
Energieinhalt 4 MJ/kg
Explosionstemperatur 2 800 °C
Schwadenvolumen (entstehendes Gas) 700 L/kg

Amine

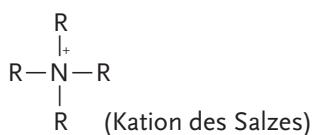
Die meisten Amine werden durch Reduktion von Nitroverbindungen hergestellt.

Herstellung von Methanamin aus Nitromethan

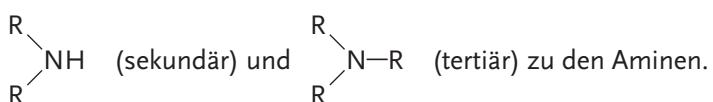


Amine tragen die basische Aminogruppe $-\text{NH}_2$ als funktionelle Gruppe.

Ebenfalls zu den Aminen gehören die quartären Ammoniumsalze:

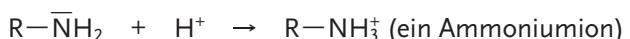


Neben dem Typ $\text{R}-\text{NH}_2$ (primäre Amine) zählt man Verbindungen wie



Amine sind meist unangenehm fischartig riechende Substanzen. Sie treten bei der Zersetzung von Eiweiß auf.

Analog der Verbindung Ammoniak sind die Amine basisch, weil das Stickstoffatom ein freies Elektronenpaar besitzt, mit dem es Protonen einfangen kann:



Hexan-1,6-diamin (Hexamethylenediamin) ist ein Rohstoff zur Herstellung des Kunststoffs Polyamid-6,6 (Nylon).

Anilin (Benzenamin) ist das technisch wichtigste Amin. Es wird aus Nitrobenzenen durch Reduktion mit Wasserstoff erzeugt.

Anilin ist schwächer basisch als die aliphatischen Amine. Es wird nämlich das freie Elektronenpaar des N-Atoms teilweise in das aromatische System miteinbezogen, wodurch es nicht mehr in vollem Umfang für die Bindung von Protonen zur Verfügung steht – und damit nicht mehr so basisch ist. Wenn Elektronen in ein aromatisches System hineingezogen werden, spricht man von einem **+M-Effekt**.

Anilin ist ein wichtiges Zwischenprodukt der organischen Chemie. Aus Anilin werden sehr viele Farbstoffe, Kunststoffe und Pharmazeutika hergestellt.

Amide

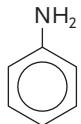
Säureamide (kurz: Amide) liegen vor, wenn die Hydroxygruppe einer Carbonsäure durch eine Aminogruppe ersetzt ist.

Säureamide zeigen praktisch keine Basizität mehr. Durch den **-I-Effekt** des stark elektronegativen Sauerstoffs wird dem Stickstoff das freie Elektronenpaar entzogen.

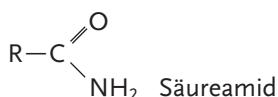


Nylon siehe Kap. A, 8.3.

Anilin

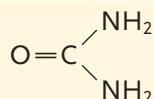


Die **BASF** ist der weltweit größte Chemiekonzern. Die Abkürzung bedeutet „Badische Anilin- und Sodaefabrik“.



-I-Effekt siehe Kap. A, 6.

Das vorangestellte „N-“ ist ein Lokant. Es zeigt an, dass die betreffende Gruppe an einem Stickstoffatom hängt.



Harnstoff (Kohlensäurediamid) wird unter Druck aus Kohlenstoffdioxid und Ammoniak produziert.

Harnstoff zeigt schwache Basizität, weil der $-I$ -Effekt eines Sauerstoffatoms nicht ausreicht, um die freien Elektronenpaare von zwei Stickstoffatomen abzuziehen. Der menschliche Harn enthält Harnstoff, womit überschüssiger Stickstoff (vom Eiweißabbau) aus dem Körper ausgeschieden wird. Allerdings ist der Harn leicht sauer, weil er außer Harnstoff auch noch andere Abbauprodukte enthält.

Harnstoff ist einerseits ein Langzeitdüngemittel und andererseits ein Vorprodukt für Kunststoffe (z. B. Harnstoff- und Melaminharze für die Möbelindustrie).



Zu den organischen Stickstoffverbindungen zählen auch die Nitrile $\text{R}-\text{CN}$ – siehe Kap. A, 6.

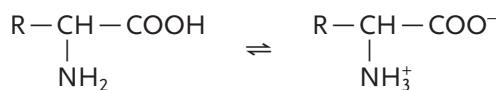
7.2 Aminosäuren und Peptide

Aminosäuren (AS) tragen zumindest je eine (basische) Amino- und eine (saure) Carboxygruppe.

Aminosäuren bauen die Eiweiße (Proteine) auf. Die Benennung erfolgt üblicherweise mit Trivialnamen.

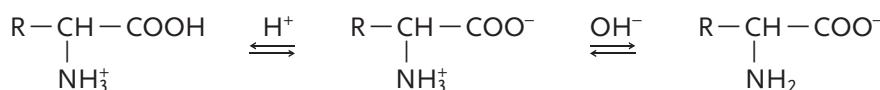
Die in der Natur vorkommenden AS tragen die Aminogruppe fast ausnahmslos direkt neben der Carboxygruppe, d. h. in der Zweierposition (die auch als α bezeichnet wird). Sie sind meist chirale L-Aminosäuren. Eine der wenigen AS, die die Aminogruppe nicht in der Zweierposition trägt, ist die 4-Aminobutansäure (γ -Aminobuttersäure, GABA). Sie ist für den Stoffwechsel im Gehirn wesentlich.

Aminosäuren protolysieren mit sich selbst.



Das Resultat kann man als inneres Salz bezeichnen. Man spricht von einem Zwiterion. Aufgrund der Ladungen sind die einfachen Aminosäuren gut wasserlöslich.

Der Zustand von Aminosäuren ist pH-abhängig. Im sauren Magensaft liegen sie positiv, im basischen Darmmilieu negativ vor.



Die Natur baut – von wenigen Ausnahmen abgesehen – alle Proteine aus den 20 nachstehend aufgelisteten L-Aminosäuren auf.



Welche Aminosäure ist nicht chiral? Wie sieht die GABA-Formel aus?



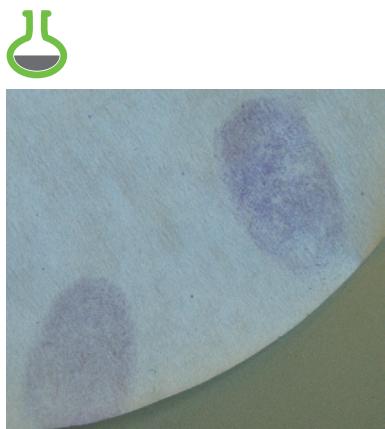
Proteine siehe Kap. B, 1.1.

Liste der 20 wichtigsten Aminosäuren

| | Name | Code | Seitenkette R |
|---|------------|---------|---|
| 1 | Glycin | Gly (G) | $-\text{H}$ |
| 2 | Alanin | Ala (A) | $-\text{CH}_3$ |
| 3 | *Valin | Val (V) | $-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$ |
| 4 | *Leucin | Leu (L) | $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)_2$ |
| 5 | *Isoleucin | Ile (I) | $-\text{CH}(\text{CH}_3)-\text{CH}_2-\text{CH}_3$ |
| 6 | Serin | Ser (S) | $-\text{CH}_2-\text{OH}$ |



Ein * vor dem Namen zeigt an, dass die AS essenziell ist (sie muss mit der Nahrung zugeführt werden, weil sie der Körper nicht durch Umbau aus anderen AS herstellen kann).



Nachweis von AS: Drücken Sie Ihren Daumen kräftig auf ein Filterpapier, besprühen Sie das Papier mit Ninhydrinlösung und erwärmen Sie es vorsichtig fächernd über einer Flamme. Ein Fingerabdruck erscheint, weil sich Haut immer ein wenig zu AS zersetzt.

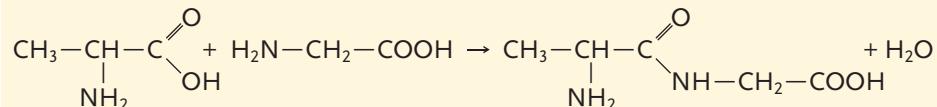
| | | | |
|----|----------------|---------|---|
| 7 | *Threonin | Thr (T) | $-\text{CH}(\text{OH})-\text{CH}_3$ |
| 8 | Cystein | Cys (C) | $-\text{CH}_2-\text{SH}$ |
| 9 | *Methionin | Met (M) | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{S}-\text{CH}_3$ |
| 10 | Phenylalanin | Phe (F) | $-\text{CH}_2-$ |
| 11 | *Tyrosin | Tyr (Y) | $-\text{CH}_2-$ |
| 12 | Asparaginsäure | Asp (D) | $-\text{CH}_2-\text{COOH}$ |
| 13 | Asparagin | Asn (N) | $-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{NH}_2$ |
| 14 | Glutaminsäure | Glu (E) | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{COOH}$ |
| 15 | Glutamin | Gln (Q) | $-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{CO}-\text{NH}_2$ |
| 16 | *Lysin | Lys (K) | $-(\text{CH}_2)_4-\text{NH}_2$ |
| 17 | Arginin | Arg (R) | $-(\text{CH}_2)_3-\text{NH}-\text{C}(\text{NH})\text{NH}_2$ |
| 18 | *Histidin | His (H) | $-\text{CH}_2-$ |
| 19 | *Tryptophan | Trp (W) | $-\text{CH}_2-$ |
| 20 | Prolin | Pro (P) | |

Man kann die Aminosäuren einteilen in solche mit hydrophober aliphatischer Seitenkette (Nr. 1 bis 5), wozu man auch das Methionin (Nr. 9) zählt, und in solche mit polarer aliphatischer Seitenkette (Nr. 6 bis 8) und solche mit aromatischem Rest (Nr. 10 und 11). Andere AS tragen eine zusätzliche Carboxygruppe in der Seitenkette (Nr. 12 und 14). Diese sauren AS können in der Amidform vorliegen (Nr. 13 und 15).

Wiederum andere AS tragen eine zusätzliche basische Gruppe (Nr. 16 bis 19), wobei Histidin (Nr. 18) und Tryptophan (Nr. 19) auch aromatisch sind. Das Prolin (Nr. 20) nimmt eine Sonderstellung ein, weil die Aminogruppe in einen Ring eingebunden ist. Das in Proteinen ebenfalls vorkommende Hydroxyprolin (in der Tabelle nicht angeführt) trägt am Ring des Prolins eine zusätzliche OH-Gruppe.

Durch Verknüpfung von zwei AS mit Kondensation entsteht ein Dipeptid.

Verknüpfung von Alanin mit Glycin



An der Verknüpfungsstelle liegt die Amidstruktur $-\text{CO}-\text{NH}-$ vor. In der Biochemie wird dafür die Bezeichnung **Peptidbindung** verwendet.

Wenn wenige AS verknüpft sind, spricht man von einem Peptid. Wenn viele AS verknüpft sind, von einem Polypeptid (Protein, Eiweiß). Dabei ist die Reihenfolge der AS (die sogenannte Sequenz oder Primärstruktur) entscheidend. Beim Anschreiben eines Peptids – egal ob Formel oder abgekürzte Schreibweise – wird immer mit der AS begonnen, deren Aminogruppe frei ist (N-terminales Ende). Rechts steht die AS mit der unveränderten Carboxygruppe (C-terminales Ende).



Das nebenstehende Dipeptid wird mit Ala—Gly abgekürzt. Hingegen bedeutet die Abkürzung Gly—Ala, dass Glycin links (mit unverknüpfter Aminogruppe) steht.

Enkephalin ist ein Pentapeptid, das im Gehirn Schmerzempfindungen unterdrückt. Seine Sequenz lautet Tyr—Gly—Gly—Phe—Met. Die Glückshormone genannten Endorphine enthalten ebenfalls die Sequenz Tyr—Gly—Gly—Phe.

7.3 Heterocyclen

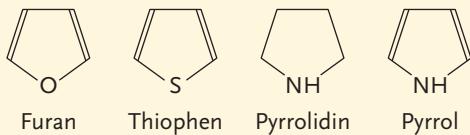
Heterocyclen sind ringförmige Verbindungen, die außer Kohlenstoff auch andere Atome als Ringglieder enthalten.

Die wichtigsten Fremdatome in Heterocyclen sind Stickstoff, Sauerstoff und Schwefel. Vor allem Stickstoff spielt in biochemischen Verbindungen eine große Rolle.

Wie bei den normalen ringförmigen Verbindungen findet man bei den Heterocyclen in erster Linie die spannungsfreien Fünf- und Sechsringe. Eine bekannte Ausnahme stellen die **Penicilline** dar. Diese von Schimmelpilzen produzierten Antibiotika enthalten einen Ring aus vier Atomen, der eine Verformung der normalen Bindungswinkel von 109° (sp^3 -Hybride) bzw. 120° (sp^2 -Hybride) zeigt.

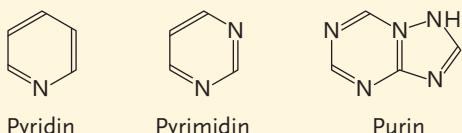
Auch bei den Heterocyclen werden eher die Trivialnamen als die systematische Nomenklatur verwendet.

Die bekanntesten Fünfringheterocyclen sind:



Von diesen Verbindungen zeigen Furan, Thiophen und Pyrrol aromatischen Charakter. Die Aromatizität kommt dadurch zustande, dass die Heteroatome freie Elektronenpaare besitzen, die sie dem ringförmigen π -Elektronensystem zur Verfügung stellen. Nahezu die gleichen Eigenschaften wie Benzen hat Thiophen, weil das Schwefelatom seine Elektronen am wenigsten für sich beansprucht (keine hohe Elektronegativität hat). Furan ist deutlich weniger aromatisch (hohe EN des Sauerstoffs). Pyrrol ist nicht basisch, weil das freie Elektronenpaar des Stickstoffatoms für die Ausbildung des aromatischen π -Elektronensystems benötigt wird und daher nicht mehr als Protonenfänger wirken kann.

Die bekanntesten Sechsringheterocyclen sind:



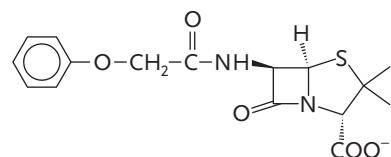
Pyrimidin und Purin bilden das Gerüst für die Basen der Nucleinsäuren.

Pyridin ist basisch, da sein freies Elektronenpaar für den Aufbau des aromatischen Systems nur geringfügig herangezogen werden muss.

Viele Naturstoffe, aber auch Drogen sind heterocyclische Stickstoffverbindungen, die aufgrund ihrer Basizität unter dem Begriff Alkaloide zusammengefasst werden. Beispiele sind Nicotin (Nikotin) und Coffein (Koffein).



Warum kommt Chlor als Ringglied in einem Heterocyclus nicht infrage?



Penicillin V



Sandoz Österreich in Kundl (Tirol). Hier wurden Penicilline entwickelt, die oral eingenommen werden können.



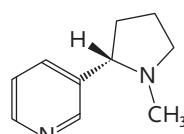
Penicillin siehe Kap. A, 11 und Kap. B, 5.2.



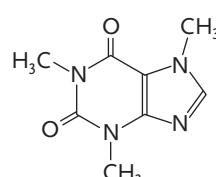
RNA und DNA siehe Kap. B, 2.1.



Drogen siehe Kap. A, 11.2.



Nicotin



Coffein



Ziele erreicht? – „Organische Stickstoffverbindungen“

- 7.01** Erstellen Sie die chemische Gleichung für die Herstellung von TNT.
- 7.02** Warum wird TNT im Bergbau nicht eingesetzt? Betrachten Sie dazu die Gleichung der TNT-Explosion.
- 7.03** Formulieren Sie die Gleichung für die Reaktion von Methanamin mit Salzsäure.
- 7.04** Begründen Sie, warum quartäre Ammoniumsalze nicht basisch sind.
- 7.05** Schreiben Sie die Reaktionsgleichung für die Produktion von Anilin an.
- 7.06** Schreiben Sie die Formeln für das Kampfgas Trichlornitromethan, für das bei Eiweißfäulnis entstehende Pentan-1,5-diamin (Cadaverin) und für den Weichmacherzusatz Ethansäureamid an.
- 7.07** Erstellen Sie die Gleichung für die Produktion von Harnstoff aus Kohlenstoffdioxid und Ammoniak.
- 7.08** Reihen Sie folgende Verbindungen nach steigender Basizität:
- | | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Natronlauge | <input type="checkbox"/> Ethanamin | <input type="checkbox"/> Ethansäureamid |
| <input type="checkbox"/> Harnstoff | <input type="checkbox"/> Benzenamin | |
- 7.09** Ordnen Sie folgende Verbindungen nach steigender Wasserlöslichkeit:
- | | | |
|------------------------------------|------------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> Harnstoff | <input type="checkbox"/> Benzen | |
| <input type="checkbox"/> Anilin | <input type="checkbox"/> Ethanamin | |
- 7.10** Schreiben Sie die Aminosäure Prolin in der zwitterionischen Form sowie in der bei pH = 1 vorliegenden Form an.
- 7.11** Geben Sie für nachstehende Verbindungen die Verbindungsklasse an:
- | | | | |
|---|--|--------------------------------------|---|
| $\text{C}_2\text{H}_5-\text{NH}-\text{C}_2\text{H}_5$ | $\text{C}_6\text{H}_5-\text{NH}_2$ | $\text{C}_3\text{H}_7-\text{NO}_2$ | $\text{C}_3\text{H}_7-\text{O}-\text{NO}_2$ |
| $\text{CH}_3-\text{CH}_2-\text{CN}$ | $\text{H}_2\text{N}-\text{CH}_2-\text{COOH}$ | $[\text{N}(\text{CH}_3)_4]\text{Cl}$ | |
- 7.12** Schreiben Sie die Formel des Dipeptids Gly—Ala an.
- 7.13** Ordnen Sie nach steigender Basizität:
- | | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Pyrrol | <input type="checkbox"/> Pyrrolidin | <input type="checkbox"/> Pyridin |
|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|



Stabhochsprung

8 Makromolekulare Substanzen

Was haben ein Baum und ein Stabhochsprungstab gemeinsam? Beide sind aus parallel angeordneten Fasern aufgebaut, die aus Makromolekülen (Riesenmolekülen) bestehen. Beide erzielen damit eine hohe Biegefestigkeit. Stabhochsprungstäbe wurden früher aus Bambusrohr gefertigt, heute bestehen sie aus glasfaserverstärktem Kunststoff. Dass es nicht nur beim Stabhochsprung, sondern ganz allgemein im Sport zu immer neuen Rekorden kommt, ist vielfach eine Folge der Weiterentwicklung des Materials.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Synthese in Natur und Technik** sowie die **allgemeinen Eigenschaften** makromolekularer Stoffe darstellen;
- **Kunststoffe** untersuchen, einteilen und Argumente für diese Einteilung finden;
- die speziellen **Eigenschaften von Kunststofftypen** begründen.

Lange Zeit glaubte man, dass in der Natur alles aus kleinen Molekülen aufgebaut wäre. Später kam die Erkenntnis hinzu, dass viele Stoffe einen Gitteraufbau zeigen. **Hermann Staudinger** erkannte, dass es noch eine weitere Substanzgruppe gibt: Stoffe aus sehr großen Molekülen (Makromolekülen). Zu dieser Gruppe gehören neben etlichen Naturstoffen wie Cellulose, Stärke und Eiweiß sämtliche Kunststoffe. Diesen Stoffen ist gemeinsam, dass sie aus vielfach (griech. „poly“) miteinander verknüpften kleinen Baueinheiten – den Monomeren – bestehen.



Ein Makromolekül entsteht immer aus tausenden Monomeren.

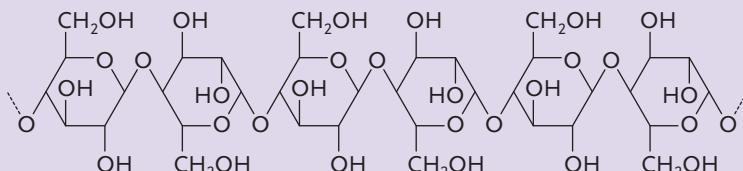
Der Aufbau kann kettenförmig sein, er kann miteinander vernetzte Ketten zeigen oder es kann durch Vernetzung ein einziges Makromolekül entstehen.

HERMANN STAUDINGER, 1881 BIS 1965, DEUTSCHER CHEMIKER, NOBELPREIS FÜR CHEMIE 1953

Meros: griechisch für Teil

8.1 Cellulose und halbsynthetische Kunststoffe

Cellulose ist der am häufigsten vorkommende organische Stoff in der Natur. Etwa die Hälfte der Biomasse ist Cellulose (Zellstoff). Cellulose ist eine durch vielfache Kondensation entstandene Polyglucose. Im Unterschied zu Stärke ist sie unverzweigt und besteht durchgehend aus β -D-Glucose-Einheiten. Dies bedingt ihren nahezu linearen Aufbau (die aus α -D-Glucose aufgebaute Stärke ist verzweigt und spiraling geformt). Die Verknüpfung erfolgt durch Wasserabspaltung zwischen den OH-Gruppen an den C-Atomen 1 und 4 der Glucose.



Cellulose ist ein 1,4-Polykondensat der β -D-Glucose.

Die parallel liegenden Fäden der Cellulosemoleküle werden durch Wasserstoffbrücken zusammengehalten. Der lineare Aufbau prädestiniert die Cellulose als Faserstoff für Pflanzen bzw. für Kleidung. Die Cellulose ist damit ein Vorbild für viele Kunststoffe.

Hergestellt wird Cellulose in Cellulosefabriken entweder nach dem **Sulfit-** oder nach dem **Sulfatverfahren**. Bei beiden Verfahren werden Holzschnitzel mit einer sulfonierenden Lösung behandelt. Die Sulfonierung macht das Lignin (Holzstoff) und die Harze wasserlöslich, während die unlösliche Cellulose übrig bleibt. Die ligninhaltigen, intensiv riechenden Abwässer müssen einer Kläranlage zugeführt werden.

Ein Teil der Cellulose wird zu Papier weiterverarbeitet, ein anderer Teil zu Fasern für Bekleidung sowie zu Hygieneartikeln (z. B. Watte).

Herstellung von Papier

Papiermaschinen sind zum Teil über hundert Meter lang. Der Cellulosefaserbrei wird auf ein endloses, sich ständig bewegendes Drahtsieb aufgebracht. Der größte Teil des Wassers läuft dabei sofort ab. Aus dem gebildeten Faservlies wird zwischen rotierenden Walzen weiteres Wasser herausgepresst. Die Cellulosefasern verfilzen dabei miteinander. Anschließend durchläuft das Papier heiße Walzen zum Trocknen und Glätten und wird schließlich zu Rollen aufgewickelt. Die Papierbahnen laufen dabei mit Geschwindigkeiten von bis zu 130 km/h bei Arbeitsbreiten von etwa 10 m. Eine moderne Papiermaschine produziert über 1 000 Tonnen pro Tag.

Kondensation siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.4.

Stärke siehe Kap. B, 1.3.

Cellulosefabriken werden umgangssprachlich Papierfabriken genannt.

Papierfabriken haben Einwohnergleichwerte um 100 000, d. h., sie würden ohne Kläranlage die Gewässer wie eine Stadt von der Größe Innsbrucks belasten.

Recherchieren Sie, wo in Österreich Papierfabriken stehen und ob sie mit Kläranlagen ausgerüstet sind.



Papiermaschine der Leykam AG (am steirischen Standort in Gratkorn werden über 700 000 t Papier pro Jahr erzeugt)



Überprüfen Sie mit einer stark HCl-sauren Lösung von Anilin, ob Papier holzfrei ist. Mit Lignin tritt Gelbfärbung auf.



Kalk als Füllstoff für Papier und Kunststoffe siehe Kap. A, 8.3.



Recycling von Altpapier siehe NAWI I/II, Kap. E, 8.



Baumwollkapsel

Spinndüsen bestehen aus Platin-Gold-Tantal-Legierungen. In einer Cellulosefabrik ist daher viel Kapital in Form von Spinndüsen gebunden.

Hochwertige Papiere werden aus verschiedenen Holzsorten hergestellt. Nach dem Bleichen der Cellulose mit Wasserstoffperoxid werden in der Papiermaschine Füllstoffe und Leime hinzugegeben. Minderwertige Papiersorten wie Zeitungspapier enthalten einen hohen Anteil an Holzschliff. Sie sind nicht alterungsbeständig, d. h., sie vergilben und werden brüchig.

Der wichtigste Füllstoff ist Kalk. Feinstgemahlener Kalk wird als Slurry (eine stabile Aufschämmung des Feststoffs in Wasser) vom Kalksteinbruch zur Papierfabrik transportiert und dort in der Papiermaschine verarbeitet.

Hochwertiges Papier für den Offsetdruck besteht beispielsweise aus

- 20 % Sulfatcellulose (Kiefer),
- 20 % Sulfitcellulose (Fichte),
- 45 % Sulfitcellulose (Laubholz),
- 15 % Füllstoff und Leim.

Zeitungspapier besteht etwa aus

- 75 % Holzschliff,
- 15 % Sulfitcellulose (Fichte),
- 10 % Füllstoff und Leim.

Kraftpapier (Packpapier) wird in erster Linie aus Sulfatcellulose produziert.

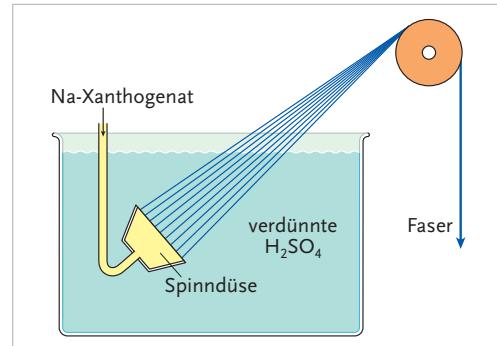
Cellulosefaser

Baumwolle: Aus den Samenhaaren der Baumwollpflanze werden Cellulosefasern gewonnen. Jede Faser besteht aus 20 bis 30 Lagen Cellulose in einer gedrehten Struktur. Nach dem Spinnen wird Baumwolle durch chemische Nachbehandlung (Ausrüstung) haltbarer gemacht.

Die Lenzing AG in Oberösterreich ist (mit Produktionsstätten in aller Welt) der weltweit größte Hersteller von Cellulosefasern auf der Basis von Holz.

Cellulose ist in Wasser und gängigen organischen Lösungsmitteln nicht löslich. Beim **Viskoseverfahren** wird Cellulose mithilfe von Kohlenstoffdisulfid (Schwefelkohlenstoff, CS_2) und Natronlauge (NaOH) gelöst. Die hohe Viskosität (Zähigkeit) der Lösung ist namensgebend für das Verfahren. Aufgrund der Giftigkeit und hohen Entzündlichkeit von CS_2 muss in geschlossenen Kreisläufen gearbeitet werden.

Die Lösung (das Natriumxanthogenat) wird durch **Spinndüsen** in ein Fällbad aus verdünnter Schwefelsäure gedrückt. Jede Spinndüse besteht aus einer Lochplatte mit über 100 000 feinen Bohrungen. Durch die Schwefelsäure wird die Cellulose ausgefällt, d. h., sie erstarrt zu langen Fäden. Das CS_2 wird in den Prozess zurückgeführt.



Die Fäden werden gestreckt, um die Cellulosemoleküle parallel anzuordnen und damit die notwendige Festigkeit zu erzielen. Stoffe aus Viskosefasern sind leicht zu verarbeiten und angenehm zu tragen.

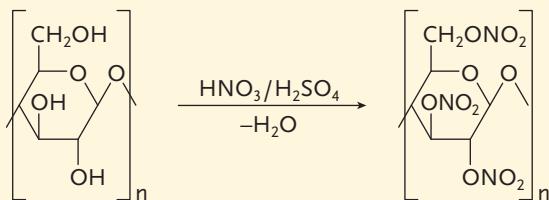
Das **Lyocellverfahren** wurde von der Lenzing AG entwickelt und in einer Fabrik in Heiligenkreuz (Burgenland) großtechnisch umgesetzt. Dieses Verfahren arbeitet mit einem Morpholinoxid (NMO) als Lösungsmittel für die Cellulose. NMO ist

ungiftig und damit umweltfreundlich, aber teurer als CS_2 . Zur Ausfällung der Cellulosefäden beim Austritt aus der Spinddüse genügt die Verdünnung mit Wasser. Textilien aus Lyocell sind weich und knittern weniger als Baumwolle.

Cellulosenitrate

Wenn ein Teil der Hydroxygruppen der Cellulose mit Salpetersäure verestert wird, entsteht der Kunststoff **Celluloid**. Er wurde früher als Material für Filme eingesetzt. Wegen der Feuergefahr wurde diese Verwendung verboten. Tischtennisbälle werden aus Celluloid hergestellt. Wenn alle Hydroxygruppen der Cellulose mit Salpetersäure verestert werden, entsteht Cellulosetrinitrat (Schießbaumwolle, CN), das wegen seiner Gefährlichkeit als Kunststoff nicht mehr verwendet wird.

Dreifache Nitrierung jeder Glucoseeinheit der Cellulose mit einem Nitriermisch aus Salpetersäure und Schwefelsäure liefert Cellulosetrinitrat.



Patronen für Pistolen und Gewehre enthalten CN als rauchloses Schießpulver.

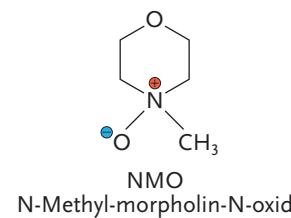
Celluloseacetat

Durch vollständige Veresterung aller Hydroxygruppen der Cellulose mit Ethansäure (Essigsäure) entsteht **Celluloseacetat** (genauer: Cellulosetriacetat, CA). Aus diesem Kunststoff werden Folien hergestellt. Die Hauptverwendung liegt in der Bekleidungsindustrie als Kunstseide, weil die Fasern sehr glatt sind und wie Seide glänzen.



Ziele erreicht? – „Cellulose und halb synthetische ...“

- 8.01** Worin besteht der Unterschied in Aufbau und Eigenschaften von Stärke und Cellulose?
- 8.02** Was sind (von Wasser und Harzen abgesehen) die beiden Hauptbestandteile von Holz?
- 8.03** Geben Sie die Formel von Kalk (Calciumcarbonat) an.
- 8.04** Welche Verfahren wurden entwickelt, um aus Cellulose Faserstoffe für Bekleidungszwecke herzustellen?
- 8.05** Warum erstarrt die Viskose (Xanthogenatlösung) beim Eintritt in das Fällbad (in verdünnte Schwefelsäure) zu einem festen Cellulosefaden?
- 8.06** Warum müssen Spinddüsen aus einer teuren Edelmetalllegierung gefertigt sein?
- 8.07** Wie sieht ein Formelausschnitt aus einer Kette von Cellulosetriacetat aus?



Entzünden Sie einen Tischtennisball auf einer feuerfesten Unterlage.



Kaum zu glauben – man fertigte Puppen aus Celluloid und trug sogar Kleidung aus CN!



Faschingsseide ist Celluloseacetat



Wie kann man die geringe Hitzebeständigkeit der Kunststoffe begründen?



Cracken siehe Kap. A, 2.



Streng genommen sind Polymere ausschließlich die Produkte einer Polymerisation. Allerdings werden oft auch die Produkte von Polykondensationen (die Polykondensate) und von Polyadditionen (die Polyaddukte) unter dem Begriff Polymere zusammengefasst. Der Begriff Polymerisationsgrad wird ebenfalls bei allen drei Herstellungsmethoden verwendet.



Beim Erwärmen eines Polymergranulates beobachtet man das allmähliche klebrige Weichwerden beim Übergang zur Schmelze. Beim Erkalten erstarrt der Kunststoff in der neuen Form.

8.2 Vollsynthetische Kunststoffe

Kunststoffe haben wegen ihrer geringen Dichte sowie der günstigen mechanischen, chemischen und elektrischen Eigenschaften einen breiten Anwendungsbereich. Die wichtigen Massenkunststoffe sind billig herzustellen, leicht einzufärben und leicht zu verarbeiten. Nachteilig ist ihre meist geringe thermische Belastbarkeit.

Die vollsynthetischen Kunststoffe werden auf petrochemischer Grundlage hergestellt. Die Grundbausteine dieser Polymere sind kleine Moleküle, genannt Monomere. Sie werden in der Raffinerie hauptsächlich durch das thermische Cracken hergestellt.

Die Kunststoffe können nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden. Die zwei bedeutendsten sind

- die Herstellungsmethode und
- die Art der Verknüpfung.

Herstellungsmethoden

Die drei wichtigsten **Herstellungsmethoden** sind

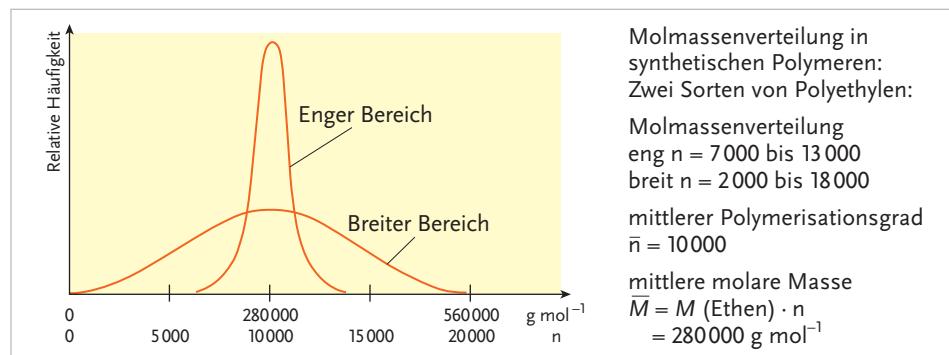
- die **Polymerisation**,
- die **Polykondensation**,
- die **Polyaddition**.

Produkte von Polymerisationen nennt man Polymere.

Der mittlere **Polymerisationsgrad** gibt an, wie viele Monomere durchschnittlich ein Polymermolekül bilden.

Er liegt bei den üblichen Kunststoffen im Bereich einiger Tausend. Die Viskosität der Lösung oder Schmelze eines Kunststoffs lässt Rückschlüsse auf den Polymerisationsgrad zu.

Die Eigenschaften von Polymeren mit gleichem mittlerem Polymerisationsgrad unterscheiden sich in Abhängigkeit von der Verteilung der tatsächlichen Kettenlängen um diesen Mittelwert. Wenn die meisten Moleküle ungefähr gleiche Polymerisationsgrade (d. h. ähnliche molare Massen) aufweisen, spricht man von einer engen Molmassenverteilung (MMV).



Niedrige molare Massen (Molmassen) begünstigen die Fließfähigkeit der Schmelze und damit die Verarbeitbarkeit. Hohe molare Massen bedingen bessere mechanische Eigenschaften.

Substanzen, die aus identischen Molekülen aufgebaut sind, zeigen einen scharfen Schmelzpunkt. Da aber Kunststoffe ein Gemisch von Molekülen unterschiedlicher Kettenlängen sind, zeigen sie keinen exakten Schmelzpunkt, sondern werden beim Erwärmen weich und zerfließen allmählich (ähnlich wie Butter).

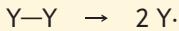
Polymerisation

Bei der Polymerisation entstehen Makromoleküle aus Monomeren, die zumindest je eine Doppelbindung im Molekül aufweisen. Die π -Bindungen der Monomeren werden geöffnet, worauf ein Zusammenschluss zu langen (eventuell leicht verzweigten) Ketten erfolgt.

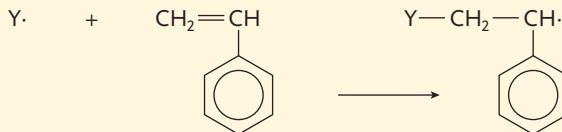
Die Polymerisation ist eine Addition vieler gleichartiger Moleküle aneinander. Sie erfolgt meist nach einem A_R -Mechanismus.

A_R -Mechanismus am Beispiel der Polymerisation von Styren (Ethenylbenzen):

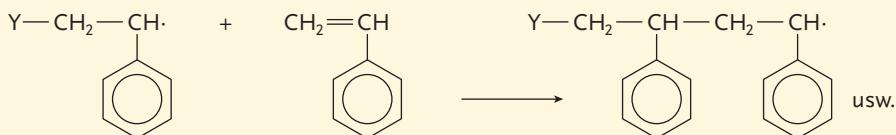
1. Ein Radikalkettenstarter $Y-Y$ wird in Radikale zerlegt.



2. Das $Y\cdot$ -Radikal greift die π -Bindung des Monomermoleküls an, wodurch ein Kohlenwasserstoffradikal entsteht.



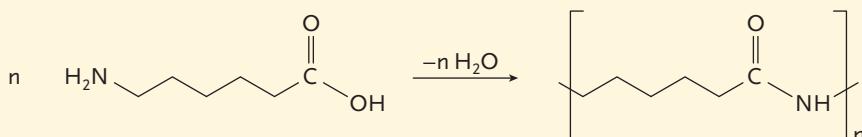
3. Das Kohlenwasserstoffradikal greift die nächste π -Bindung an, womit das Kettenwachstum beginnt (viele weitere dieser Schritte folgen).



Polykondensation

Bei der Polykondensation müssen an den Enden der Monomermoleküle funktionelle Gruppen vorliegen, die miteinander unter Abspaltung kleiner Moleküle reagieren. Diese als Nebenprodukt entstehenden Moleküle (meist Wasser, aber auch Hydrogenchlorid, Ammoniak u. a.) müssen aus dem Reaktionsgleichgewicht entfernt werden, damit die Bildung der Makromoleküle nicht vorzeitig gestoppt wird.

Entstehung des Polyamid-6 (Perlon) aus 6-Amino-hexansäure:



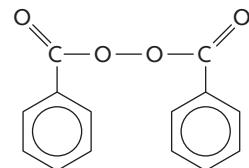
Die Zahl 6 ist ein Hinweis auf die sechs C-Atome des Monomermoleküls.

Polyaddition

Die Polyaddition ist eine Addition verschiedener Moleküle aneinander. Es entsteht kein Nebenprodukt.



Der Radikalkettenstarter Dibenzoylperoxid reißt leicht zwischen den beiden Sauerstoffatomen und wird wegen seiner thermischen Empfindlichkeit immer mit 20 % Wasser aufbewahrt.



Styren wird mit ein wenig Dibenzoylperoxid (50 : 1) erhitzt. Nach einigen Minuten wird die Mischung durch Bildung von Polystyren zäh.



Das Erhitzen einer kleinen Menge von Dibenzoylperoxid im Reagenzglas führt zur Verpuffung.

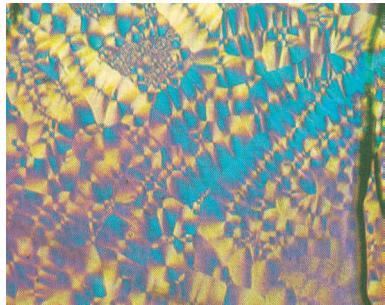
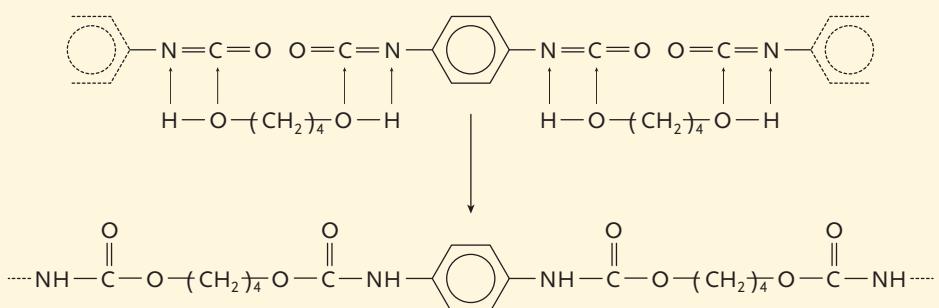


Gleichgewicht siehe NAWI I/II, Kap. C, 3.3.



Welcher aus Makromolekülen bestehende Naturstoff zeigt die gleiche Art der Verknüpfung wie Polyamid?

Entstehung eines Polyurethans aus Butan-1,4-diol und 1,4-Phenylendiisocyanat als Beispiel einer Polyaddition: Entsprechend den Polaritäten geht H an N und O an C.



Thermoplast: Der Übergang vom festen zum geschmolzenen Zustand ist allmählich (erweichendes PA im polarisierten Licht)

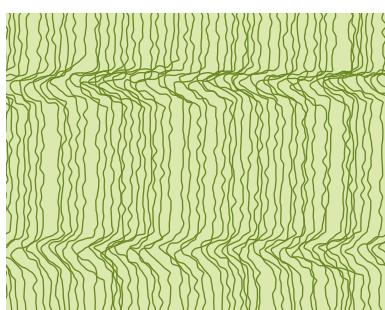
Molekülordnung in Thermoplasten:



Verknäult (amorph)



Teilkristallin



Teilkristallin (verstreckt)

Verknüpfungsarten

Durch die drei wichtigsten **Arten der Verknüpfung** entstehen

- **Thermoplaste** (Plastomere),
- **Elastomere**,
- **Duromere**.

Die Art der Verknüpfung bedingt die mechanischen und thermischen Eigenschaften eines Kunststoffs.

Verhalten beim Erhitzen:

| | Steigende Temperatur → | | | | |
|--------------|-------------------------------|----------------------------|---------------|------------|------------|
| Thermoplaste | glasig spröde | Gebrauchs- bereich | weich formbar | Schmelze | Zersetzung |
| Elastomere | glasig spröde | Gebrauchsbereich elastisch | | | Zersetzung |
| Duromere | Gebrauchsbereich hart, spröde | | | Zersetzung | |

Thermoplaste

Thermoplaste sind Kunststoffe mit einem linearen oder schwach verzweigten Molekülaufbau. Bereits vor dem Schmelzen werden sie weich und klebrig. In diesem erwärmteten Zustand können sie sehr gut durch Walzen oder Pressen geformt werden.

Die **Molekülordnung** hat großen Einfluss auf die Eigenschaften eines Kunststoffs. Wenn keine Molekülordnung vorliegt, ist der Kunststoff amorph. Die Fadenmoleküle liegen in verknäuelter Form vor. Rein amorphe Kunststoffe können glasklar durchsichtig sein. Kunststoffe, die aus stark verzweigten Molekülen bestehen, sind immer amorph.

Abhängig von den Abkühlbedingungen können Thermoplaste aus weitgehend parallel orientierten Molekülen bestehen oder sie können teilweise kristalline Bereiche (Lamellen) ausbilden.

Bei Faserkunststoffen kann durch Verstrecken der Kunststofffäden der Kristallisationsgrad gesteigert werden. Parallel Ketten üben aufeinander Van-der-Waals-Kräfte aus oder sind durch Wasserstoffbrücken miteinander verbunden.

Teilkristalline Kunststoffe sind immer trüb. Sie haben eine höhere Dichte und bessere mechanische Eigenschaften als amorphe Kunststoffe.

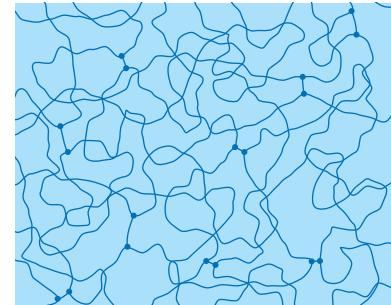
Die vier wichtigsten Kunststoffe sind **Thermoplaste**. Es handelt sich dabei um die Polymeren **PE, PP, PS und PVC**. Bei den Polykondensaten entstehen Thermoplaste, wenn der Kunststoff aus linearen Molekülen besteht. Dies ist der Fall, wenn er aus einem Monomer mit zwei verschiedenen funktionellen Gruppen aufgebaut ist (z. B. Polyamid-6) oder aus zwei unterschiedlichen Monomeren, die an den Enden jeweils gleiche funktionelle Gruppen aufweisen (z. B. Polyamid-6,6).

Elastomere

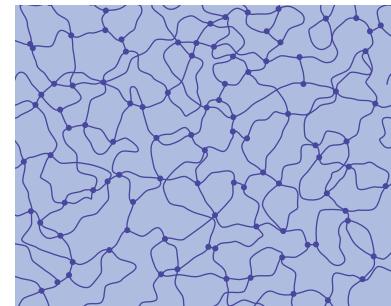
Elastomere sind Kunststoffe, bei denen die Molekülketten in einem geringen Ausmaß miteinander vernetzt sind. Wenn Elastomere einer Zugbelastung ausgesetzt sind, werden die Bindungswinkel verformt. Die Vernetzung sorgt dafür, dass die Ketten nicht aneinander vorbeigleiten können. Bei Nachlassen der Belastung stellen sich die ursprünglichen Winkel wieder ein. Das Zurückkehren in die ursprüngliche verknäulte Form ist auch damit erklärbar, dass diese Form mehr Entropie hat als eine gestreckte. Das **wichtigste Elastomer** ist **Gummi**.



Gummi und Buna siehe
Kap. A, 2.5.



Elastomer
(grobmaschige Vernetzung)



Duromer
(engmaschige Vernetzung)

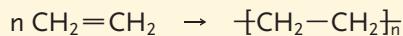
Duromere

Duromere (früher: Duroplaste) entstehen, wenn in den Monomeren mehr als zwei funktionelle Gruppen vorliegen. Sie sind Kunststoffe, die einen engmaschig dreidimensional vernetzten Molekülaufbau zeigen.

Da Duromere nicht thermoplastisch sind, müssen sie in einer dem endgültigen Werkstück entsprechenden Form erzeugt werden. In der Form entsteht ein einziges durchgehendes Riesenmolekül. Eine nachträgliche Änderung der Form ist thermisch nicht mehr möglich, weil Duromere weder weich werden noch schmelzen, sondern sich bei höherer Temperatur zersetzen.

Beispiele für Polymere

Polyethylen (Polyethen, PE)



PE ist der am häufigsten verwendete Kunststoff.

Ethen ist ein relativ billiges Gas, das beim thermischen Cracken bestimmter Fraktionen der Rohöldestillation anfällt.

Bei der Erzeugung von Polyethylen nach dem Hochdruckverfahren (1 500 bis 2 000 bar; 200 °C) erhält man PE niedriger Dichte (LDPE), bei der Herstellung nach dem Niederdruckverfahren PE höherer Dichte (HDPE). Dies ist zunächst paradox, da hoher Druck zu hoher Dichte führen sollte. Der Grund dafür ist, dass durch die extremen Bedingungen des Hochdruckverfahrens einige der Bindungen aufgerissen und neu geknüpft werden. Die entstandenen Verzweigungen wirken wie Abstandhalter von einer Molekülkette zur nächsten. Sie verringern die Dichte und auch die Festigkeit.

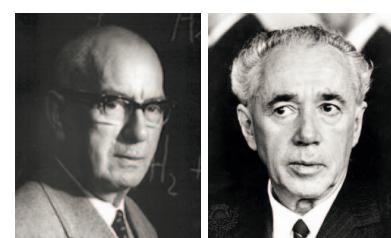
Das **Niederdruckverfahren** (1 bis 50 bar; etwa 100 °C) wurde vom Deutschen **Karl Ziegler** und dem Italiener **Giulio Natta** 1953 (20 Jahre nach dem Hochdruckverfahren) entwickelt. Die Polymerisation wird dabei von metallorganischen Verbindungen katalysiert und gesteuert. Das Resultat sind nahezu verzweigungsfreie Polymerketten. Die linearen Moleküle bilden leicht teilkristalline Strukturen, womit die Festigkeit gesteigert wird.



Ethen- und Benzenbaum
siehe Kap. A, 2.2 und 2.6.

Eigenschaften von PE

- Thermoplastisch
- $\rho = 0,91$ bis $0,97 \text{ g/cm}^3$
- Anwendung bis ca. 80 °C
- Guter Isolator
- Beständig gegen Säuren, Basen und viele Lösungsmittel



KARL ZIEGLER, 1898 BIS 1973,
UND GIULIO NATTA, 1903 BIS
1979, GEMEINSAMER NOBELPREIS
FÜR CHEMIE 1963

Verwendung von PE: für Behälter, Flaschen, Tragetaschen, Folien, Rohre ...

Eigenschaften von PP

- Ähnlich PE
- Härter und steifer als PE
- $\rho = 0,89$ bis $0,92 \text{ g/cm}^3$
- Anwendung bis ca. 100°C

Polypropylen (Polypropen, PP)

PP ist der leichteste aller Kunststoffe. Mithilfe geeigneter Katalysatoren erreicht man, dass die Methylgruppen nicht ungeordnet von der Kette abstehen, sondern alle in die gleiche Richtung zeigen. Dieses isotaktische Polypropylen zeichnet sich durch erstklassige mechanische Eigenschaften aus.

Verwendung von PP: für Behälter, Flaschen, Rohre, Funktionstextilien ...

Eigenschaften von PS

- Glasklar, spröde
- $\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$
- In vielen organischen Lösungsmitteln löslich



Styropor wird von Aceton regelrecht zerfressen.

Polystyren (Polystyrol, PS)

PS ist immer amorph und daher glasklar und spröde. **Geschäumtes PS** nennt man **EPS** (expandiertes PS) oder **Styropor**. Dazu werden dem Vorprodukt Stoffe zugesetzt, die beim Erwärmen Gasblasen entwickeln. Die Dichte kann damit bis $0,015 \text{ g/cm}^3$ gesenkt werden.

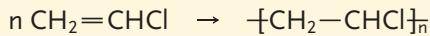
Verwendung von PS: für Becher (ungeschäumt z. B. für Joghurt, geschäumt für warme Getränke), Dämmstoffplatten, Geodreiecke ...

Eigenschaften von PVC

- Guter Isolator
- $\rho = 1,2$ bis $1,4 \text{ g/cm}^3$
- Chemikalienfest
- Nicht brennbar
- Kann geschweißt werden



PVC-Recycling siehe Kap. C, 2.

Polyvinylchlorid (Polychlorethen, PVC)

Das monomere Vinylchlorid ist aus Ethen leicht herstellbar. Weil Vinylchlorid (Chlorethen) krebserregend ist, muss die Polymerisation in geschlossenen Apparaturen erfolgen. PVC ist ungiftig. Es ist in reiner Form hart und spröde. Durch Weichmacher und Stabilisatoren wird es weich und formbar gemacht. Seine Dichte ist höher als die anderer Kunststoffe. Bei der Verbrennung von PVC entsteht Hydrogenchlorid bzw. Salzsäure. Daher müssen Müllverbrennungsanlagen mit Säurewäschnern ausgerüstet sein.

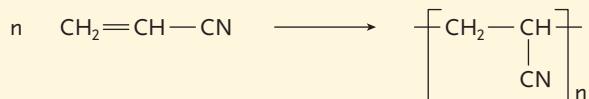
Verwendung von PVC: für Bodenbeläge, Rohre, Fensterprofile, Blutbeutel ...

Eigenschaften von PAN

- Wollähnlich
- Hitzeempfindlich
- Gut einfärbbar



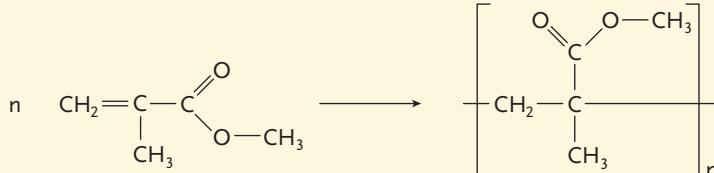
DMF siehe Kap. A, 7.1.

Polyacrylnitril (Acryl, PAN)

Polyacrylnitril war zunächst ohne Bedeutung, bis man ein Lösungsmittel (DMF) fand, mit dessen Hilfe man den Kunststoff durch Spinddüsen drücken kann. Der Faserstoff wird meist mit Baumwolle oder Wolle gemischt zu Textilien verarbeitet. Gewebe aus PAN dürfen nur mit einer Temperatur von maximal 40°C gewaschen und nicht heiß gebügelt werden.

Verwendung von PAN: für wollähnliche Fasern, Seile ...

Polymethylmethacrylat (Acrylglas, PMMA)



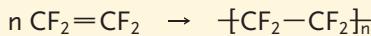
Die Polymerisationsgleichung zeigt, dass einzig die π -Bindung der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Doppelbindung reagiert.

PMMA (Handelsname Plexiglas) ist ähnlich transparent wie Polystyren, aber wesentlich elastischer. Es ist kratzunempfindlicher als andere Thermoplaste, aber deutlich weniger kratzfest als Glas (Mineralglas).

Verwendung von PMMA: für Flugzeug- und Schutzscheiben, Kontaktlinsen, Brillen ...

Eine Variante des PMMA ist das **Polycyanacrylat**, bei dem die Methylgruppe durch eine Nitrilgruppe ersetzt ist. Das Monomer ist als Superkleber bekannt. Die beim Kleben erfolgende Polymerisation wird durch Feuchtigkeit katalysiert. Dabei ist Vorsicht angebracht, da (feuchte) Haut besonders gut verklebt.

Polytetrafluorethen (PTFE)



PTFE (Handelsname Teflon) ist ein Spezialkunststoff, dessen Herstellung und Verarbeitung teuer sind. Die Bindung zwischen Kohlenstoff und Fluor ist wegen der hohen Differenz der Elektronegativitäten sehr stark. PTFE besteht zwar aus linearen Makromolekülen, doch ist es nicht thermoplastisch, weil sein theoretischer Schmelzpunkt höher liegt als die Zersetzungstemperatur der Kohlenstoff-Kohlenstoff-Bindung. PTFE muss daher durch Sintern (Pressen des Pulvers unter hohem Druck und Temperatur) in die gewünschte Form gebracht werden. PTFE wird selbst von Flussäure und Königswasser nicht angegriffen. Es wird aufgrund seiner geringen Benetzbarkeit und guten Hitzebeständigkeit als Antihaftbeschichtung verwendet.

Verwendung von PTFE: für die Beschichtung von Bratpfannen, Funktionsbekleidung (Handelsname Goretex), Laborgeräte, Implantate ...

Eigenschaften von PMMA

- Lichtdurchlässiger als Glas
- $\rho = 1,2 \text{ g/cm}^3$
- Elastisch
- Spannungsrissempfindlich



Scheinwerferglas aus PMMA



Superkleber



Pfanne mit PTFE-Beschichtung

Beispiele für Polykondensate

Polyethylenterephthalat (PET, PETP)

PET ist ein Polyester, der aus den Monomeren Terephthalsäure (Benzol-1,4-dicarbonsäure) und Glycol (Ethan-1,2-diol) durch Polykondensation hergestellt wird. Die Reaktion kann so gelenkt werden, dass das Produkt amorph und damit transparent ist.

Eigenschaften von PTFE

- Nicht thermoplastisch
- $\rho = 2,2 \text{ g/cm}^3$
- Hitzebeständig bis ca. 300 °C
- Sehr chemikalienresistent

Eigenschaften von PET

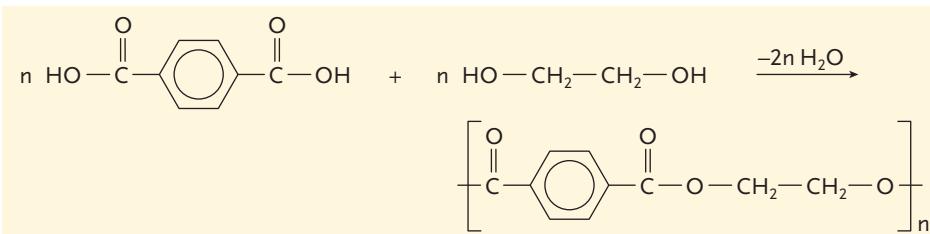
- Thermoplastisch
- $\rho = 1,4 \text{ g/cm}^3$
- Formbeständig bis 80 °C
- Bruchfest



Siehe ungesättigte Polyester.



Kunststoffrecycling siehe Kap. C, 3.





Segel aus Polyester

Eigenschaften von PC

- Schlagzäh, steif
- Hochtransparent
- Guter Isolator



Astronaut mit Helmvisier aus PC



Wolle und Seide sind aus Aminosäuren kondensierte natürliche Polyamide (Polypeptide).



Aus welchem Material ist Ihre Oberbekleidung? Sehen Sie auf dem Etikett nach.

Eigenschaften von PA

- Steif, zäh
- $\rho = 1,0$ bis $1,3 \text{ g/cm}^3$
- Reißfest
- Schlecht brennbar



Geschichte von Nylon und Perlon; Mechanismus der Perlonherstellung; Experiment zur Herstellung von Nylon.

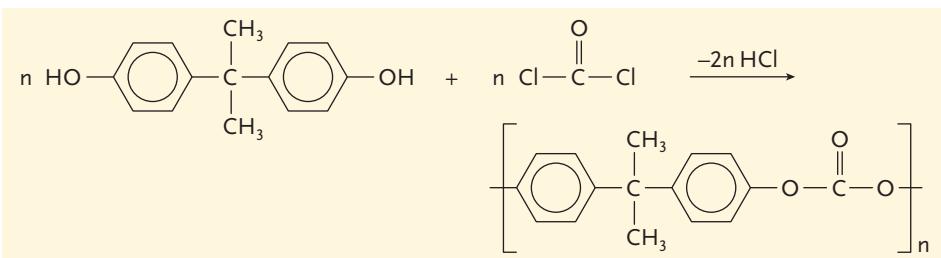
Als Faserstoff für Bekleidung wird **PET** im Sprachgebrauch als Polyester bezeichnet (**Handelsname z. B. Trevira**). Polyethylenterephthalat lässt sich eindimensional zu Fasern, zweidimensional zu Folien und dreidimensional zu Formkörpern (z. B. zu transparenten Getränkeflaschen) verarbeiten.

Verwendung von PET: für Flaschen, Textilfasern, Folien ...

PET-Flaschen sind leicht, nicht bruchanfällig und recyclingfähig.

Polycarbonat (PC)

Polycarbonat ist ebenfalls ein Polyester. Das gängigste Polycarbonat wird aus Bisphenol A und Phosgen unter Abspaltung von Hydrogenchlorid hergestellt. Dabei sind umfangreiche Sicherheitsmaßnahmen notwendig, denn Phosgen (Kohlensäurechlorid) ist sehr giftig. Es ist ein Kampfgas, das im Ersten Weltkrieg eingesetzt wurde.



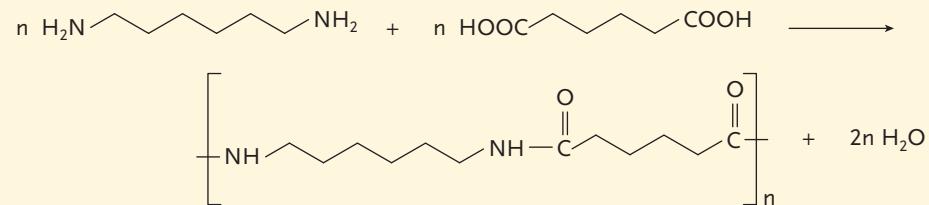
Die thermoplastischen Polycarbonate zeigen einen linearen Aufbau, sind aber trotzdem kaum kristallin. Daher sind Werkstücke aus PC hochtransparent. PC ist kratzfester und weniger zerbrechlich als PMMA, aber teurer.

Verwendung von PC: für Flugzeugscheiben, Glasdächer, Linsen, Brillen, Reflektoren, Lichtwellenleiter, CDs ...

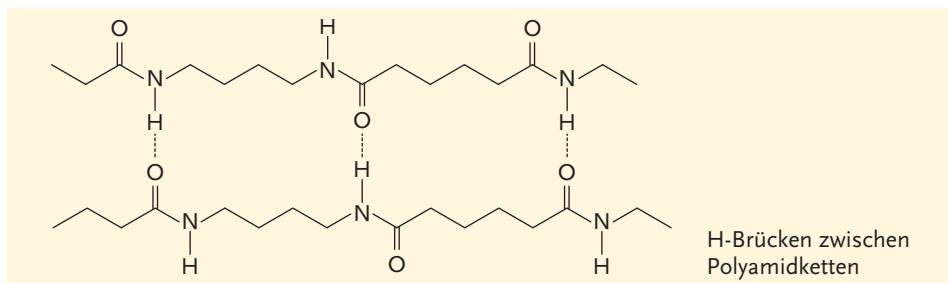
Polyamide (PA)

Polyamide entstehen durch Polykondensation von Amino- mit Carboxygruppen. Dabei bildet sich die Amidgruppe $-\text{CO}-\text{NH}-$ als Wiederholungseinheit.

Das berühmteste Polyamid ist **Nylon**, weil es als erster Kunststoff die Herstellung dünner Damenstrümpfe ermöglichte. Nylon (Polyamid-6,6) wird im Unterschied zu Perlon aus zwei bifunktionellen Ausgangsstoffen, nämlich Hexan-1,6-diamin und Hexandisäure, hergestellt.



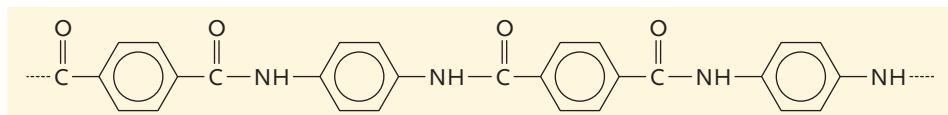
Polyamidketten sind über Wasserstoffbrücken miteinander verbunden. Daher ist die Festigkeit der Polyamide höher als die anderer Kunststoffe. Die Reißfestigkeit macht Polyamide zum idealen Material für Textilfasern und Seile.



Aufgrund seiner guten Fähigkeit zur Bildung von Wasserstoffbrücken nimmt PA gerne zwei bis drei Prozent Wasser auf. Daher ist PA als Isolator weniger geeignet als andere Kunststoffe.

Verwendung von PA: für Textilien, Seile, Zahnräder, Lager, Rollen, Dübel ...

Eine Besonderheit stellen die **Aramide** (aromatischen Polyamide) dar.

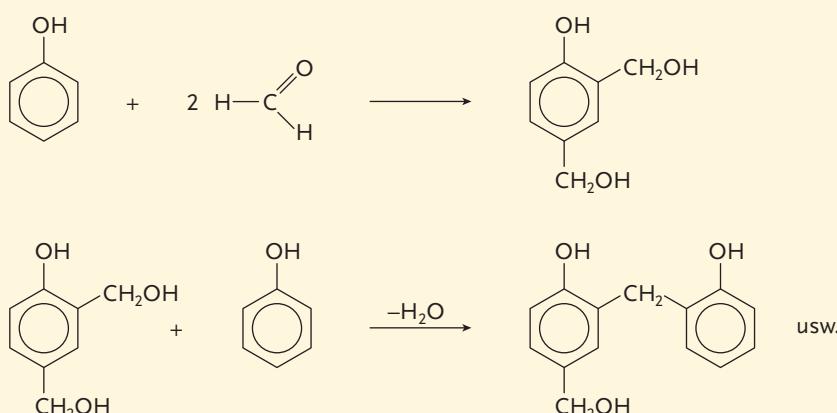


Sie zeichnen sich durch besondere Zugfestigkeit, enorme Hitzebeständigkeit (bis 400 °C) und auch hitzeabweisende Eigenschaften aus. Aramide verwendet man u. a. anstelle des früher gebrauchten krebserregenden Asbestes: für hitzefeste Textilien für Feuerwehrleute, Bremsbeläge, aber auch schusssichere Westen und Helme (**Handelsname Kevlar**).

Phenoplaste (PF) und Aminoplaste (UF, MF)

Phenoplaste und Aminoplaste sind die klassischen Kunstharze. Sie entstehen durch Kondensationsreaktionen von Phenolen oder Aminen mit Methanol (Formaldehyd).

PF: Zwei bis drei H-Atome des Phenols werden substituiert, wodurch eine dreidimensionale Vernetzung über CH₂-Brücken erfolgt.



Bei schwacher Vernetzung entstehen Rohstoffe für die Lackindustrie. Bei starker Vernetzung erhält man typische Duromere. Die Phenoplaste sind temperaturbeständiger als die Aminoplaste, haben aber den Nachteil, im Laufe der Zeit zu vergilben.

Verwendung von PF: für kleine Behälter, als Bindemittel für Schleifscheiben ...



Anwendungen von Nylon- bzw. Perlonfasern



Schutzweste aus Kevlar



Methanal siehe Kap. A, 5.

Eigenschaften von PF

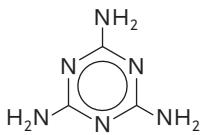
- Hart, bruchfest
- $\rho = 1,3$ bis $1,4 \text{ g/cm}^3$
- Dunkelt nach



Herstellung von Bakelit (einer der ältesten Kunststoffe): Resorcin mit Formalin und einem Tropfen konzentrierter HCl als Katalysator ergibt bei gelindem Erwärmen spontan Bakelit.

Eigenschaften von UF und MF

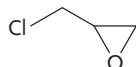
- Ähnlich PF
- Lichtecht
- Hitzeempfindlicher als PF



Melamin



Elektroinstallation aus UF

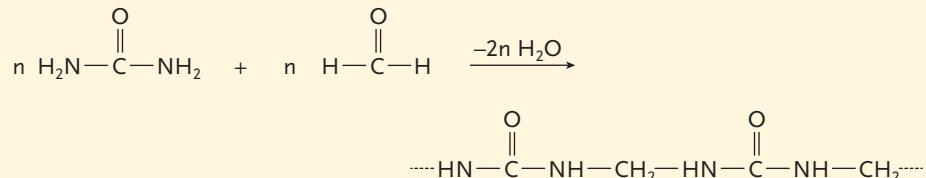


Epichlorhydrin ist wegen des dreigliedrigen Ringes sehr reaktiv und krebserregend.

Eigenschaften von EP

- Hochfest, vor allem im Verbund mit anorganischen oder organischen Faserstoffen
- Guter Isolator

Bei den Aminoplasten unterscheidet man je nach Aminkomponente zwischen den Harnstoff-Formaldehyd-Harzen (UF) und den Melamin-Formaldehyd-Harzen (MF). Das „U“ in UF leitet sich vom Lateinischen „urea“ (Harnstoff) ab.

UF: Vernetzung von Harnstoff (Kohlensäurediamid) mit Methanal

Die Quervernetzung ist möglich, weil die NH-Gruppe des linearen Polykondensates mit weiterem Methanal kondensieren kann.

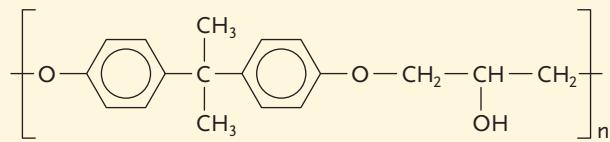
MF: Vernetzung von Melamin mit Methanal

Verwendung von UF: für Spanplatten, Elektroinstallationsmaterialien ...

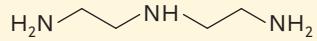
Verwendung von MF: für Spanplatten, Beschichtungen ...

Beispiele für Polyaddukte**Epoxidharze (Epoxyharze, EP)**

Epoxidharze werden durch Reaktion von Bisphenol A an Epichlorhydrin hergestellt. Der instabile Oxiranring (Ethylenoxid, Epoxid) des Epichlorhydrins wirkt ähnlich wie eine Doppelbindung. Bei Ringöffnung wird an die frei gewordenen Bindungen addiert.

Epoxidkette nach Addition von Bisphenol A an Epichlorhydrin und Abspaltung von Hydrogenchlorid:

Dieses Vorprodukt (Basisharz) kommt in den Handel und wird vom Anwender mithilfe eines Härters über die Hydroxygruppen quervernetzt. Als Härter wird meist Diethylentriamin verwendet.

Diethylentriamin

Epoxidharze sind relativ teuer. Sie sind nicht recyclingfähig.

Verwendung von EP: für Lacke, Gießharze, Klebharze, im Flugzeug- und Bootsbau, für Hochspannungsisolatoren, Ski ...

Polyurethan (PU, PUR)

Polyurethane werden gebildet, wenn ein Diol ($\text{HO}-\text{R}-\text{OH}$) an ein Diisocyanat ($\text{OCN}-\text{R}-\text{NCO}$) addiert wird. Durch die Polyaddition bildet sich an jeder Verknüpfungsstelle die charakteristische Urethangruppe $-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$.

Eigenschaften von PU

- Sowohl als synthetischer Gummi als auch für harte Oberflächen geeignet
- Gut schäumbar

Lineares Polyurethan



Durch geeignete Wahl der Ausgangsstoffe kann man Polyurethane produzieren, die sich sehr gut quervernetzen lassen. Polyurethane können daher bei der Herstellung so modifiziert werden, dass sie entweder weich und elastisch oder hart und spröde sind.

Auch die Herstellung von PU-Schaum kann so gelenkt werden, dass als Produkt entweder ein dauerelastischer Weichschaum oder ein harter Montageschaum entsteht. **Weichschläume** werden **offen** hergestellt, **Hartschäume** mit **geschlossenen Poren**. Beide Typen werden im Handel ein- oder zweikomponentig angeboten.

Als Zellgas diente früher das die Ozonschicht schädigende Trichlorfluormethan (R 11). Es wurde durch ein Gemisch aus Kohlenstoffdioxid und Cyclopentan ersetzt. Letzteres macht aber wiederum den Einsatz von Flammenschutzmitteln erforderlich.

Verwendung von PU: für Lacke, Kunstkautschuk, Vergussmassen, Ski, Lederersatz, Schuhsohlen, Klebstoffe, Weich- und Hartschaum (Matratzen, Skischuhe, Türfüllungen), Fasern (Elastan für dehnbare Sportbekleidung) ...



Spraydose mit PU-Schaum

Spezielle Kunststoffe

Copolymerisate

Um auf Kundenwünsche exakt einzugehen, ist bei den Kunststoffen eine Vielzahl von Varianten allein dadurch möglich, dass man verschiedene Monomere in geeignetem Verhältnis miteinander zur Reaktion bringt.

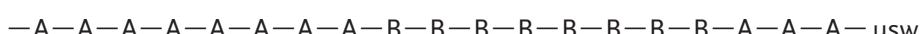
Bei der radikalischen Copolymerisation erhält man üblicherweise eine statistische Verteilung der ehemaligen Monomere im Polymerisat:



Durch gezielte Wahl der Reaktionsbedingungen kann man eine alternierende Verteilung der Kettenbausteine erreichen:



Durch abwechselnde Zugabe der Monomere kann es zur Blockcopolymerisation kommen. Der Kunststoff besteht aus Segmenten (Blöcken):



Die Segmente sind deutlich länger als hier dargestellt.

Die Lösungsmittelbeständigkeit von Polystyren kann durch Copolymerisation von Styren mit relativ wenig Acrylnitril deutlich verbessert werden. Die Abkürzung für diesen neuen Kunststoff lautet **SAN** (Styrol-Acrylnitril-Copolymer). SAN ist transparent und steif.

Wenn man die Sprödigkeit von SAN mildern und seine Schlagzähigkeit (z. B. für Gehäuse) erhöhen will, muss zusätzlich Butadienkautschuk verwendet werden. Dieser Kunststoff wird als Acrylnitril-Butadien-Styren-Copolymer bezeichnet, abgekürzt **ABS**.

Je 1 cm hoch Desmodur und Desmophen, in einem Becher gemischt, ergeben in kurzer Zeit einen Hartschaum.



Elastan ist ein Blockcopolymerisat aus Polyethylenglycol und Polyurethan. Diese Faser für Sportbekleidungen kann auf das Siebenfache gedehnt werden.

SAN kann in der Montage nur geschraubt werden. ABS kann auch geclipst werden.

Wenn fertige Kunststoffe zu einem neuen Stoff gemischt werden, spricht man hingegen von einem **Mischpolymerisat**.

Eigenschaften von UP

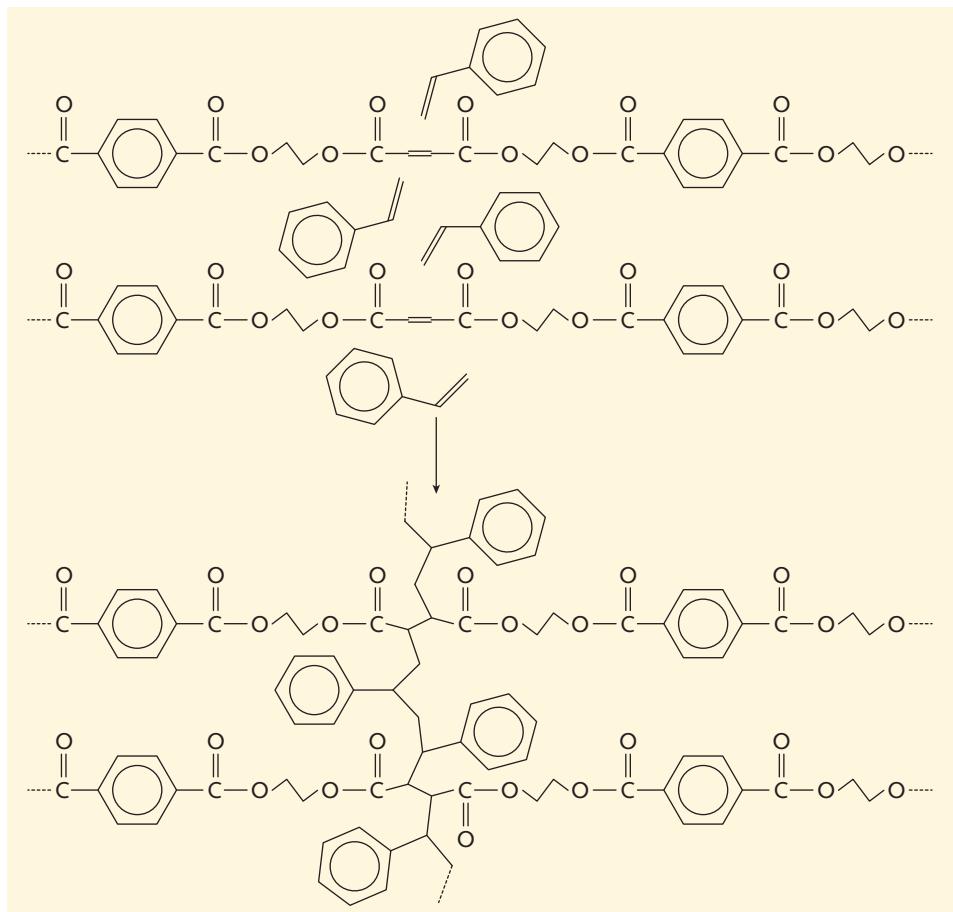
- Duromer
- Hohe Festigkeit (vor allem mit Faserverstärkung, z. B. mit Glasfasermatten)



Set (Polyester, Härter, Glasfaser) für die Ausbesserung von rostigen Autoblechen

Ungesättigte Polyester (UP)

In einer linearen Polyestererkette können beispielsweise außer Terephthalsäure auch Moleküle der Butendisäure eingebaut werden. Die dadurch in der Kette vorhandenen Doppelbindungen werden zur Quervernetzung (Härtung) genutzt. Diese Querverbindungen werden in erster Linie mit Styren (meist zwei Einheiten als Brücke) errichtet.



Die Härtung wird mit organischen Peroxiden, die leicht in Radikale zerfallen, katalysiert. Die Einleitung der Härtung ist auch mit UV-Licht möglich.

Verwendung von UP: für Spachtelmassen, Möbellacke, Gießharze, faserverstärkte Kunststoffe (z. B. für Karosserieausbesserungen, Bootsbau, Behälter) ...

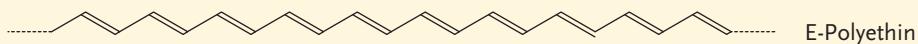


Soll ein geringer oder hoher Polymerisationsgrad angestrebt werden, um eine gute Leitfähigkeit zu erzielen?

Elektrisch leitende Kunststoffe

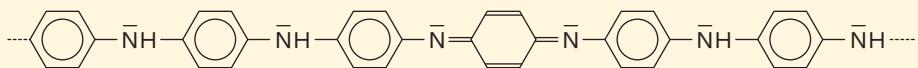
Mangels frei beweglicher Elektronen sind die üblichen Kunststoffe Nichtleiter. Ähnlich wie bei den Halbleitern kann man Polymere mit elektronenreichereren Elementen dotieren oder mit elektronenärmeren Elementen Elektronenlücken schaffen. Damit ist eine gezielte Einstellung der Leitfähigkeit möglich. Voraussetzung ist allerdings ein hochkonjugiertes System, das die Beweglichkeit der Elektronen (bzw. der positiven Lücken) ermöglicht. Der spezifische Widerstand des Materials ergibt sich daraus, wie oft Elektronen (oder Lücken) von einer Molekülkette zur nächsten wechseln müssen.

Polyethin (Polyacetylen, PAC) entsteht durch Polymerisation von Ethin und bildet ein durchgehendes π -Elektronensystem.



Bei Dotierung des Polyethin mit Oxidationsmitteln (p-Dotierung) steigt die Leitfähigkeit stark an.

Polyanilin wird als organisches Metall bezeichnet.



Die Anzahl der zur chinoiden Form oxidierten Ringe entspricht der Dotierung.

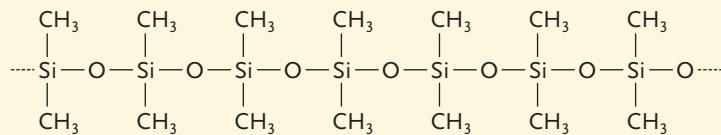
Für beide Verbindungen gilt, dass bei der Polymerisation auf eine möglichst lineare Anordnung der Ketten und damit hohe Kristallinität zu achten ist, um gute Leitfähigkeiten zu erlangen.

Verwendung elektrisch leitender Kunststoffe: für Batterien, Leuchtdioden ...

Silicone (Polysiloxane, Silikone)

Die Silicone nehmen eine Sonderstellung unter den Kunststoffen ein, da ihr Grundgerüst keinen Kohlenstoff enthält, sondern ähnlich den Silicaten abwechselnd aus Silicium- und Sauerstoffatomen besteht. Die restlichen Bindungen des Siliciums sind meist mit Methylgruppen gesättigt.

Lineares Polydimethylsiloxan



Es gibt auch verzweigte, cyclische und vernetzte Silicone.

Die Herstellung ist nur formal durch einfache Polykondensation wie bei den Kieselsäuren möglich. Sie ist aufwendiger als bei den üblichen Kunststoffen, was den höheren Preis erklärt.

Je nach mittlerer molarer Masse sind die Silicone viskose Öle, Pasten oder Stoffe mit gummiähnlicher Konsistenz. Allen Siliconen ist gemeinsam, dass sie sich durch Hitzebeständigkeit bis 200 °C, z. T. sogar bis 300 °C, auszeichnen.

Siliconöle sind hydrophobe (und damit schlecht benetzende) Flüssigkeiten. Ihre Viskosität kann in sehr weiten Bereichen eingestellt werden. Die Schmierfähigkeit ist allerdings schlechter als die der Mineralöle.

Feste Silicone sind relativ weich und daher für selbsttragende Konstruktionen nicht geeignet.

Aus Siliconkautschuk, der in der Kette Doppelbindungen enthält, kann durch Vernetzung Silicongummi gemacht werden.

Verwendung der Silicone: für Hydrauliköle, Schutz- und Isolieranstriche, Imprägnierungen, Dichtungen, Isolatoren, Synthesegummi, Schaumstoffe ...

Heeger, MacDiarmid und Shirakawa entwickelten 1976 das dotierte Polyethin. Sie erhielten für ihre Leistung gemeinsam den Chemienobelpreis des Jahres 2000.



Chinone siehe Kap. A, 4.



Das englische Wort „silicon“ bedeutet im Deutschen nicht Silicon, sondern Silicium.

Eigenschaften der Silicone

- Sehr temperaturbeständig
- Wasser abweisend
- Chemikalienbeständig



Wie kann die hohe thermische Stabilität der Silicone begründet werden?



Elastische Fugenmasse auf der Basis von Silicongummi



Recherchieren Sie, warum Silicone als medizinische Implantate für Schönheitsoperationen in die negativen Schlagzeilen geraten sind.

 Ethenbaum siehe
Kap. A, 2.2.



 Der Kunststoffanteil von Automobilen nimmt ständig zu. Recherchieren Sie den durchschnittlichen Prozentsatz in einem gängigen Pkw.

Ziele erreicht? – „Vollsynthetische Kunststoffe“

- 8.08 Warum sind Kunststoffe mit stark verzweigten Molekülen immer amorph?
- 8.09 Wie heißt das Monomer mit der Formel $C_6H_5-CH=CH_2$?
- 8.10 Schreiben Sie die drei Gleichungen der Entstehung von PVC, ausgehend von Ethen, an. Die Eliminierung von Hydrogenchlorid im zweiten Schritt erfolgt mithilfe von Natronlauge.
- 8.11 Zeichnen Sie einen Ausschnitt aus einer isotaktischen PVC-Kette.
- 8.12 Welche mittlere molare Masse hat Polyethylen mit dem mittleren Polymerisationsgrad 40 000?
- 8.13 Altes Verfahren der PAN-Herstellung: Ethin (Acetylen) reagiert mit Hydrogencyanid (HCN); das Additionsprodukt wird polymerisiert. Erstellen Sie diese beiden Gleichungen.
- 8.14 Warum ist PMMA transparent?
- 8.15 Schreiben Sie die Gleichung für die Herstellung des Monomers von PMMA an. Dabei wird Methylpropensäure mit Methanol verestert.
- 8.16 Geben Sie die Formel des Monomers von Polycyanacrylat an.
- 8.17 Polyvinylacetat (PVAC) ist ein Kunststoff für Klebstoffe und Holzleime. Das Monomer hat die Formel $CH_2=CH-O-CO-CH_3$. Erstellen Sie die Gleichung für die Polymerisation.
- 8.18 Zeichnen Sie in der PC-Formel ein, welcher Molekülteil den Ester der Kohlensäure darstellt.
- 8.19 Zeichnen Sie Formelausschnitte von Harnstoff- und Melaminharzen.
- 8.20 Bisphenol A wird durch eine Kondensationsreaktion aus Phenol und Propanon hergestellt. Wie lautet die chemische Gleichung?
- 8.21 Wenn mit aggressiven Chemikalien gearbeitet wird, verwendet man als Gefäß oft einen Platintiegel. Welcher Kunststoff kann in vielen Fällen statt des Platins genommen werden?
- 8.22 Für ungesättigte Polyester wird Butendisäure benötigt. Schreiben Sie die Strukturformel der Butendisäure an.
- 8.23 Welche Art von Isomerie tritt bei der Butendisäure auf?
- 8.24 Welche Rolle spielt beim Polyanilin das freie Elektronenpaar am Stickstoff?
- 8.25 Nennen Sie Anwendungen von Kunststoffen in der Medizin.
- 8.26 Was wird mit dieser Abbildung gezeigt?



8.3 Kunststoffverarbeitung

In vielen Fällen machen erst Füllstoffe, Weichmacher, Stabilisatoren, verstärkende Fasern und/oder Farbstoffe einen Kunststoff zu einem maßgeschneiderten Werkstoff. Man beeinflusst damit neben der Farbe die mechanischen Eigenschaften sowie die Haltbarkeit und gibt dem Kunststoff mehr Körper. Die Verarbeitungsmethode und die geplante Verwendung bestimmen, wie man Kunststoffe mit Zusatzstoffen behandelt.

Zusätze vor der Verarbeitung

Fargebung: Kunststoffe werden nicht an der Oberfläche (wie Holz oder Stahl), sondern in der Masse gefärbt. Dazu werden der Kunststoffschnmelze schon vor der Verarbeitung Farbpigmente zugesetzt. Ähnlich wie bei den Lacken, die zum Teil auch auf Kunststoffen basieren, können dafür entweder anorganische oder organische Pigmente (wenn die Verarbeitungstemperatur nicht zu hoch ist) verwendet werden. Dabei ist eine nahezu unendliche Vielfalt von Farbtönen möglich. Der vom Verarbeiter gewünschte Farbton wird bereits vom Kunststoffhersteller exakt eingestellt, oft als eine unentgeltliche Serviceleistung.

Stabilisatoren sollen einem möglichen Abbau des Kunststoffs während der Verarbeitung durch Hitze oder Luftsauerstoff entgegenwirken.

Trennmittel verhindern das Haften eines Formteils an den Wänden der Form. Dazu werden in erster Linie Wachse und Siliconöle herangezogen. Eine ähnliche Funktion haben die Gleitmittel für das Extrusionsverfahren.

Weichmacher dienen zur Herabsetzung der Härte und Sprödigkeit von Kunststoffen, die starke Wechselwirkungen zwischen den Ketten zeigen. Der wichtigste Weichmacher ist Dioctylphthalat, mit dem PVC thermoplastischer und geschmeidiger gemacht wird.

Alterungs- und Lichtschutzmittel werden ebenfalls vor der Verarbeitung zugesetzt. Sie sollen verhindern, dass der Kunststoff später allmählich durch Luftsauerstoff oder UV-Licht zersetzt wird.

Flammschutzmittel setzen die Entzündlichkeit und Brennbarkeit des Kunststoffs herab. Hauptsächlich werden dafür Halogenverbindungen eingesetzt.

Antistatika verhindern die elektrostatische Aufladung des Kunststoffs.

Füllmittel bzw. Faserstoffe sind die wichtigsten Zusätze.

Füllmittel senken den Preis und bringen oft gleichzeitig mechanische Vorteile. Die beliebtesten Füllstoffe sind Kalk und Ruß. Faserstoffe erhöhen in erster Linie die Zug- und Bruchfestigkeit. Die am meisten verwendeten Faserstoffe sind Glasfasern, Carbonfasern und Aramidfasern.

Füllstoff Kalk: Kalk erhöht die Steifigkeit, Schlagzähigkeit und Formstabilität des Kunststoffs. Die durch Kalk verbesserte Wärmeleitfähigkeit ermöglicht kürzere Arbeitstakte bei der formgebenden Verarbeitung.

Füllstoff Ruß: Ruß verbessert die Abriebfestigkeit (besonders wichtig bei Gummi für Autoreifen) und bietet aufgrund seiner schwarzen Farbe auch einen guten Lichtschutz.



Verschiedenfarbige Granulate (vor der Verarbeitung)



Polyamidplättchen für den Vergleich von Farbtönen



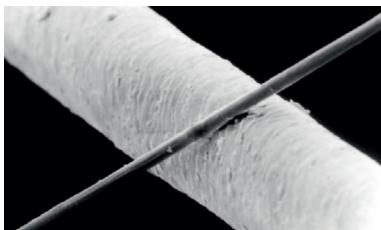
Die Firma Omya in Gummern (Kärnten) liefert Kalkfüllstoff für Kunststoffe und Papier. Omya ist mit 2 000 000 t Abbau pro Jahr der weltweit größte Kalkbetrieb und Österreichs zweitgrößter Bergbaubetrieb.



Wicklung eines Stabhighsprungstabes



Zahnräder aus GFK (Polyamid)



Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer einzelnen Carbonfaser (6 µm Dicke) im Vergleich mit einem menschlichen Haar (50 µm).



Leitwerk des Airbus A380 aus carbonfaserverstärktem Kunststoff

Glasfaser wird zur Verstärkung von Kunststoffen in Größenordnungen von bis zur Hälfte der Masse eingesetzt. Umgekehrt werden Glasfasern oder Glasfasermatten mit Kunsthärzen getränkt.

Ein Stabhighsprungstab entsteht durch die Wicklung von Glasfaserbändern um ein Rohr. Die Glasfaser wird während des Wickelvorganges mit Kunsthärz getränkt. Auch Carbonfaser wird dafür verwendet. Am Ende der Herstellung wird das Rohr herausgezogen.

GFK ist die Abkürzung für **glasfaserverstärkte Kunststoffe**. Der hohe Elastizitätsmodul von Glasfasern ist mit ungefähr 80 000 MPa etwa gleich hoch wie der des Aluminiums. Er verleiht den GFK elastische Steifigkeit bei hoher Zugfestigkeit.

Für kleinere Bauteile werden der Kunststoffschnmelze kurze Stapelfasern beigegeben. Größere Bauteile enthalten lange Glasfasern oder Glasfasermatten in Richtung der zu erwartenden größten Belastung.

Verwendung der GFK: für mechanisch sehr beanspruchte Teile wie Zahnräder aus Ultramid (Polyamid der BASF), Behälter (z. B. Mineralöltanks aus glasfaserverstärktem Polyester), Boote, Flugzeugteile, Sportgeräte, Angelruten ...

Kohlenstofffaser (Carbonfaser, Kohlefaser) wird in erster Linie aus Polyacrylnitril erzeugt. Dazu werden PAN-Fasern pyrolysiert (durch Hitze zersetzt). Alle Elemente entweichen dabei in Form gasförmiger Verbindungen, lediglich der Kohlenstoff bleibt als Carbonfaser zurück.

Man kann die Kohlenstofffaser annähernd als aus Graftbändern bestehend beschreiben. Durch Verstreckung werden die Fasern parallelisiert und erreichen durch Bündelung eine besonders hohe Zugfestigkeit. 1 000 bis 50 000 Einzelfasern werden dabei zu einem Strang (Roving) zusammengefasst.

Kohlenstofffasern sind elektrisch gut leitfähig. Sie zeigen in Längsrichtung einen negativen Wärmeausdehnungskoeffizienten, d. h., sie ziehen sich bei Erwärmung zusammen. Kohlenstofffasern sind zwar teurer als Glasfasern, bestechen aber durch ihre geringere Masse und noch bessere mechanische Eigenschaften. Die Abkürzung für **carbonfaserverstärkte Kunststoffe** lautet **CFK**.

Verwendung der CFK: für Tennisschläger, Rahmen von Rennfahrrädern, Mono-coque (selbsttragende Karosserie) von Formel-1-Autos, Flugzeugteile, Verstärkungen von Beton ...

Maschinelle Verarbeitung

Die Verarbeitung von Kunststoffen erfolgt entweder

- **flüssig** (als Lösung, Schmelze, Suspension oder Paste) oder
- **fest** (als Pulver oder Granulat) oder
- **in Form von Halbzeug** (Blöcke, Tafeln, Folien oder Fasern).

Welche Art der Verarbeitung gewählt wird, hängt davon ab, ob das Endprodukt ein Formteil, eine Folie oder eine Faser werden soll.

Die wichtigsten Verarbeitungsverfahren sind Pressen, Kalandrieren, Gießen, Spritzgießen, Extrudieren, Schäumen, Kleben, Schweißen und Blasen, Beschichten (inklusive Lackieren) sowie Faserspinnen.

Dazu kommt noch die spanabhebende Bearbeitung.

Pressen

Die Kunststoffmasse wird in eine Form gefüllt, erhitzt und mit einem Pressstempel zu einem Werkstück verpresst. Das Erwärmen des Kunststoffs in der Form kann bei einigen Kunststoffen mithilfe eines Hochfrequenzfeldes erfolgen. Damit wird vermieden, dass der Kunststoff an manchen Stellen überhitzt und dadurch teilweise abgebaut wird.

Anwendung bei aus mehreren Schichten bestehenden Platten; vor allem für Faserplatten, die Holzspäne enthalten.

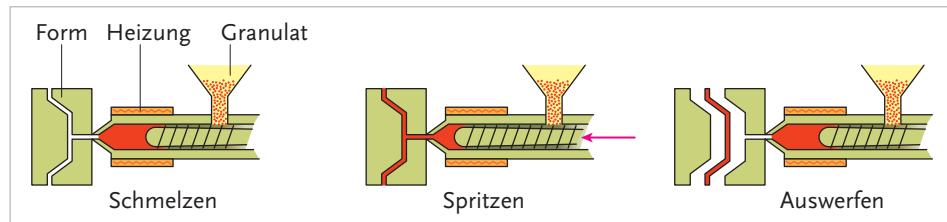
Kalandrieren

Thermoplastischer Kunststoff wird geschmolzen in einen breiten Spalt zwischen zwei gegenläufige Walzen aufgebracht. Durch nachfolgende, enger stehende und immer weniger beheizte Walzen wird die gewünschte Schichtdicke erreicht.

Anwendung: zur Erzeugung dicker Folien, dünner Platten, beschichteter Gewebe und von Bodenbelägen.

Spritzgießen

Beim Spritzgießen wird thermoplastisches Granulat oder Pulver in einen beheizten Zylinder gefüllt. Ein Schneckengewinde fördert und drückt den Kunststoff in eine Form, die sich zum periodischen Ausstoßen der Werkstücke öffnet.



Schema einer Schneckenkolbenspritzgussmaschine

Anwendung: Erzeugung komplizierter Formteile.

Extrudieren (Strangpressen)

Auch beim Extrudieren wird der geschmolzene Kunststoff mit einer beheizten Schnecke gefördert und verdichtet. Er wird dann durch ein auswechselbares formgebendes Mundstück (Matrize oder Düse) gepresst. Ein Förderband zieht das ausgestoßene Profil ab. Man erhält endlose Stränge, die auf die gewünschte Länge zugeschnitten werden.

Anwendung: Erzeugung von nahtlosen Rohren und Profilen jeglicher Art (z. B. Fensterprofilen, Tennisschlägerrahmen).

Hohlkörperblasen

Beim Hohlkörperblasen werden abgemessene Portionen aus dem Extruder ausgetragen. Diese Portionen zähflüssigen Kunststoffs werden mit Druckluft an die Wände der gekühlten Hohlform gepresst. Die Hohlkörper werden mit hoher Taktfrequenz aufgeblasen und ausgeworfen. Der überwiegende Teil der Flaschen wird aus Polyethylen hergestellt. Das Hohlkörperblasen der Kunststoffindustrie ist völlig analog der Massenherstellung von Glasflaschen.

Anwendung: Herstellung von Flaschen und Kanistern.



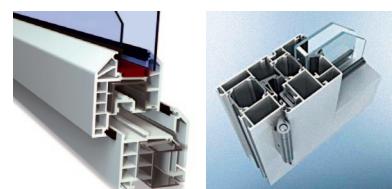
150-t-Kalander zur Erzeugung von Bodenbelägen aus PVC



Mundstück eines Extruders zur Erzeugung eines Rohres



Auch Metalle (z. B. Aluminium) können extrudiert werden.



Fensterprofile aus Kunststoff und Aluminium



Blasen einer PE-Folie



Insekt in UP-Gießharz



Mit Superkleber (Araldite) auf handtellergroßen Flächen an die Wand geklebtes Auto



Besprechen Sie die Vor- und Nachteile von Lacken auf der Basis organischer Lösungsmittel, Lacken mit Wasser als Lösungsmittel und Pulverbeschichtungen.



Welchen Nachteil haben CN-Lacke?

Folienblasen

Ähnlich wie Rohre können sogenannte Schlauchfolien hergestellt werden. Dazu wird die Schmelze des thermoplastischen Kunststoffs kontinuierlich durch eine ringförmige Düse gepresst und anschließend von einem warmen Luftstrom bis zur gewünschten Wandstärke aufgeblasen. Die Folien werden je nach Bedarf geschnitten und verschweißt.

Anwendung: Erzeugung dünner Folien (z. B. für die Landwirtschaft, für Tragtaschen aus PE).

Gießen

Aus zwei Komponenten bestehende Gießharze werden gemischt und sofort in eine Form gegossen. Dabei kommen PU, UP und Epoxidharze zum Einsatz.

Anwendung: Schutz von Objekten in Gießharzblöcken, Herstellen von Abgüssen.

Polyamide können aus der Schmelze zu Blöcken vergossen und danach spanabhebend bearbeitet werden. Andere Kunststoffe können als Lösung vergossen werden. Nach Verdampfen des Lösungsmittels bleibt eine Folie (Film) zurück.

Schweißen und Kleben

Beim Schweißen werden thermoplastische Werkstücke mit einem präzisen Heißluftstrom oder mit einem elektrisch beheizten Stahlstempel verbunden. Das Schweißen kann mit oder ohne weitere Materialzufuhr erfolgen.

Bei einigen Kunststoffen können die Teile durch ein Lösungsmittel angelöst und dadurch klebrig gemacht werden. Für hochwertige Verklebungen gibt es eigene Kunststoffe (z. B. Cyanacrylat oder verschiedene Mehrkomponentenklebstoffe). Solche Klebungen zeigen oft höhere Festigkeiten als das verklebte Grundmaterial.

Beschichten

Kunststoffe können selbst beschichtet werden (z. B. mit Nickel oder mit anderen Kunststoffen). Häufiger werden sie aber zur Beschichtung anderer Materialien eingesetzt. Beispiele sind der Überzug von Holzfaserplatten mit harten Oberflächen und vor allem das Lackieren verschiedenster Produkte.

Beschichtungen sollen einem Produkt ein dekoratives Aussehen verleihen, das Produkt schützen oder ihm besondere Funktionen verleihen (z. B. Härte, Leitfähigkeit). Bei Pulverbeschichtungen wird das Kunststoffpulver meist elektrolytisch aufgebracht. Die Haftung und Filmbildung erreicht man entweder auf thermoplastischem Wege oder durch Vernetzungsreaktionen. Vernetzungen werden üblicherweise durch Einbrennen bei Temperaturen um 200 °C erzielt. Klassische Lacke enthalten Lösungsmittel, die nach dem Auftrag verdunsten müssen. Sikkative (Trocknungsbeschleuniger) oder UV-Licht fördern die Vernetzung und damit die Bildung eines dichten Kunststofffilms. Der filmbildende Kunststoffanteil eines Lacks wird auch als Bindemittel bezeichnet.

Lacke enthalten als Bindemittel vorzugsweise Cellulosederivate, Polyvinylacetat, Alkydharze, Acrylharze, Epoxidharze oder Polyurethane.

Cellulosenitrate dienen seit über 90 Jahren als Bindemittel für Möbellacke. Sie werden als Klarlacke oder mattiert eingesetzt.

Polyvinylacetat (PVAC) ist die Basis für wässrige Dispersionen zum Ausmalen von Innenräumen. Als Dispersionen bezeichnet man zähflüssige Emulsionen oder Suspensionen für Anstrichzwecke.

Alkydharze sind die am häufigsten verwendeten Bindemittel. Sie werden aus Fetten (Pflanzenölen) hergestellt. Dabei werden die Fette meist mit Phthalsäure (Benz-1,2-dicarbonsäure) modifiziert. Das Glycerol bildet mit der Phthalsäure einen linearen Polyester. Die dritte Hydroxygruppe des Glycerols ist mit einer mehrfach ungesättigten Fettsäure verestert. Dafür kommen Linolsäure (Octadecadiensäure) und insbesondere Linolensäure (Octadecatriensäure) infrage. Die Fettsäuren ermöglichen mit ihren Doppelbindungen die Quervernetzung mit Luftsauerstoff und sorgen damit für die Bildung des Lackfilms.

Acrylharze auf der Basis von PMMA liefern haltbare und gut aussehende Beschichtungen. In Kombination mit den Wasser abweisenden Siliconharzen werden sie für den Anstrich von Fassaden verwendet.

Epoxidharze werden meist zweikomponentig (Vorprodukt plus Härter) eingesetzt. Sie sind sehr chemikalienfest und werden für Unterwasseranstriche sowie den Korrosionsschutz von Stahl und Beton verwendet.

Polyurethane liefern Beschichtungen, die sich durch Chemikalienfestigkeit und Härtete auszeichnen. Man verwendet sie für Haushaltsgeräte, Waggons und Flugzeuge.

Spinnverfahren

Zur Herstellung von Fasern kommen Verfahren zum Einsatz, die dem Extrudieren ähneln. Die Matrize (Spinndüse) ist eine Lochplatte, die die gleichzeitige Herstellung von vielen Fasern ermöglicht. Die Fasern werden zu einem Garn gebündelt. Die Endlosgarne werden Filamente genannt. Sie werden verstreckt und aufgespult.

Beim **Trockenspinnen** wird das gelöste Polymer durch die Spinndüse gedrückt und anschließend durch einen warmen Luftstrom geführt. Dabei verdampft das leicht flüchtige Lösungsmittel (z. B. Aceton) und der Faden bleibt übrig.

Beispiele: CA, Elastan ...

Beim **Nassspinnen** wird das gelöste Polymer durch die Spinndüse in ein Bad gepresst, in dem die Faser ausgefällt wird.

Beispiele: Viskose, Lyocell, PAN, Aramid ...

Beim **Schmelzspinnen** wird das geschmolzene Polymer nach dem Durchgang durch die Spinndüse gekühlt und erstarrt dabei.

Beispiele: PET, PA, PP ...

Textilfasern können anschließend gebleicht, gefärbt, gekräuselt (texturiert) und imprägniert sowie mit Antistatika behandelt werden.



Ziele erreicht? – „Kunststoffverarbeitung“

8.27 Welche Vorteile zeigen GFK und CFK gegenüber herkömmlichen Werkstoffen wie Holz und Metall?

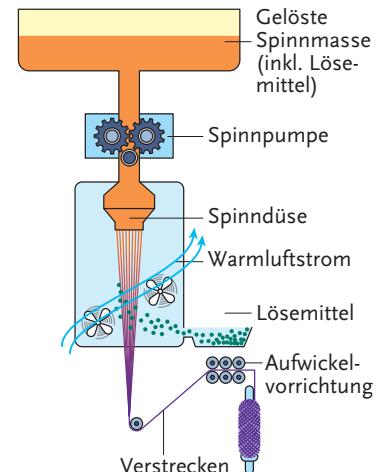
8.28 Der Weichmacher Diethylphthalat ist ein Ester, der aus Phthalsäure (Benz-1,2-dicarbonsäure) und Octan-1-ol hergestellt wird. Erstellen Sie die Reaktionsgleichung.



Die steirische Firma Cytec Austria (vormals Vianova) entwickelte wasserlösliche Alkydharzlacke für die Autoindustrie. Weltweit sind Autohersteller Kunden oder Lizenznehmer der Cytec.



Elektrotauchlackierung eines Automobils (der geladene Lack wird katodisch abgeschieden)



Trockenspinnen



Siehe Viskose, Kap. A, 8.1.



Naturfasern werden zusätzlich mit Mitteln gegen Insekten (z. B. Motten) behandelt.

 Kalk und Glas siehe
NAWI I/II, Kap. D, 2.5.

 Farbstoffe siehe Kap. A, 10.

- 8.29** Geben Sie die Formel des Füllstoffs Kalk an. Formulieren Sie weiters, was Sie unter dem Kunststoffverstärker Glas verstehen.
- 8.30** Warum werden die Filamente verstreckt?
- 8.31** Sollen die für die Lackherstellung eingesetzten Farbstoffe (Pigmente) anorganische oder organische Verbindungen sein?
- 8.32** Warum verspröden die üblichen Alkydharzlacke im Laufe der Jahre? (Die Begründung ist ähnlich derjenigen für die Alterungserscheinungen bei Gummi.)
- 8.33** Können beim Schmelzspinnen Thermoplaste, Elastomere oder Duromere zu Fasern verarbeitet werden?

8.4 Kunststoffanalytik

Die qualitative Analyse der wichtigsten Kunststoffe kann mit relativ einfachen Mitteln bewerkstelligt werden.

Man benötigt dafür

- einen Behälter mit Wasser für die **Schwimmprobe**,
- ein Feuerzeug (einen Brenner) für die **Brennprobe**,
- Kupferdraht oder Kupferblech für die **Beilsteinprobe**.



Brennprobe: abtropfendes PMMA



Schülerversuch – „Brennprobe/Beilsteinprobe“

Zuerst wird der Kunststoff optisch beurteilt. PS, PMMA, PC, CA und PET können glasklar durchsichtig sein.

Die Schwimmprobe zeigt, ob PE oder PP vorliegt. Diese beiden Kunststoffe sind leichter als Wasser.

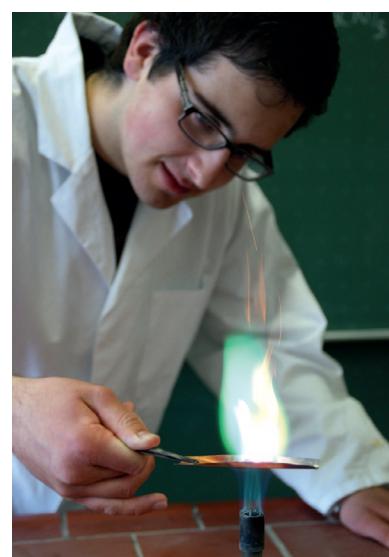
Bei der Brennprobe entzündet man den Kunststoff, achtet dabei auf abtropfendes Material, zieht die Probe aus der Flamme, beobachtet das Weiterbrennen oder Verlöschen und riecht nach dem Verlöschen oder Ausblasen an den Brand schwaden.

Bei Verdacht auf PVC wird die Brennprobe auf einem Kupferblech (Beilsteinprobe) durchgeführt. Eine dabei auftretende blaugrüne Flammenfärbung zeigt generell einen Stoff an, der halogenhaltig ist.

Flammschutzmittel können die Brennprobe verfälschen. Sie können auch eine positive Beilsteinprobe zeitigen.

| | Brennprobe/Beilsteinprobe |
|------------|---|
| PE | Schmilzt in der Flamme, tropft. Brennt außerhalb der Flamme gelb leuchtend weiter. Geruch nach verlöschendem Kerzenwachs. |
| PP | Schmilzt in der Flamme, tropft. Brennt außerhalb der Flamme gelb leuchtend weiter. Geruch nach verlöschendem Kerzenwachs. |
| PS | Schmilzt in der Flamme, tropft. Brennt außerhalb der Flamme stark rufsend weiter. |
| PVC | Brennt in der Flamme schlecht, außerhalb gar nicht. Geruch stechend säuerlich (HCl). Beilsteinprobe positiv. |

| | |
|--------------|--|
| PMMA | Schmilzt in der Flamme, brennt leuchtend, tropft. Eventuell süßlicher Geruch. |
| PET | Brennt mit gelborangefarbiger Flamme, schwach rufend, tropft. Eventuell leicht aromatischer Geruch. |
| PC | Schwer entflammbar, nur in der Flamme brennend, leuchtend, rufend, verkohlend. Phenolartiger Geruch (nach Desinfektionsmittel). |
| PA | Schmilzt, brennt nicht besonders gut, leuchtend, nicht erlöschend. Geruch nach verbranntem Haar oder Horn. |
| PF | Schmilzt nicht, brennt in der Flamme leuchtend und verkohlend, außerhalb verlöschen. Phenolgeruch. |
| UF/MF | Schmilzt nicht, brennt in der Flamme verkohlend, außerhalb verlöschen. Geruch nach Aminen (fischartig). |
| CA | Schwer entflammbar, brennt leuchtend, schmilzt, tropft. Spritzt beim Brennen ein wenig. Geruch nach verbranntem Stroh und Essig. |



Beilsteinprobe

Unterscheidung von PE und PP: LDPE ist mit dem Fingernagel leicht ritzbar, HDPE ritzbar und PP nicht ritzbar.



Ziele erreicht? – „Kunststoffanalytik“

- 8.34** Welche ungeschäumten Kunststoffe schwimmen auf Wasser?
- 8.35** Welche Kunststoffe sind schwer brennbar?
- 8.36** Welche Kunststoffe brennen rufend? Welche Begründung gibt es dafür?
- 8.37** Wie kann der ähnliche Geruch von verbranntem Haar und PA begründet werden?

9 Wasch- und Reinigungsmittel

„Wasser ist zum Waschen da, falleri und fallera ...“, heißt es in einem Kinderlied. Wasser ist als Waschmittel sicher unentbehrlich, kann aber die in unseren Tagen sehr hoch gewordenen Ansprüche an Hygiene und Sauberkeit alleine nicht erfüllen. Die ersten Seifen stellten die Sumerer bereits 2500 v. Chr. aus Fetten und Pflanzenasche her, verwendeten sie allerdings als Heilmittel und Kosmetikum. Die reinigende Wirkung von Seife lernten die Römer etwa im 2. Jahrhundert n. Chr. kennen. Die industrielle Seifenherstellung begann im 18. Jahrhundert mit der technischen Herstellung von Soda. Erst im 20. Jahrhundert wurden andere waschaktive Substanzen – die Tenside – entwickelt. Sie werden heute in einer Vielzahl von Wasch- und Reinigungsmitteln eingesetzt, um Schmutz – „Materie am falschen Ort“ – optimal entfernen zu können.



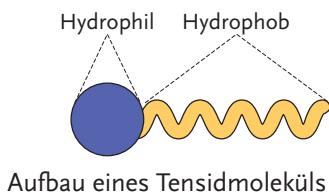
Wäschewaschen mit Seife und Waschbrett



Meine Ziele

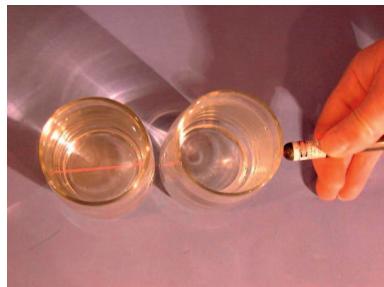
Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Eigenschaften und die Verwendung von Tensiden** beschreiben;
- die **molekularen Vorgänge beim Waschen** erklären;
- bewerten, welche **Waschmittelkomponenten für bestimmte Anforderungen** infrage kommen.

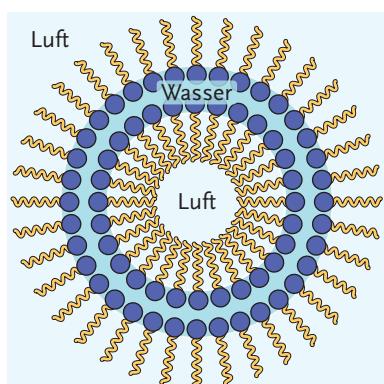


Oberflächenspannung siehe
NAWI I/II, Kap. C, 1.1.2.

Warum reichern sich Tenside bevorzugt an der Wasseroberfläche an?



Tyndalleffekt: Streuung eines Lichtstrahls (Laserpointer) an den Mizellen einer Seifenlösung

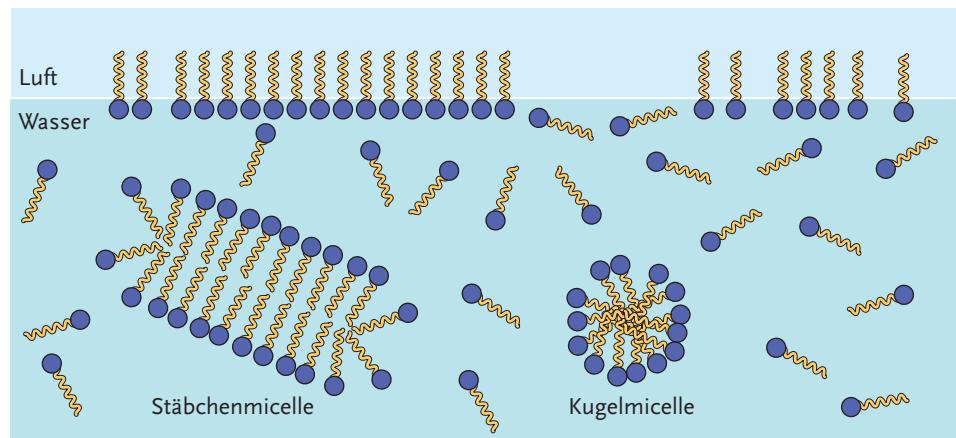


Lamellenbildung einer Schaumblase

Tenside

Tenside sind Verbindungen, die einen unpolaren, hydrophoben (wasserfeindlichen) und einen polaren, hydrophilen (wasserfreundlichen) Molekülteil besitzen. Der hydrophobe Teil ist zumeist ein Kohlenwasserstoffrest, der zehn bis 20 Kohlenstoffatome umfasst. Der hydrophile Teil ist je nach Tensidart unterschiedlich aufgebaut.

Vermischt man Tensidmoleküle mit Wasser, treten verschiedene Effekte auf: An der Grenzfläche zwischen Luft und Wasser reichern sich die Tenside an und setzen die Oberflächenspannung des Wassers stark herab. Im Wasser bilden Tenside kugelförmige und stäbchenförmige Aggregate – sogenannte Mizellen.



Mizellen haben eine Größe von wenigen Nanometern. Daher sind Tensidlösungen im Unterschied zu echten Lösungen nicht völlig klar, sondern leicht trüb (opaleszierend). Tritt ein Lichtstrahl durch eine Tensidlösung, wird er an den Mizellen gestreut (Tyndalleffekt).

Beim Vermischen einer Tensidlösung mit Gas (z. B. Luft) kommt es zur typischen Schaumbildung. Tenside ermöglichen durch die Verringerung der Grenzflächenspannung diese starke Vergrößerung der Oberfläche. Die sehr dünne Haut einer Schaumblase – Lamelle genannt – besteht aus Wasser und wird durch Tensidmoleküle stabilisiert.

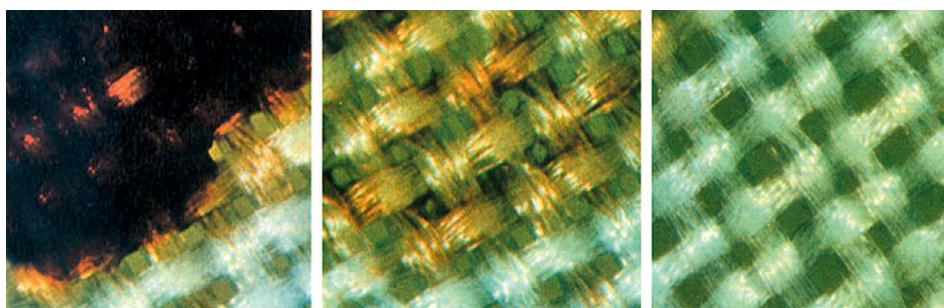
Waschvorgang

Schmutz besteht aus wasserlöslichen, leicht entfernbaren Bestandteilen (Salzen, Harnstoff) und aus wasserunlöslichen, schwer entfernbaren Teilchen (Eiweiß, Kohlenhydraten, Fett, Ruß). Früher erfolgte die Schmutzablösung durch eine starke mechanische Bearbeitung der Wäsche (z. B. Waschbrett). Heute erledigt das Waschmittel die Hauptarbeit der Reinigung.

Beim Waschvorgang laufen eine Vielzahl von physikalischen und chemischen Vorgängen ab:

Phasen des Waschvorganges beim Wäschewaschen

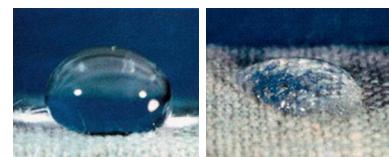
- Herabsetzen der Oberflächenspannung des Wassers
- Benetzung des Gewebes
- Ablösen des Schmutzes vom Gewebe
- Zerteilen des Schmutzes in feinste Teilchen (Emulgieren und Dispergieren)
- Ausspülen der Waschlauge



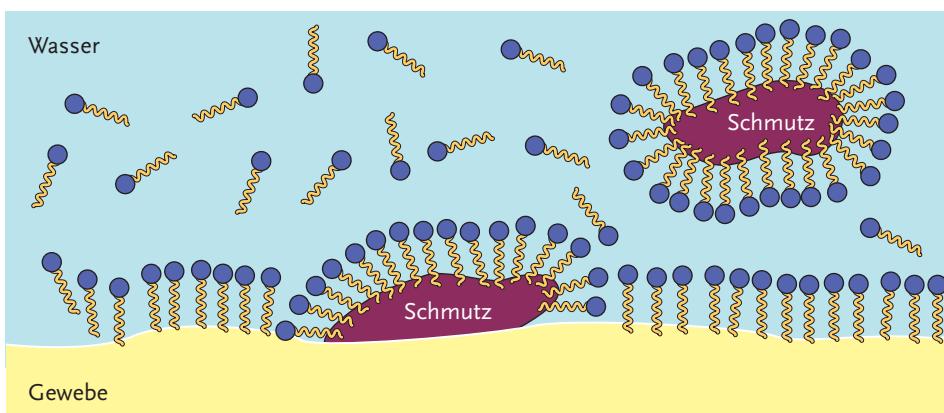
Phasen der Schmutzentfernung aus einem Gewebe durch Tenside

Durch die Oberflächenspannung wird das Benetzen der Fasern mit Wasser stark behindert. Tenside verringern die Oberflächenspannung des Wassers und ermöglichen ein Benetzen des Gewebes und das Eindringen von Tensidlösung in das Gewebe.

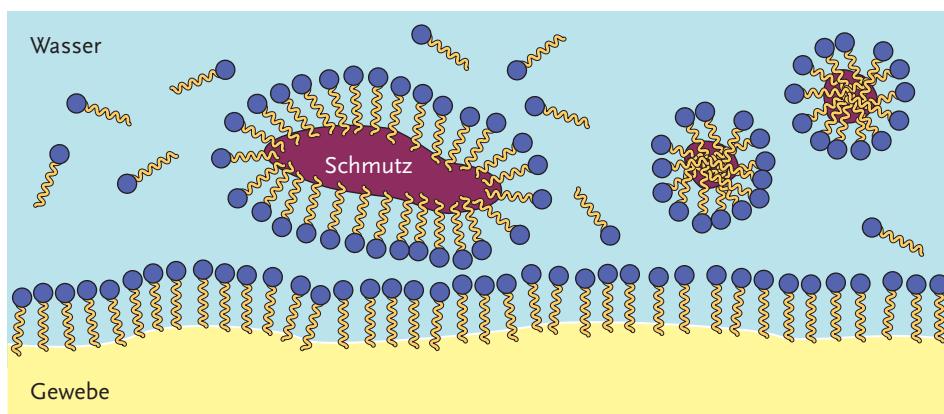
Nun treten Tensidmoleküle in Wechselwirkung mit dem Gewebe und den hydrophoben Schmutzteilchen. Sie lagern sich an der Oberfläche des ebenfalls hydrophoben Gewebes an, dringen mit ihrem hydrophoben Teil in das Schmutzteilchen ein und schieben sich zwischen Gewebe und Schmutz. Das Schmutzteilchen wird vom Gewebe abgelöst.



Links: Wassertropfen auf Gewebe,
rechts: Benetzung durch Tenside



In den abgelösten Schmutz dringen weitere Tensidmoleküle ein. Dabei wird er in feinste Teilchen emulgiert und dispergiert. Die von den Tensidmolekülen bewirkte hydrophile Hülle der Schmutzteilchen verhindert eine Wiedervereinigung zu größeren Einheiten (vor allem bei geladenen Tensiden durch Abstoßung gleichartiger Ladungen) und ein erneutes Anlagern am Gewebe.

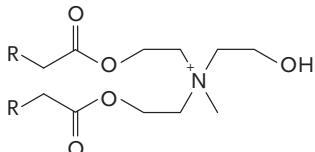


In der letzten Phase des Waschvorganges wird das nun gereinigte Gewebe von der Waschlauge getrennt und mit frischem Wasser gespült. Dabei wird das Gewebe auch von anhaftenden Tensiden befreit. Ein Großteil des Wassers wird beim

Schleudern aus der Wäsche entfernt. Der gesamte Waschvorgang wird durch die Bewegung der Wäsche in der Waschmaschine und die entsprechende Temperatur der Waschlauge unterstützt.

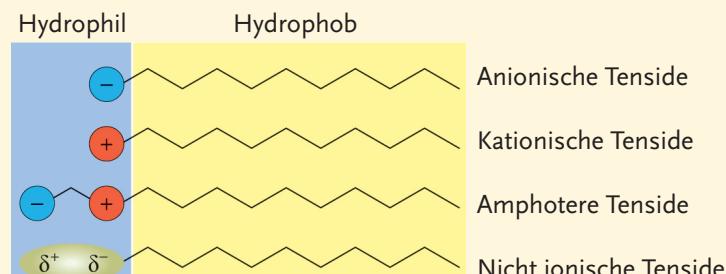
Tensidarten

Tenside werden in erster Linie durch den hydrophilen Molekülteil unterschieden. Der hydrophobe Teil ist zumeist ein linearer Kohlenwasserstoffrest.

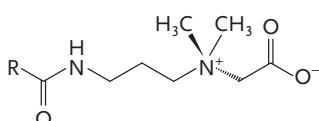


Struktur eines kationischen Tensids (R = hydrophobe Alkylreste)

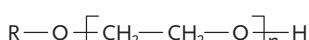
Tensidarten



Diskutieren Sie, ob die Kombination von kationischen mit anionischen Tensiden eine Steigerung, ein Sinken oder ein Gleichbleiben der Waschwirkung mit sich bringt.



Struktur des Betainanteils (R = hydrophober Alkylrest)



Struktur des nichtionischen, hydrophilen Teils (R = hydrophober Alkylrest)

Anionische Tenside haben einen negativ geladenen hydrophilen Molekülteil. Man unterscheidet **Seifen** mit einer Carboxygruppe ($R-COO^-$), **Alkylbenzensulfonate** ($R-SO_3^-$) und **Fettalkoholsulfate** ($R-O-SO_3^-$).

Kationische Tenside sind **quartäre Ammoniumverbindungen** und haben einen positiv geladenen hydrophilen Molekülteil. Als Weichspüler eingesetzt, ziehen sie auf die gereinigte Faser auf und machen das Gewebe angenehm weich. Wegen ihrer hydrophoben Eigenschaften werden sie bei Autowaschanlagen als Trocknungshilfen verwendet.

Amphotere Tenside tragen im hydrophilen Teil sowohl eine positiv als auch eine negativ geladene funktionelle Gruppe. Man kombiniert eine Carboxy- mit einer quartären Ammoniumgruppe zu einem Betain. Amphotere Tenside verbessern in Haarshampoos die Hautverträglichkeit des Produktes.

Nicht ionische Tenside sind im hydrophilen Teil ungeladen und bestehen aus Fettalkoholen und kurzkettigen polaren Polyoxyethylenen. Wegen ihrer guten Hautverträglichkeit werden sie vor allem in Körperpflegeprodukten eingesetzt.



Verseifung eines Triglycerides
siehe Carbonsäureester, Kap. A, 6.



Handgemachte Kernseife

Seifen

Seifen sind Natrium- oder Kaliumsalze von langkettigen Fettsäuren. Sie werden heute überwiegend zur Körperhygiene und in geringerem Ausmaß zur Oberflächenreinigung verwendet. Hergestellt werden sie aus pflanzlichen und tierischen Ölen und Fetten durch alkalische Esterspaltung (Verseifung).

Seifenherstellung (Seifensieden)

- Kochen von geeigneten Ölen und Fetten mit Natronlauge bzw. Sodalösung.
- Die entstehende Emulsion (Seifenleim) wird mit Kochsalz versetzt.
- Durch dieses Aussalzen teilt sich der Seifenleim in den Seifenkern und die Unterlauge.
- Nach dem Abtrennen der Unterlauge und einem Reinigungsschritt mit Wasser erhält man **Kernseife**.
- Bei Verwendung von Kalilauge erhält man pastöse **Schmierseife**.

Bei der industriellen Seifenherstellung werden Öle und Fette mit Heißdampf behandelt und in Fettsäuren und Glycerol gespalten. Nach Abtrennen des Glycerols und Reinigen der Fettsäuren erfolgt die Salzbildung mit Natron- oder Kalilauge.

Eigenschaften von Seifen

- **Vorteil:** sehr gut biologisch abbaubar
- **Nachteile:**

- ▶ Seifenlösungen sind stark alkalisch (können Hautreizungen auslösen, führen zum Verfilzen von Wolle).
- ▶ Bei hartem Wasser bilden sich unlösliche Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Salze der Fettsäuren (Kalkseifen), die sich auf der Wäsche als Grauschleier ablagern.
- ▶ In saurem Milieu bilden sich freie Fettsäuremoleküle (Verringerung der Waschaktivität und Fleckenbildung auf der Wäsche).
- ▶ Seifenlösungen schäumen sehr stark (nachteilig in der Waschmaschine).

Lineare Alkylbenzensulfonate (LAS)

Alkylbenzensulfonate sind Salze von Sulfonsäuren mit einem Benzenring und einem Alkylrest. Die ersten großtechnisch synthetisierten Verbindungen waren im Alkylrest stark verzweigt. Sie lösten ab den 1950er-Jahren die Seifen in Waschmitteln ab und kamen weitverbreitet zum Einsatz. Ihre schlechte biologische Abbaubarkeit führte zu starker Schaumbildung in Flussläufen und Seen. Das störte, verbunden mit den damals in Waschmitteln verwendeten Phosphaten zur Wasserenthärtung, das ökologische Gleichgewicht massiv (Eutrophierung und daraus resultierendes Fischsterben).

Mit der Entwicklung von im Alkylrest linear gebauten Verbindungen (mit nur einer Verzweigung) wurde eine weitgehende biologische Abbaubarkeit erreicht. Das großtechnisch hergestellte Natriumdodecylbenzensulfonat (als Isomerengemisch, Alkylrest mit zwölf C-Atomen) ist die wichtigste Tensidkomponente in heutigen Waschmitteln.

Fettalkoholsulfate (FAS)

Fettalkoholsulfate sind Ester von langketten Alkoholen (Fettalkohole) mit Schwefelsäure. Die Fettalkohole gewinnt man durch Reduktion von Fettsäuren. FAS sind gut biologisch abbaubar.

Eigenschaften von LAS und FAS

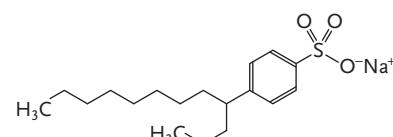
- Wässrige Lösungen reagieren neutral und sind gut hautverträglich.
- Bei hartem Wasser bilden sich keine unlöslichen Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Salze.
- LAS und FAS sind nicht säureempfindlich.
- Sie verursachen nur geringe Schaumbildung.

Bestandteile eines Vollwaschmittels

Vollwaschmittel sind für den Großteil der zu reinigenden Gewebe geeignet und können im Temperaturbereich von 20 bis 95° C verwendet werden. Sie sind meist pulverförmig.

Tenside: Es werden LAS, FAS und nicht ionische Tenside verwendet. Sie sind die waschaktiven Stoffe und lösen den Schmutz vom Gewebe.

Wasserenthärter: Zeolith A ist ein synthetisches Natriumaluminiumsilicat, Handelsname Sasil (engl. sodium aluminium silicate). Es bindet Ca^{2+} - und Mg^{2+} -Ionen



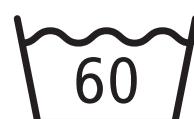
Natriumdodecylbenzensulfonat
(typischer Vertreter aus dem Isomerengemisch)



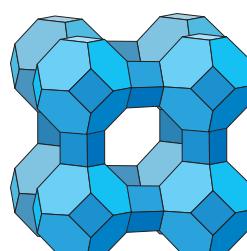
Schaumbildung im Rhein 1971



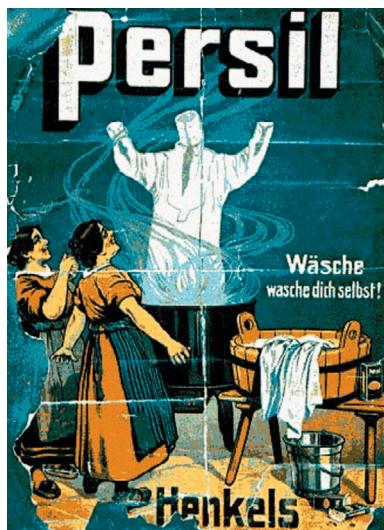
Fettalkoholsulfate siehe
Kap. A, 4.



Textilpflegesymbol: Waschen bei
max. 60° C



Struktur von Zeolith A

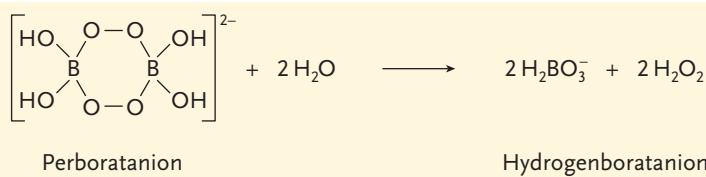


Waschmittelwerbung von 1908

des Wassers durch Ionenaustausch gegen Na^+ -Ionen. Zeolith A verhindert Kalkablagerungen in der Waschmaschine und auf der Wäsche und die Waschkraft der Tenside bleibt erhalten.

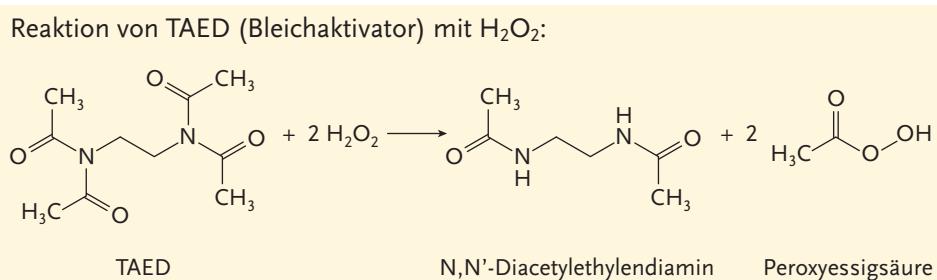
Waschalkalien: Als Waschalkalgie kommt üblicherweise Soda (Na_2CO_3) zum Einsatz. Durch die Erhöhung des pH-Wertes der Waschlauge quellen die Gewebefasern auf und der Schmutz löst sich besser.

Bleichmittel: Farbige Verschmutzungen, wie Obst- und Gemüseflecken, Rotwein oder Tinte, lassen sich mit Tensiden nicht auswaschen. Durch Bleichmittel werden die Farbstoffe oxidativ zerstört. Das gängigste Bleichmittel ist Natriumperborat. Es spaltet im Wasser ab etwa 60 °C Wasserstoffperoxid H_2O_2 ab, das zu Wasser und Sauerstoff zerfällt.



Der Markenname des bekannten Waschmittels Persil wurde aus Wortsilben der zu dieser Zeit neuen Inhaltsstoffe **Perborat** und **Natriumsilicat** gebildet. Natriumsilicat verbesserte das Ablösen des Schmutzes. Persil reinigte als erstes Waschmittel die Wäsche selbsttätig.

Um bei niedrigeren Temperaturen eine Bleichwirkung zu erzielen, werden Bleichaktivatoren (z. B. Tetraacetylenthylendiamin TAED) zugefügt. TAED reagiert mit Natriumperborat zur Peroxyessigsäure, die bleicht.



Enzyme helfen, die Waschwirkung schon bei niederen Temperaturen zu verbessern. Es kommen Eiweiß spaltende (Proteasen), kohlenhydratspaltende (Amylasen) und Fett spaltende Enzyme (Lipasen) zum Einsatz. Mikroskopisch kleine Cellulosefaser von stark beanspruchter Baumwollbekleidung werden durch Cellulasen entfernt. Dadurch wird die Farbe der Textilien aufgefrischt.

Optische Aufheller: Ein häufig gewaschenes weißes Wäschestück wird mit der Zeit durch Waschmittelablagerungen leicht gelblich, es vergilbt. Optische Aufheller sind Fluoreszenzfarbstoffe, die UV-Licht absorbieren und Licht im sichtbaren (blauen) Bereich emittieren. Dadurch erscheint die Wäsche „strahlend“ weiß.

Neben Vollwaschmitteln gewinnen Flüssigwaschmittel, Buntwaschmittel und Feinwaschmittel immer mehr an Bedeutung. Bei Reinigungsmitteln wie beispielsweise Duschgels, Shampoos, Geschirrspülmitteln, Spülmaschinenreinigern und Haushaltsreinigern werden je nach gewünschter Wirkungsweise unterschiedliche Tensidarten mit weiteren Komponenten (z. B. Scheuermitteln, Säuren, Bleichmitteln, Farb- und Duftstoffen) gemischt.



Textilstück mit und ohne optischem Aufheller (unter UV-Licht)



Ziele erreicht? – „Wasch- und Reinigungsmittel“

- 9.01** Beschreiben Sie den grundsätzlichen Aufbau eines Tensidmoleküls und erklären Sie die Unterschiede der vier Grundtypen von Tensiden.
- 9.02** Erklären Sie den Begriff Mizelle und beschreiben Sie, wie man Mizellen sichtbar machen kann.
- 9.03** Erklären Sie den Aufbau einer Seifenblase und erläutern Sie, warum Seifenblasen so instabil sind.
- 9.04** Beschreiben und erklären Sie die mikroskopischen Vorgänge beim Waschen.
- 9.05** Beim Seifensieden wird der Seifenleim mit Kochsalz versetzt. Erklären Sie, warum es durch die Salzzugabe zur Trennung in Seifenkern und Unterlauge kommt.
- 9.06** Seifenlösungen reagieren stark alkalisch. Analysieren Sie dieses Verhalten und beschreiben Sie es mit einer chemischen Gleichung.
- 9.07** Planen Sie einen Versuch, mit dem Sie hartes und weiches Wasser mithilfe von Seifenlösung unterscheiden können.
- 9.08** In der geschichtlichen Entwicklung der industriellen Tensidherstellung war es ab einem gewissen Zeitpunkt unbedingt erforderlich, einen Teil des Tensidmoleküls gezielt aufzubauen. Erklären Sie, warum diese Notwendigkeit bestand.
- 9.09** Erklären Sie den chemischen Unterschied zwischen LAS und FAS. Geben Sie je eine Strukturformel an.
- 9.10** Bei der Entwicklung eines Buntwaschmittels wurden folgende Basisbestandteile in der Rezeptur vorgesehen: Tenside, Bleichmittel, Wasserenthärter, Waschalkalien, Enzyme. Welcher Fehler steckt darin?
- 9.11** Warum können die Enzyme in einem Vollwaschmittel ihre Wirkung bei Verwendung des Kochprogramms nur sehr kurz entfalten?

10 Farbstoffe

Bunte Kleidung war lange Zeit ein Privileg der Reichen. Blaue Farbstoffe waren zum Teil teurer als Gold. Im 19. Jahrhundert legten die Engländer in ihrer Kolonie Indien große Plantagen mit Indigopflanzen an. Der blaue Farbstoff Indigo war bis 1890 ein britisches Monopol. In der BASF erforschte man in 17-jähriger Arbeit unter Einsatz enormer Geldmittel (18 Millionen Goldmark, das war mehr als das damalige Grundkapital der Firma) die chemische Struktur des Indigos und fand Wege zu seiner synthetischen Herstellung aus Steinkohlenteer. 1890 wurde der BASF das kaiserliche Patent auf Indigo erteilt, worauf sich der Farbstoffmarkt nach Deutschland verlagerte. Der Ausbruch des Ersten Weltkrieges kann auch damit erklärt werden, dass davor in relativ kurzer Zeit große wirtschaftliche Machtverschiebungen stattfanden.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

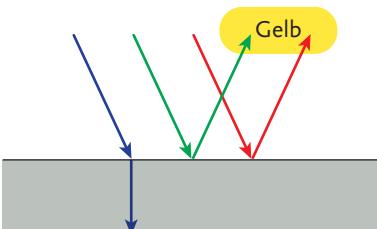
- das Entstehen von Farbe beschreiben;
- Farbstoffe einteilen und ihre technischen Eigenschaften angeben;
- den Zusammenhang zwischen Molekülbau und Farbe erklären.



Historische Indigoplantage in Indien



Mit Indigo gefärbte Jeans



Wenn von weißem Licht Blau-violett absorbiert wird, ergibt die Summe des reflektierten Lichtes die Komplementärfarbe Gelb.

 Additive und subtraktive Farbmischung siehe Kap. D, 2.3.

 Farbe siehe NAWI I/II, Kap. C, 4.5.

 Gelb bzw. Braun ist eine in der Natur sehr häufige Farbe, weil sie mit relativ wenigen konjugierten Doppelbindungen erreichbar ist.



Kaiserin Eugénie (die Gattin von Napoleon III.) war eine Mode-ikone ihrer Zeit. Sie trug als Erste ein grünes Kleid.

Synthetische Farbstoffe sind den Naturfarbstoffen überlegen. Sie sind farbkräftiger, gleichmäßiger in der Qualität, nicht ernteabhängig, besser zu dosieren und preiswerter. Weil Indigo nicht besonders lichtecht und waschecht ist (es bleicht aus), sind inzwischen noch viel bessere Farbstoffe entwickelt worden. Indigo hat als Farbstoff aber Kultstatus und wird daher für Jeans nach wie vor verwendet.

- Die **Ursache von Farbe** ist bei **Emission** von sichtbarem Licht die Abgabe von Energie infolge eines Elektronenübergangs von einem höheren auf ein tieferes Energieniveau.
- Die **Ursache der Farbe von Farbstoffen** ist die Absorption von sichtbarem Licht infolge der Anregung von Elektronen des Farbstoffs (Anhebung auf ein höheres Energieniveau). Die nicht absorbierten Anteile des sichtbaren Lichts werden reflektiert und ergeben den Farbeindruck.

Anorganische Farbstoffe sind meist Mineralfarben, deren Metallionen leicht anregbare Elektronen besitzen.

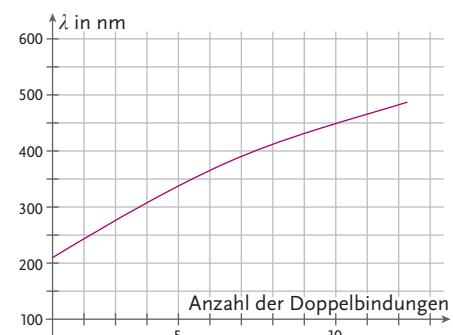
Sie sind billig und deckkräftig, aber ihre Brillanz ist gering. Man nimmt sie für Druckfarben und Lacke sowie für Anwendungen, bei denen Hitzestabilität gefragt ist (z. B. für Glas). Am günstigsten kommen Eisenoxide, mit denen man rote, gelbe, orange, braune und schwarze Farbtöne erzielt. Anorganische Farbstoffe sind meist Pigmente. Als **Pigmente** werden Farbstoffe bezeichnet, die in gängigen Lösungsmitteln nicht löslich sind.

Beispiele: Fe_2O_3 (Oxidrot, Tizianrot), $\text{FeO}(\text{OH})$ (Ocker, Schönbrunnergelb), CoO (Cobaltblau), Cr_2O_3 (Chromgrün), Pb_3O_4 (Minium, Mennige), HgS (Zinnober), TiO_2 (Titanweiß), C (Grafit, Ruß).

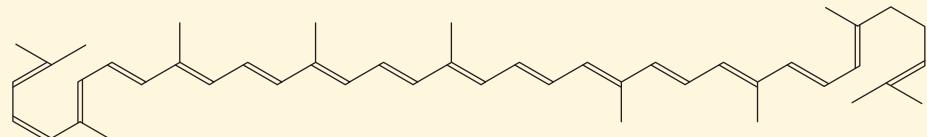
Organische Farbstoffe erzielen ihre Farbe durch die Anregung schwach gebundener, delokalisierte π -Elektronen eines ausgedehnten mesomeren Systems.

π -Elektronensysteme zeigen ab etwa sieben bis acht konjugierten Doppelbindungen Absorption im sichtbaren Bereich des Lichtes.

400 nm (Blauviolett) ist eine Wellenlänge im energiereichsten Bereich des sichtbaren Lichtes. Eine Substanz, die im Bereich von 400 nm Licht absorbiert, erscheint dem Betrachter in der Komplementärfarbe Gelb.



Das Lycopin, der Farbstoff der Tomate, ist mit dem Carotin verwandt und enthält ein π -Elektronensystem mit elf konjugierten Doppelbindungen.



Lycopin absorbiert blaues Licht mit $\lambda = 450 \text{ nm}$ und erscheint daher in der Komplementärfarbe Orangerot.

Für die Farben Blau und Grün ist es notwendig, besonders ausgedehnte Chromophore herzustellen. Daher wird Indigo als der König der Farbstoffe bezeichnet. Deshalb kamen auch synthetische grüne Textilfarbstoffe zuletzt auf den Markt und hatten die höchsten Preise.

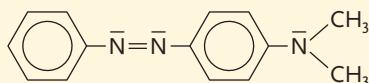
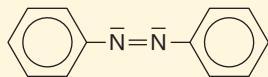
Das farberzeugende π -Elektronensystem eines Moleküls wird als **Chromophor** (griechisch: **chroma** = Farbe; **phorus** = Träger) bezeichnet. Chromophore enthalten oft aromatische Ringe.

Die Farbe eines Stoffes kann verändert werden, wenn man an das Chromophor **auxochrome Gruppen** anfügt (lateinisch: **auxilium** = Hilfe).

Auxochrome Gruppen erniedrigen die Absorptionswellenlänge, wenn sie einen Elektronen abziehenden $-M$ -Effekt haben (z. B. Nitrogruppen).

Auxochrome Gruppen mit $+M$ -Effekt erhöhen die Absorptionswellenlänge (z. B. Hydroxy- oder Aminogruppen). Die Verschiebung des Absorptionsspektrums von Violett über Blau, Cyan, Grün und Gelb bis Rot hat zur Folge, dass die wahrgenommene Farbe des betreffenden Stoffs sich in genau umgekehrter Reihenfolge ändert, d. h. aus Blau wird Violett, aus Rot Gelb.

Diphenyldiazen (Azobenzen) ist ein orangeroter Farbstoff.



N,N-Dimethylamino-diphenyldiazen (Buttergelb) zeigt eine intensive gelbe Farbe, weil das freie Elektronenpaar am Aminostickstoff in Konjugation zum aromatischen Ring steht. Dies führt zu einer Vergrößerung des π -Elektronensystems.

Organische Farbstoffe sind farbkräftiger und leuchtender als die anorganischen Farbstoffe, aber weniger stabil. Sie werden vorzugsweise in der Textilfärbung eingesetzt.

Man kann die organischen Farbstoffe nach dem chemischen Grundgerüst (oder nach der Färbemethode) einteilen.

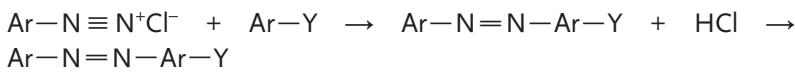
Azofarbstoffe

Sie enthalten die Gruppe $-\text{N}=\text{N}-$, flankiert von Aromaten. Die systematische Bezeichnung lautet Diazen („en“ für die Doppelbindung; „az“ leitet sich von französischen **azote** = Stickstoff ab).

Die Herstellung erfolgt ausgehend von einem aromatischen Amin, das mit Natriumnitrit und Salzsäure in ein temperaturempfindliches Diazoniumsalz umgewandelt wird.



Der zweite Schritt wird Kupplungsreaktion genannt: Das gekühlte Diazoniumsalz wird mit einem weiteren Aromaten (der durch eine Gruppe mit $+M$ -Effekt aktiviert ist) verbunden. Es handelt sich um eine S_E -Reaktion mit dem Diazoniumkation als positivem Angreifer am π -Elektronensystem des aktivierte Aromaten.



Chrom... sollte nicht mit chron... verwechselt werden, denn griechisch **chronos** = Zeit.



Buttergelb verwendete man zum Färben von Butter. Es wurde wegen seiner krebsfördernden (cancerogenen) Wirkung verboten.

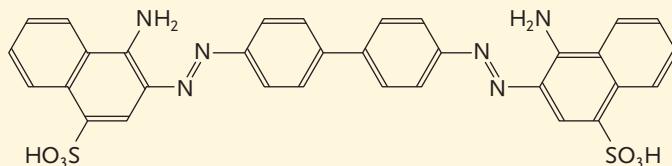


Herstellung von Methylorange.



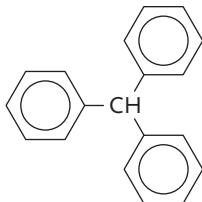
Woher stammt das H-Atom des bei der Kupplung entstehenden Hydrogenchlorids?

Ein bekannter Azofarbstoff ist der pH-Indikator und Baumwollfarbstoff Kongorot:



Die Sulfonsäuregruppen dienen dazu, die Verbindung wasserlöslich zu machen.

Die Azofarbstoffe bilden die größte Farbstoffklasse. Man kennt Tausende von ihnen. Beispiele sind Methylorange, Methylrot (pH-Indikatoren), Chrysoidin (orange, für Baumwolle sowie Leder) und Ponceaurot (für Lebensmittel).

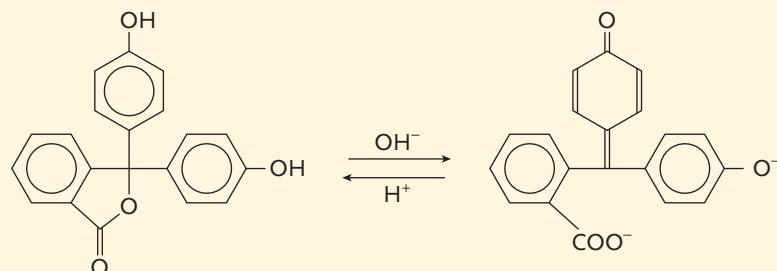


Warum ist Triphenylmethan nicht farbig?

Triphenylmethanfarbstoffe

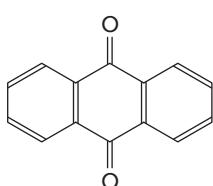
Das Grundgerüst dieser Farbstoffe ist Triphenylmethan, das selbst keine Farbe zeigt. Wenn einer der drei Ringe in die chinoide Form umgewandelt wird, kommt es zur Absorption von sichtbarem Licht.

Phenolphthalein ist ein pH-Indikator, dessen saure Form farblos ist, während die im Basischen vorliegenden anionische Form Purpurfärbung zeigt.



Die anionische Form ist mesomeriestabilisiert.

Weitere Triphenylmethanfarbstoffe sind Malachitgrün (zur Färbung von Bakterien in der Mikroskopie), Kristallviolett (Druckfarbe), Patentblau (für Lebensmittel) und Eosin (rote Tinte).



Anthrachinon

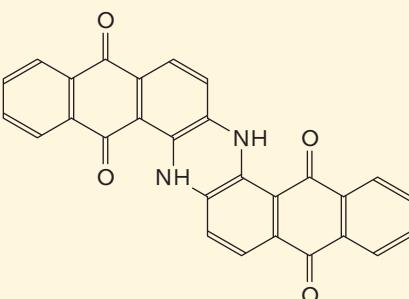


Chinone siehe Kap. A, 4.

Anthrachinonfarbstoffe

Es handelt sich um eine Farbstoffklasse, die besonders lichte Farben liefert. Wichtige Vertreter sind Alizarin (Krapprot) und Indanthrenblau, die für Textilien verwendet werden.

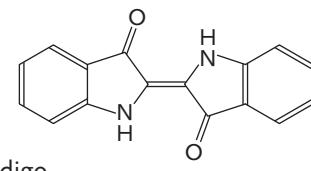
Indanthrenblau



Indigofarbstoffe

Indigo war vor etwa 100 Jahren der weltweit wichtigste blaue Farbstoff. Es wurde dann durch Indanthren und andere waschechtere Farbstoffe abgelöst. Indigo wird heute nur mehr für Jeans verwendet. Es wird aus Anilin (Benzenamin), Formaldehyd (Methanal) und Hydrogencyanid HCN erzeugt.

Weitere Indigofarbstoffe sind Indigokarmen (zur Färbung von Teigwaren, Getränken und Eis) sowie das schon in der Antike bekannte Purpur (Dibromindigo; für Textilien).



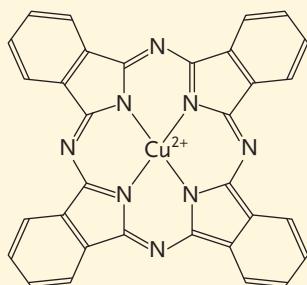
Pyrrolfarbstoffe (Porphyrine und Phthalocyanine)

Diese Farbstoffklasse spielt sowohl in der Natur als auch in der Industrie eine wichtige Rolle.

Bei den **Porphyrinen** sind vier Pyrrolringe über CH-Brücken miteinander verknüpft. In ihrer Mitte befindet sich ein komplex gebundenes Metallkation, das zangenartig von den freien Elektronenpaaren der Stickstoffatome umfasst wird. Derartige Chelate (griechisch: **chele** = Krebsschere) sind besonders stabile Verbindungen. Die bekanntesten Porphyrine sind der grüne Blattfarbstoff Chlorophyll mit Mg^{2+} als Zentralion, das Vitamin B₁₂ mit Co^{2+} und das Häm mit Fe^{2+} als Zentralion. Das Häm bildet gemeinsam mit dem Protein Globin den roten Blutfarbstoff Hämoglobin.

Bei den **Phthalocyaninen** sind die Pyrrolringe über N-Brücken miteinander verknüpft. Es handelt sich ebenfalls um Komplexverbindungen.

Kupferphthalocyanin (Heliogenblau; für Lacke, Kunststoffe, Druckfarben, Stempelfarbe, Kosmetika)



Die Autoindustrie verwendet für Lackierungen gerne Phthalocyanin-Pigmente, weil sie sich durch hohe Deckkraft, sehr gute Lichtechtheit und Wetterfestigkeit auszeichnen.

Neben den genannten gibt es noch viele andere Farbstoffklassen (z. B. Dioxazin-, Nitro-, Nitroso-, Schwefelfarbstoffe).

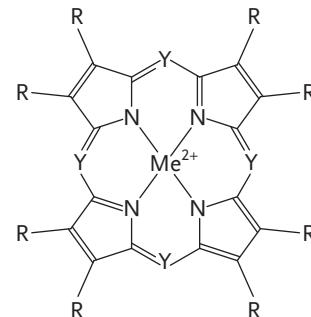
Färbermethoden

Nach der Technologie unterscheidet man prinzipiell zwei **Färbeverfahren**:

- **Färben in der Masse:** Dabei werden anorganische oder organische Farbpigmente in die geschmolzene Masse eingebracht und von dieser beim Festwerden umschlossen. Diese Methode wird bei Kunststoffen inklusive Synthesefasern und Lacken sowie Glas angewandt.
- **Färben durch Bindung:** Dabei werden organische Farbstoffe durch mehr oder weniger starke Bindungen (Ionenbindung, Atombindung, Wasserstoffbrückenbindung oder Van-der-Waals-Bindung) an das Färbegut gebunden. Diese Methode wird bei allen natürlichen und halbsynthetischen Textilfasern sowie einigen Synthesefasern verwendet. Die chemische Natur der Textilfaser entscheidet, welche Art der Bindung an die Faser möglich ist. Die Fasern werden in ein Färbebad (Flotte) eingelegt, wobei der Farbstoff aufzieht (er dringt in die Fasern ein und wird gebunden).



Für ein Gramm Purpur mussten früher 9 000 Purpurschnecken ihr Leben lassen.



Porphyrine: $Y = CH$

Phthalocyanine: $Y = N$



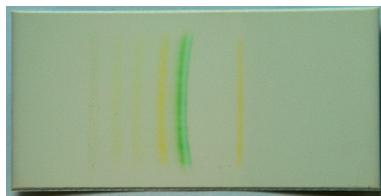
Beim Abbau von Häm in der Leber entsteht als Zwischenprodukt der gelbe Gallenfarbstoff Bilirubin. Er zeigt sich (und damit eine Überforderung der Leber) im Auge eines Betrunkenen oder bei Gelbsucht.



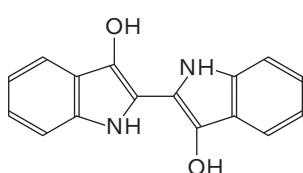
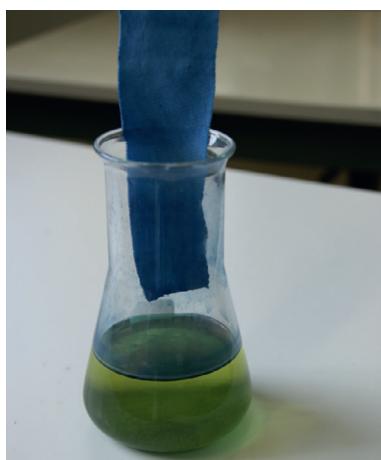
Diskutieren Sie die Vor- und Nachteile der beiden Färbeverfahren.



Trennen von Blattfarbstoffen: Man zerreibt grüne Blätter in einer Reibschale mit Sand, Kreide und Propanon. Nach dem Filtrieren trägt man die grüne Lösung mehrfach auf die Startlinie einer DC-Platte (Kieselgel G) auf. Fließmittel ist Petroleumbenzin (30 – 140 °C)/Propan-2-ol (9 : 1). Beim Entwickeln läuft Carotin an der Laufmittelfront, gefolgt von den Chlorophyllen und Xanthophyllen.



Küpenfärbung: In einem Kolben wird ein wenig Indigo mit 0,5 g Natriumthionit, 100 mL Wasser und 20 mL verdünntem NaOH versetzt. Man erwärmt auf 60 °C. In die nun gelbe Lösung wird ein Streifen Baumwolle 15 Minuten lang eingelegt und dann an der Luft getrocknet.



Färbemethoden für Fasern

Voraussetzung ist, dass der Farbstoff selbst lichtecht ist (durch Sonnenlicht nicht ausbleicht), leicht auf die Faser aufzieht und eine gute Bindung an die Faser hat, die den mechanischen Belastungen des Tragens sowie den chemischen Belastungen des Waschens standhält.

Die in den Blättern grüner Pflanzen enthaltenen grünen und gelben Farbstoffe sind für Färbezwecke ungeeignet, weil sie unter Einwirkung von Sauerstoff aus der Luft rasch Veränderungen zeigen und auch nicht gut auf Fasern haften.

- **Saure Farbstoffe (anionische Farbstoffe)** werden durch Ionenbindung an die Faser (Wolle, Seide, Polyamid) gebunden.

Patentblau, Naphtholgelb, Eosin, Fluorescein ...

- **Basische Farbstoffe (kationische Farbstoffe)** werden ebenfalls durch Ionenbindung an die Faser (Wolle, Seide, Polyester, Polyacrylnitril) gebunden.

Fuchsin, Methylenblau, Kristallviolett ...

- **Reaktivfarbstoffe** ziehen mittels Atombindungen auf die Faser (vor allem Baumwolle und andere Cellulosefasern, aber auch Wolle) auf. Dabei reagieren OH-Gruppen der Cellulose mit dem Farbstoff. Die Haftung ist sehr gut.

Kongorot, Remazol, Levafix ...

- **Direktfarbstoffe (Substantivfarbstoffe)** bilden Wasserstoffbrückenbindungen zur Faser (Baumwolle und anderen Cellulosefasern). Die Haftung ist mäßig gut.

Kongorot, Benzopurpurin ...

- **Beizenfarbstoffe** lässt man erst auf der Faser (Wolle, Seide) durch Reaktion der Farbstoffkomponente mit einer Metallsalzlösung (Al^{3+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} ...) entstehen. Der entstandene Farbstoff-Metall-Komplex haftet gut.

Kraprot (Aluminium-Alizarin-Komplex), Phthalocyaninfarbstoffe ...

- **Entwicklungsfarbstoffe** sind Azofarbstoffe, die durch Kupplung ebenfalls erst auf der Faser (Baumwolle und andere Cellulosefasern) gebildet werden. Die Haftung ist dadurch sehr gut.

Anilinschwarz, Naphtholrot ...

- **Küpenfarbstoffe** werden zuerst durch Reduktion in eine lösliche Form (Leukoform, Küpe) gebracht. Nach dem Aufziehen der Lösung lässt man an der Luft trocknen, wobei durch Oxidation der wasserunlösliche Farbstoff auf der Faser (Cellulose, Viskose) rückgebildet wird.

Indigo, Purpur ...

- **Dispersionsfarbstoffe** sind Pigmente, die im Molekülgitter der Faser (Polyester, Polyamid, Polyacrylnitril) physikalisch eingefangen werden.

Viele unlösliche Azofarbstoffe



Ziele erreicht? – „Farbstoffe“

- 10.01** Welche Farbe zeigen Farbstoffe, deren Chromophore zehn bzw. 13 konjugierte Doppelbindungen aufweisen?
- 10.02** Warum ist Benzen farblos, Diphenyldiazen hingegen orangerot?
- 10.03** Wie kommt die schwarze Farbe von Grafit (Rufß) zustande?
- 10.04** Diazoniumsalze sind temperaturempfindlich, weil sie leicht ein bekanntes Gas abspalten. Welche Stoffe entstehen beim Erwärmen von Benzendiazoniumchlorid?
- 10.05** Formulieren Sie die Gleichungen für die Erzeugung von Buttergelb aus den Rohstoffen Anilin und N,N-Dimethylanilin.
- 10.06** Warum führen Sulfonsäuregruppen zur Wasserlöslichkeit eines Farbstoffes?
- 10.07** Welchen Nachteil haben Textilfärbungen mit Kongorot?
- 10.08** Schreiben Sie die Gleichung für die an der Luft stattfindende Oxidation von Leukoindigo zu Indigo an.



Der Ausdruck „Blau machen“ für Sich-frei-Nehmen stammt von den Indigofärbern, die die Baumwolle über das Wochenende in der Küpe liegen ließen und am Montag nach dem Aufhängen der Stücke frei hatten, weil der Luftsauerstoff für sie die weitere Arbeit übernahm.

11 Pharmazeutika – Drogen – Doping

Skrupellose Geschäftemacher finden ihre Opfer oft unter männlichen Jugendlichen, die nach Anerkennung suchen. Diese Jugendlichen versuchen ihrem Körper durch Training und Nahrungsergänzungsmittel (NEM) ein vermeintlich besseres Aussehen zu verleihen. Der weltweite NEM-Markt setzt 22 Milliarden Euro pro Jahr um. Eine Studie weist nach, dass in Österreich etwa 20 Prozent der NEM mit Dopingmitteln verseucht sind – ohne dass dies auf der Packung steht. Die wichtigste Substanz ist Testosteron, ein männliches Geschlechtshormon. Dieses muskelaufbauende Anabolikum zeigt in entsprechender Dosis gravierende Nebenwirkungen wie Herz- und Leberschäden und überraschenderweise auch Impotenz. Die Vertriebsnetze der Dopingmittel sind zum Teil deckungsgleich mit jenen der Drogen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die wichtigsten **Kategorien der Pharmazeutika** nennen und Beispiele anführen;
- die **Parallelen zwischen Pharmazeutika, Aufbaustoffen und Drogen** erkennen;
- einschätzen, welche **Vorteile** einerseits und **Gefährdungen** andererseits **diese Substanzklassen** aufweisen.



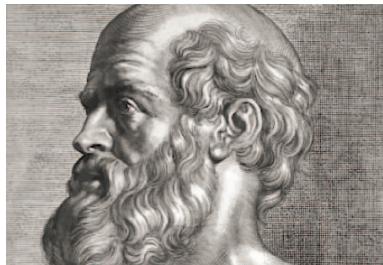
Bodybuilding (1996 starb der österreichische Bodybuildingweltkämpfer Andreas Münzer an den Folgen seines Anabolikamissbrauchs)



Recherchieren Sie, welche Todesursachen in Mitteleuropa die häufigsten sind.

11.1 Pharmazeutika

Durch Jahrhunderte war es die Aufgabe des Apothekers, Arzneimittel (Pharmazeutika) herzustellen. Diese Aufgabe hat heute die pharmazeutische Industrie übernommen. Sie betreibt auch die Erforschung der Zusammenhänge zwischen dem chemischen Aufbau und der biologischen Wirkung von Substanzen. Heutige Arzneistoffe sind überwiegend synthetisch hergestellte organische Verbindungen sowie reine oder chemisch abgewandelte Naturstoffe.



HIPPOKRATES, 460 BIS 377
V. CHR., GRIECHISCHER ARZT

Seit Hippokrates sind Ärzte verpflichtet, zum Wohle ihrer Patienten zu handeln (hippokratischer Eid).



Um welchen Reaktionstyp handelt es sich bei der Herstellung der Barbitursäure?

Die **Acetylsalicylsäure** wurde von den Bayer-Chemikern **Eichengrün** und **Hoffmann** 1897 erstmals hergestellt. 1899 wurde die Verbindung unter dem Namen **Aspirin** patentiert. Die Bayer AG musste das Patent 1919 an die Siegermächte des Ersten Weltkriegs abtreten, kaufte es aber 1994 um 1 Milliarde Dollar zurück.

Die wichtigsten Gruppen der Pharmazeutika sind:

- Mittel für das Zentralnervensystem
- Mittel für das periphere Nervensystem
- Mittel gegen Infektionen
- Mittel gegen Krebserkrankungen (Cytostatika)
- Herzmittel
- Antidiabetika
- Hormone und Vitamine

Für nahezu alle Funktionsstörungen des menschlichen Körpers existieren Medikamente. Vor ihrer Zulassung müssen sie aufwendigen Untersuchungen unterzogen werden. Ein Risiko aufgrund von Nebenwirkungen ist trotzdem oftmals gegeben. Ärzte sollten vor jeder Verschreibung den Nutzen und den möglichen Schaden gegeneinander abwägen.

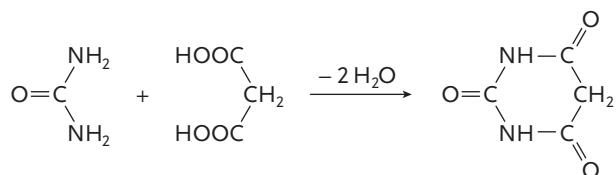
Mittel für das Zentralnervensystem

Auf das Zentralnervensystem wirken Beruhigungs-, Schlaf- und Narkosemittel, Antiepileptika, Antirheumatika, Mittel gegen Schmerzen, Fieber und Entzündungen, Psychopharmaka.

Lachgas (Distickstoffmonooxid, N_2O) wirkt schwach narkotisch.

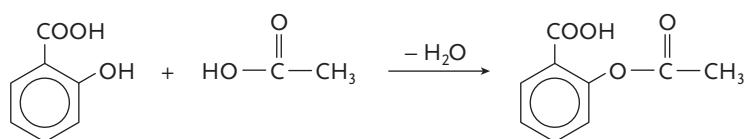
Chloroform (Trichlormethan, $CHCl_3$) und **Diethylether** (Ethoxyethan, $C_2H_5-O-C_2H_5$) werden wegen ihrer Toxizität und Nebenwirkungen als Narkosemittel kaum mehr verwendet.

Barbiturate sind Derivate (Abkömmlinge) der Barbitursäure. Man stellt sie aus Harnstoff und Propandisäure her.



Die saure Stelle dieser heterocyclischen Verbindung ist die CH_2 -Gruppe. Durch den $-I$ -Effekt der benachbarten Sauerstoffatome werden die Wasserstoffatome positiviert und als Protonen ablösbar. Barbiturate werden als Schlaf- und Narkosemittel sowie als Antiepileptika verwendet. Bekannte Namen sind Veronal, Evipan und Luminal.

Acetylsalicylsäure (ASS, 2-Acetoxybenzencarbonsäure) wird durch Veresterung von o-Hydroxybenzencarbonsäure (Salicylsäure) mit Ethansäure (bzw. Ethansäureanhydrid) hergestellt.



ASS hemmt die Synthese der Prostaglandine, einer Gruppe von Gewebshormonen, die für Schmerzen, Fieber und Entzündungen sowie für die Blutgerinnung verantwortlich sind. ASS kann auch vorbeugend bei Thrombosegefahr eingenommen werden. ASS wirkt wie auch andere Mittel gegen Schmerzen (Analgetika) und Fieber (Antipyretika) bzw. Mittel gegen Entzündungen (Antiphlogistika) antirheumatisch, da Rheuma zum Teil auf entzündlichen Prozessen beruht.

Benzodiazepine sind Schlaf- und Beruhigungsmittel, die eine (selten vorkommende) siebengliedrige Ringstruktur aufweisen. Bekannt sind Nitrazepam und Diazepam (Valium).

Ibuprofen (2-[4-Methylpropyl-phenyl]-propansäure, Brufen) ist das wichtigste Mittel gegen Schmerzen.

Diclofenac (2-[2,6-Dichlorphenylamino]-phenylethansäure, Voltaren) ist der wichtigste nichtsteroidale Entzündungshemmer.

Cortison, Cortisol und **Prednisolon** sind die bekanntesten Antiphlogistika mit Steroidgerüst (einem kondensierten System aus drei sechsgliedrigen und einem fünfgliedrigen Ring). Diese Corticosteroide wirken sehr gut und schnell, zeigen aber bei höherer Dosierung eine Reihe schwerwiegender Nebenwirkungen.

Opiate sind die wirksamsten Analgetika. Ihr Nachteil ist, dass sie ein hohes Suchtpotenzial haben. Sie werden in der Medizin entsprechend zurückhaltend eingesetzt und unterliegen strengen rechtlichen Vorschriften.

Opium ist der zahlreiche Alkaloide enthaltende Milchsaft des Schlafmohns. Aus ihm werden Opiate wie Morphin, Codein, Papaverin u. a. gewonnen. Heroin (Diaceetyl morphin) ist ein halbsynthetisches Opiat.

Psychopharmaka können dämpfend oder stimulierend auf Gehirnprozesse wirken. Sie dienen der Behandlung von Geisteskrankheiten und von seelischen Störungen (oft zusammengefasst unter dem Begriff Psychosen). Sie sind aber vielfach auch gefährliche Drogen. Bekannte Beispiele sind Valium (beruhigend) sowie Coffein, Amphetamin, Marihuana, Mescalin und das synthetische LSD (anregend).

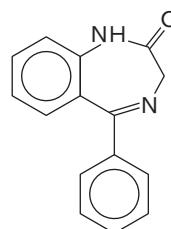
Mittel für das periphere Nervensystem

Das somatische Nervensystem steuert bewusste Reaktionen. Das vegetative Nervensystem reguliert automatisch ablaufende Vorgänge wie Herzschlag, Atmung, Stoffwechsel bzw. den Blutdruck und die Reaktionen der Sexualorgane.

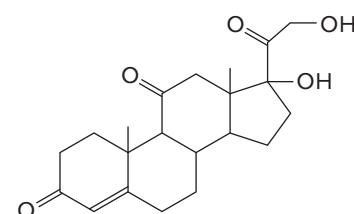
Das vegetative Nervensystem wird nach der Funktion in die Bereiche sympathisches und parasympathisches Nervensystem unterteilt:

- Der Sympathikus ist das anregende System. Er aktiviert den Körper zu Höchstleistungen („fight and flight“).
- Der Parasympathikus ist das dämpfende System. Er fördert die Erholung und die Verdauung („rest and digest“).

Die Medikamente greifen meist in die Übertragung von Nervenimpulsen ein. Die Reizweiterleitung zwischen zwei Nervenzellen erfolgt an einer eigenen Übertragungsstelle (Synapse). Die signalisierende Zelle setzt Acetylcholin frei, das über den



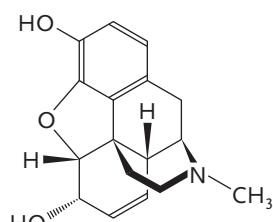
Grundgerüst des Benzodiazepins



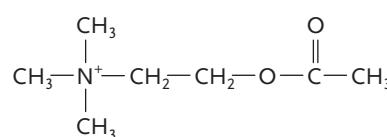
Cortison



Angeritzte Mohnkapsel



Morphin



Acetylcholin (Kation eines quartären Ammoniumsalzes)



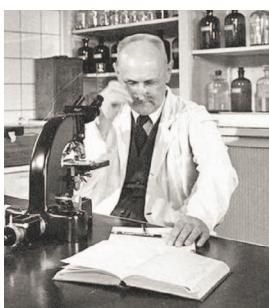
Formel des Atropins siehe
Kap. A, 7.



ALEXANDER FLEMING,
1881 BIS 1955, SCHOTTISCHER
BAKTERIOLOGE, NOBELPREIS
FÜR MEDIZIN 1945



Penicillin V siehe Kap. A, 7.3.



GERHARD DOMAGK,
1895 BIS 1964, DEUTSCHER
PHARMAKOLOGE, NOBELPREIS
FÜR MEDIZIN 1939

synaptischen Spalt zum Rezeptor der Empfängerzelle diffundiert (und dort beispielsweise eine Muskelkontraktion auslöst). Nach der Stimulation muss das Acetylcholin mit Acetylcholinesterase abgebaut werden, damit die Empfängerzelle für den nächsten Impuls bereit ist.

Atropin, das Gift der Tollkirsche, ist dem Acetylcholin (geringfügig) chemisch und räumlich ähnlich und bindet sich daher ebenfalls an den Rezeptor. Atropin kann Nervensignale blockieren und zum Tod führen. In geringerer Dosis wird es als Medikament eingesetzt, das Muskelkrämpfe lösen kann.

Von Nervenkampfstoffen durch Acetylcholinesteraseblockade ausgelöste Krämpfe können mit Atropin behandelt werden (zusätzlich versucht man, die Acetylcholinesterase mit Pralidoxim wieder in ihre ursprüngliche aktive Form zu bringen).

Buscopan ist dem Atropin chemisch ähnlich und wirkt ebenso hemmend auf den Parasympathikus. Es wird dank seiner spasmolytischen (krampflösenden) Wirkung bei Durchfallerkrankungen, Darmkoliken und Regelbeschwerden eingesetzt.

Sympathomimetika ähneln dem Adrenalin. Mittel wie Ephedrin werden gegen Kreislaufschwäche, Asthma und Bronchitis verwendet. Sie sind aber gleichzeitig aufputschende Drogen bzw. Dopingmittel.

Antihistaminika werden gegen Allergien eingesetzt. Sie hemmen, indem sie mit der allergieauslösenden Verbindung Histamin in Konkurrenz treten.

Mittel gegen Infektionen

Infektionen werden durch Krankheitserreger verursacht. Die wichtigsten Erreger sind Bakterien, Viren und Pilze.

Antibiotika sind die wirksamsten Mittel gegen **Bakterien**. Alexander Fleming entdeckte 1928 durch Zufall, dass Ausscheidungsprodukte von Schimmelpilzen Bakterien schädigen. Dies war die Geburtsstunde des Penicillins.

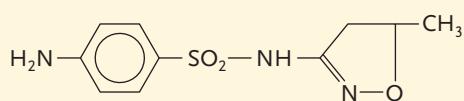
Seither wurden eine große Anzahl von Pilzkulturen und anderen Kleinlebewesen gefunden oder gezüchtet, um Mittel herzustellen, die die Zellwände von Bakterien oder ihre Proteinbiosynthese schädigen.

Neben den verschiedenen Penicillinarten gehören Cephalosporine, Tetracycline, Makrolide und andere zu den Antibiotika.

Augmentin ist das bekannteste Breitbandantibiotikum. Es enthält ein halb synthetisches Penicillin, dessen viergliedriger Ring durch einen Zusatz stabilisiert ist.

Sulfonamide, R-SO₂-NH₂, sind gegen Bakterien wirksam, weil sie einem Bakterienwuchsstoff (der p-Aminobenzencarbonsäure) ähnlich sind. Sulfonamide sind kompetitive Hemmstoffe, d. h., sie verdrängen den Wuchsstoff. Ihre Wirkung wurde 1935 von **Gerhard Domagk** entdeckt. Sie wurden zwischenzeitlich durch die Antibiotika verdrängt. Da aber viele Bakterienstämme bereits Resistzenzen (Widerstandsfähigkeit) gegen Antibiotika aufgebaut haben, greift man wieder öfter auf Sulfonamide zurück.

Sulfmethoxazol (in Bactrin enthalten) ist ein oft verwendetes Sulfonamid.



Viren bedienen sich des Stoffwechsels der menschlichen Zellen, sind sehr wandlungsfähig, werden rasch resistent und können daher nur sehr schwer bekämpft werden. Zu den Viruserkrankungen zählen Grippe, Hepatitis (Gelbsucht), FSME (eine von Zecken übertragene Hirnkrankheit), Aids sowie einige Krebsarten. Zur Behandlung versucht man, das menschliche Immunsystem zu stärken. Medikamente, die versuchen, das Eindringen von Viren in die Wirtszellen zu verhindern, sowie Mittel gegen die Virenvermehrung haben oft ungünstige Nebenwirkungen.

Fungizide dienen in der Medizin, aber auch in der Landwirtschaft, zur Bekämpfung von Pilzen. Pharmazeutische Fungizide werden auch als Antimykotika bezeichnet.

Mittel gegen Krebserkrankungen

Unter der Krankheitsbezeichnung Krebs versteht man bösartige Geschwulste (maligne Tumore), die ein unkontrolliertes Zellwachstum aufweisen. Auch die Leukämien, bei denen zu viele weiße Blutkörperchen gebildet werden, zählen zu den Krebserkrankungen. Krebsauslösende Stoffe werden Carcinogene oder Cancerogene genannt.

Cytostatika sind Teilungsgifte, die hemmend auf die Vermehrung der Krebszellen einwirken. Als Gifte wirken sie aber auch auf normale Zellen, vor allem auf solche mit hoher Teilungsrate. Daher werden durch Cytostatika vor allem die Keimzellen, die Darmschleimhaut, blutbildendes Gewebe und Haarwurzelzellen geschädigt. Der Einsatz von Cytostatika wird als Chemotherapie bezeichnet.

Als Cytostatika dienen u. a. der Natur entnommene giftige Alkaloide, giftige Schwermetallverbindungen sowie Stoffe, die von im Ersten Weltkrieg entwickelten Kampfstoffen abgeleitet werden.

Die **Strahlentherapie** ist eine weitere Möglichkeit der Tumorbekämpfung. Dabei wird das befallene Organ mit energiereicher ionisierender Strahlung (Gamma-, Röntgen- oder Elektronenstrahlung) bestrahlt.

Weiters können radioaktive Nuklide, die sich in befallenen Organen anreichern oder in diese implantiert werden, eingesetzt werden. Beispielsweise wird radioaktives Iod bei Schilddrüsenerkrankungen oder das dem Calcium ähnliche radioaktive Strontium bei Knochenkrebs verwendet.

Herzmittel

Das Herz überführt die aus dem venösen Teil des Kreislaufs stammende Blutmenge in das Arteriensystem. Dabei werden im Ruhezustand von einem gesunden Herz etwa fünf Liter pro Minute in die Blutbahn befördert. Bei Belastung pumpt das Herz eines austrainierten Sportlers bis zu 40 Liter pro Minute. Der Herzmuskel hat infolge seiner ununterbrochenen Tätigkeit einen besonders hohen Bedarf an Nährstoffen und Sauerstoff.

Die Herzaktivität wird durch das sympathische und das parasympathische Nervensystem gesteuert. Eine verminderte Leistungsfähigkeit des Herzens wird Herzinsuffizienz genannt.

Betablocker sind Arzneistoffe, die die Wirkung des Stresshormons Adrenalin und des Neurotransmitters Noradrenalin hemmen, indem sie die entsprechenden Rezeptoren blockieren. Sie senken die Herzfrequenz und damit den Blutdruck.



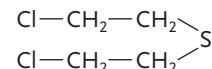
Virenerkrankungen können nicht mit Antibiotika behandelt werden.



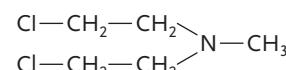
Recherchieren Sie, welche wichtigen Krankheiten von Bakterien verursacht werden und welche (außer den angeführten) zu den Viruserkrankungen zählen.



Haarausfall bei Chemotherapie



Kampfstoff Lost (Senfgas, Gelbkreuz)



Cytostatikum N-Lost

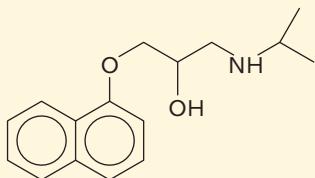


Ionisierende Strahlung und Strahlenbelastung siehe Kap. C, 6.



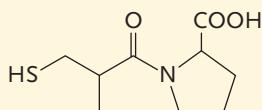
JAMES WHYTE BLACK,
1924 BIS 2010, SCHOTTISCHER
PHARMAKOLOGE, NOBELPREIS
FÜR MEDIZIN 1988

Propanolol, der erste Betablocker, wurde 1963 von **James Whyte Black** entwickelt.



ACE-Hemmer („angiotensin converting enzymes“) sind ebenfalls Arzneistoffe zur Therapie von Bluthochdruck (Hypertonie). Sie hemmen ein blutdrucksteigerndes Enzym. ACE-Hemmer zählen zu den umsatzstärksten Pharmazeutika.

ACE-Hemmer **Captopril**

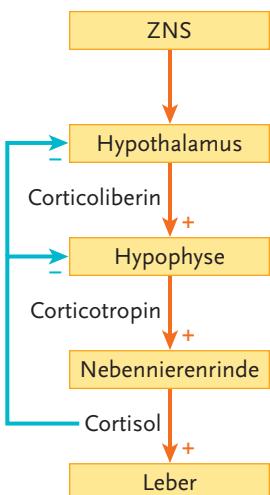


Glyceroltrinitrat (bekannt als Sprengstoff „Nitroglycerin“) wird in Form von Nitrokapselfn bei akuter Angina Pectoris angewandt. Es handelt sich dabei um eine Durchblutungsstörung des Herzens, die meist auf der Verengung eines Herzkrankgefäßes beruht.

Wenn ein Herzkrankgefäß verstopft wird (z. B. durch ein Blutgerinnsel), sterben Teile des Herzmuskelns ab und es liegt ein lebensbedrohlicher **Herzinfarkt** vor. Zur Behandlung werden Betablocker, ACE-Hemmer und ASS verwendet.

Calcium-Antagonisten und Diuretika sind die wichtigsten Mittel gegen die Höhenkrankheit.

 Das Peptidhormon Insulin kann gentechnisch hergestellt werden. Siehe Kap. B, 5.2.



Die übergeordnete Hormondrüse Hypothalamus wird durch Rückkopplung selbst gesteuert.

„+“ = stimulierend
„-“ = hemmend

Diuretika entziehen den Zellen Wasser, indem die Rückresorption von Wasser durch die Niere vermindert und damit die Ausscheidung vermehrt wird. Sie wirken Wasseransammlungen (Ödemen) entgegen und entlasten dadurch das Herz.

Antidiabetika

Antidiabetika sind Medikamente gegen die Zuckerkrankheit (Diabetes mellitus).

- Typ-1-Diabetes ist angeboren. Die Bauchspeicheldrüse produziert zu wenig des blutzuckersenkenden Hormons Insulin. Betroffene müssen sich ständig Insulin spritzen.
- Typ-2-Diabetes wird auch als Wohlstandsdiabetes bezeichnet. Aufgrund genetischer Disposition, falscher Ernährung und Übergewicht kommt es zur Insulinresistenz der Zellen. Die Bauchspeicheldrüse reagiert mit erhöhter Insulinproduktion. Sobald sie dies nicht mehr schafft, bricht die Krankheit aus. Orale Antidiabetika hemmen die Aufnahme von Zucker aus dem Darm. Die beste Therapie ist aber eine Änderung des Lebensstils mit weniger Nahrungsaufnahme und mehr Bewegung.

Hormone

Hormone sind chemische Signalstoffe. Sie werden in spezialisierten Zellen (meist in einer Drüse) produziert und vom Blut zu einem Zielorgan transportiert. Dort üben sie eine Regulierungsfunktion aus. Die Tätigkeit vieler Hormondrüsen wird vom Zentralnervensystem und vom Hypothalamus vom Gehirn aus gesteuert.

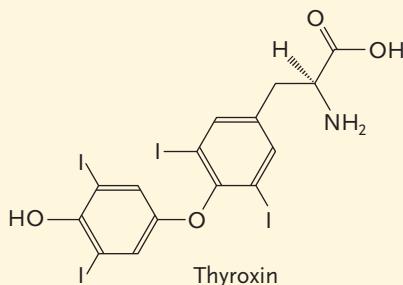
Beispiel für die Hierarchie der Hormone:

Der Hypothalamus steuert über das Hormon Corticoliberin die Hypophyse, diese mit Corticotropin die Nebennierenrinde, worauf diese Cortisol ausschüttet. Cortisol wiederum steuert die Leber und andere Organe und wirkt zusätzlich in einem Regelkreis zurück auf die Corticoliberinproduktion der Hypophyse.

Die Bauchspeicheldrüse produziert sowohl **Insulin** (senkt den Glucosespiegel nach der Nahrungsaufnahme) als auch seinen Gegenspieler **Glucagon** (hebt den Glucosespiegel bei Belastung). In Krisensituationen schüttet das Nebennierenmark das Stresshormon **Adrenalin** aus, das neben der Hebung des Glucosespiegels auch die Herzfrequenz steigert, den Blutdruck erhöht und die Pupillen weitet. Insulin und Glucagon sind Peptidhormone.

Die Schilddrüse erzeugt **Calcitonin**, das den Mineralstoffhaushalt (vor allem den Ca^{2+} -Spiegel im Blut) reguliert.

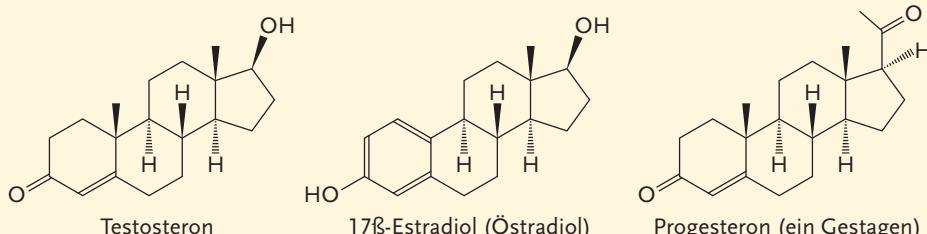
Die Schilddrüse produziert auch **Thyroxin**, eine iodhaltige Verbindung, die sich von der Aminosäure Tyrosin ableitet. Thyroxin steuert den Energiestoffwechsel und die Geschwindigkeit von Stoffwechselvorgängen.



Die Keimdrüsen, d. h. die Eierstöcke bzw. die Hoden, produzieren nicht nur Eizellen bzw. Samenzellen, sondern sie schütten auch die Sexualhormone aus. Dies sind bei der Frau die **Östrogene** (Follikelhormone) und die **Gestagene** (Corpus-luteum-Hormone), beim Mann die **Androgene** (vor allem Testosteron). Die Androgene haben neben ihrer genitalen auch eine starke anabole (muskelaufbauende) Wirkung. Sie werden in der Viehzucht und im Sport vielfach missbraucht.

Die Östrogene steuern u. a. den weiblichen Zyklus, die Entwicklung der Brustdrüsen und die Anlage von Fettdepots unter der Haut. Die Gestagene wirken auf die Gebärmutter schleimhaut, die Brustdrüsen und steuern die Schwangerschaft.

Alle Geschlechtshormone sind Steroide.



Die Ovulationshemmung (Hemmung des Eisprungs) durch die „Pille“ – die beispielsweise Ethinylestradiol enthält – dient der Verhütung von Schwangerschaften. Älteren Frauen werden oft Östrogene und Gestagene verschrieben, um das plötzliche Ende der körpereigenen Hormonproduktion im Klimakterium abzumildern. Es ist nicht eindeutig geklärt, ob diese Hormongaben cancerogen wirken können.



Blut soll ständig etwa 0,1 % Glucose (Traubenzucker, Blutzucker) enthalten.



Bei nuklearen Katastrophen entsteht auch das radioaktive Iodnuklid ^{131}I , das bei Aufnahme die Schilddrüse schädigt. Bei den Behörden lagern für einen solchen Fall Kaliumiodidtabletten: Rechtzeitig eingenommenes KI sättigt die Schilddrüse mit nicht radioaktivem Iod und verhindert damit die Aufnahme des ^{131}I .

Andererseits kann mit radioaktiven Nukliden Schilddrüsenkrebs behandelt werden.

Ein Pionier der Hormonforschung war Adolf Butenandt, der Tausende Liter Harn schwangerer Stuten aufarbeitete, um zu wenigen Milligramm der Steroidhormone zu gelangen.



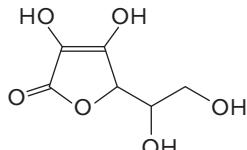
ADOLF BUTENANDT, 1903 BIS 1995, DEUTSCHER BIOCHEMIKER, NOBELPREIS FÜR CHEMIE 1939



Diskutieren Sie (auch fächerübergreifend) die Themen Schwangerschaft, Empfängnisverhütung und Schwangerschaftsabbruch.



Carotininformel siehe
NAWI I/II, Kap. C, 4.5.



Vitamin C = L(+)-Ascorbinsäure



Vitamine

Vitamine sind Stoffe, die lebensnotwendig sind (wie der Name sagt), die aber vom Körper nicht selbst hergestellt werden können. Sie müssen daher mit der Nahrung zugeführt werden. Vitamine sind meist Vorstufen von Coenzymen. Sie können in wasserlösliche (B, C und H) und fettlösliche Vitamine (A, D, E und K) eingeteilt werden.

Vitamin A (Retinol) entsteht aus Carotin. Es ist für den Sehvorgang essenziell. Hohe Überdosierungen wirken toxisch.

Unter **Vitamin B** ist eine Vielzahl wasserlöslicher Vitamine zusammengefasst, die für Stoffwechselvorgänge (z. B. die Wasserstoffübertragung) in den Zellen verantwortlich sind.

Vitamin C ist das einzige Vitamin, von dem größere Mengen (etwa 100 mg pro Tag) notwendig sind. Für Schwangere und Stillende sowie zu Erkältungszeiten wird eine Zufuhr von 200 mg pro Tag empfohlen. Vitamin C wirkt als Antioxidationsmittel und Radikalfänger auch vorbeugend gegen Krebs. Eine Überdosierung ist nicht möglich. Die Mangelkrankheit heißt Skorbut (Seefahrerkrankheit).

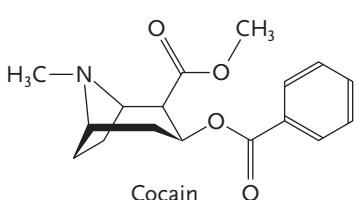
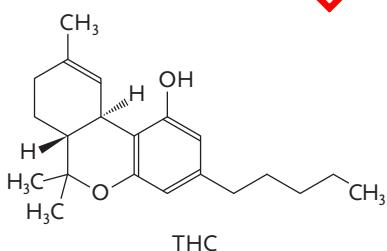
Vitamin D (Calcitriol) wird in der Haut bei Einstrahlung von Sonnenlicht aus einem Provitamin erzeugt. Es ist ein Hormon für den Calciumstoffwechsel.

Bei ausgewogener Ernährung (mit ausreichend Obst und Gemüse) ist die Einnahme von Vitaminpräparaten nicht notwendig.

11.2 Drogen

⚠ Das englische Wort „drug“ wird nicht nur für Drogen, sondern auch für Medikamente verwendet.

⚠ Auf Gebinden, die reines Coffein oder Nicotin enthalten, muss das Totenkopfsymbol aufgedruckt sein.



Der menschliche Körper verfügt über Mechanismen, um Gifte unschädlich zu machen oder in wasserlöslicher Form auszuscheiden. Gifte werden dabei entweder gespalten (hydrolysiert) oder durch Oxidation bzw. Reduktion wasserlöslich gemacht oder nach Kopplung an wasserlösliche Verbindungen (meist Zucker) ausgeschieden. Es gibt aber auch Verbindungen, bei denen die Entgiftungsmechanismen versagen. Wenn sie auch berauschende oder bewusstseinsverändernde Wirkung zeigen, spricht man von Drogen.

Nicotin, Coffein und der **Alkohol** Ethanol sind giftig oder gesundheitsschädlich. Sie sind aber aus historischen Gründen in entsprechender Verdünnung oder mit bestimmten Einschränkungen im Handel legal erhältlich. Dies darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass auch diese Stoffe abhängig machen.

Der Besitz bzw. Handel mit nachstehenden Stoffen ist in Österreich verboten:

Cannabis (Marihuana, Haschisch) ist die am häufigsten konsumierte illegale Droge. Die psychotropen Inhaltsstoffe von Hanfpflanzen heißen Cannabinoide. Der wichtigste Vertreter ist das Tetrahydrocannabinol (THC).

Cocain ist ein Tropanalkaloid mit hohem Abhängigkeitspotenzial. Es wird aus dem südamerikanischen Cocastrauch gewonnen. Seine Wirkung ist stimulierend, aber auch betäubend und analgetisch.

Opiate sind die im Sekret des Schlafmohns enthaltenen Alkalioide. Wegen der extrem hohen Suchtgefahr werden Schmerzmittel aus Opiaten in Apotheken und Krankenhäusern speziell gesichert.

Lysergsäurediethylamid (LSD) ist ein synthetisch hergestelltes Mutterkornalkaloid. Es ruft starke Halluzinationen hervor.

Methylendioxymethylamphetamin (MDMA, Ecstasy) ist eine dem Adrenalin ähnliche, synthetische, stark euphorisierende Droge. Es steigert das Verlangen nach Sex, vermindert aber die Fähigkeit dazu.

Der immer häufiger vorkommende Medikamentenmissbrauch ähnelt aufgrund der vergleichbaren Abhängigkeit dem Konsum von Drogen.

11.3 Doping

Doping ist bei Weitem nicht nur im Bereich des Spitzensports angesiedelt. Man schätzt, dass allein in Österreich etwa 80 000 Freizeitsportler und Bodybuilder zu Dopingmitteln greifen. Viele Dopingmittel stammen aus der Drogenszene und diese Mittel sind wiederum vielfach dem pharmazeutischen Bereich entnommen.

Anabolika sind Muskelaufbaustoffe. Es handelt sich dabei um männliche Sexualhormone, Sympathomimetika und Polypeptid-Wachstumsfaktoren. Die Nebenwirkungen sind gravierend: Diese Mittel führen zu Herz- und Leberschäden und bei Frauen zur Vermännlichung. Bei Männern kommt es infolge der Überdosierung nicht zu gesteigerter Potenz, sondern zu Hodenschrumpfung, Impotenz und Zeugungsunfähigkeit.

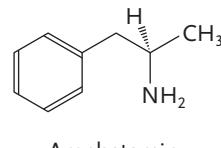
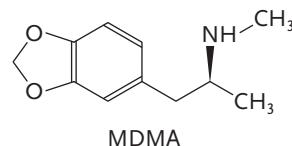
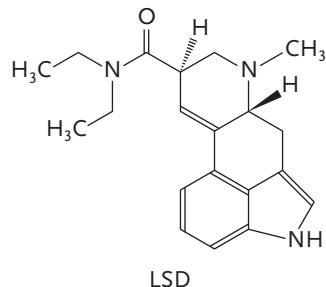
Stimulanzen sind wie die Sympathomimetika meist dem Adrenalin ähnlich. Sie gelten als die klassischen Dopingmittel, weil sie es Sportlern ermöglichen, die letzten Leistungsreserven abzurufen. Bekannte Stimulanzen sind Amphetamine (Speed), N-Methylamphetamine (Pervitin), Ephedrin, MDMA und Cocain.

Analgetika (Schmerzmittel) werden in Training und Wettkampf eingesetzt. Sie erhöhen die natürliche Leistungsgrenze und die Risikobereitschaft. Daraus folgende Entzündungen werden meist mit Corticoiden behandelt, wobei nicht ausgeheilte Entzündungen bei gleichzeitigem Fehlen der Schmerzsymptome ein großes Verletzungsrisiko in sich bergen.

Blutdoping bedeutet, dass sich Sportler vor Wettkämpfen Infusionen mit Fremdblut oder Eigenblut geben lassen. Doping mit Eigenblut ist nachträglich nicht nachweisbar, es sei denn, man findet Indizien wie gebrauchte Blutbeutel.

EPO (Erythropoetin) ist ein körpereigenes Hormon, das die vermehrte Bildung der für den Sauerstofftransport im Blut verantwortlichen roten Blutkörperchen (Erythrozyten) veranlasst. Ein hoher Gehalt an Erythrozyten (Hämatokritwert) ist für Sportler gefährlich, weil die Gefahr von Thrombosen (Verstopfung von Blutbahnen) besteht. Doping mit EPO ist mittlerweile gut analytisch nachweisbar.

⚠️ Coca-Cola enthielt bis 1906 Cocain.



⚠️ Im Zweiten Weltkrieg war es bei Piloten üblich, außer den üblichen Aufputschmitteln Nicotin und Coffein auch Amphetamine zu nehmen.

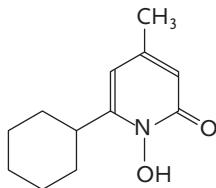
Der Tod des Radrennfahrers Tom Simpson bei der Tour de France 1967 war auf die Einnahme von Amphetamine zurückzuführen.

⚠️ Bei der Tour de France 2008 wurde ein Österreicher positiv auf EPO getestet. Er hätte damit die Gesamtbergwertung gewonnen.



Ziele erreicht? – „Pharmazeutika – Drogen – Doping“

- 11.01** Führen Sie weitere Gruppen von Pharmazeutika außer den angeführten an.
- 11.02** Erstellen Sie die Elektronenformel von N₂O.
- 11.03** Behandlung von Barbitursäure mit Natronlauge ergibt des Dinatriumsalz. Weiterreaktion mit Chlorethan liefert das Diethylbarbiturat (Veronal). Wie lauten die beiden Gleichungen?
- 11.04** Womit kann die Acetylsalicylsäure ASS in Salicylsäure und Essigsäure gespalten werden?
- 11.05** Erstellen Sie die chemischen Formeln von Ibuprofen und Diclofenac.
Ibuprofen: 2-(4-Methylpropyl-phenyl)-propansäure
Diclofenac: 2-[(2,6-Dichlorphenylamino)-phenyl]-ethansäure
- 11.06** Histamin entsteht durch Decarboxylierung (CO₂-Abspaltung) aus der Aminosäure Histidin. Wie sieht die Formel von Histamin aus?
- 11.07** Erstellen Sie die chemischen Formeln für das einfachste Sulfonamid, das p-Aminobenzensulfonamid, sowie für das von Sulfonamiden verdrängte Bakterienvitamin PAB (p-Aminobenzencarbonsäure).
- 11.08** Ciclopirox ist ein lokales Antimykotikum gegen Fusspilz. Geben Sie seine Summenformel an.
- 11.09** Ascorbinsäure ist ein Reduktionsmittel. Sie wird dabei an den enolischen OH-Gruppen oxidiert. Wie sieht die Formel des entstehenden dreifachen Ketons aus?
- 11.10** Warum gibt die nationale Dopingagentur NADA eine Positivliste heraus, aus der Sportler entnehmen können, welche Nahrungsergänzungsmittel (NEM) zertifiziert und damit frei von Dopingmitteln sind?
- 11.11** Wie sieht die Formel von Pervitin aus?



Ciclopirox

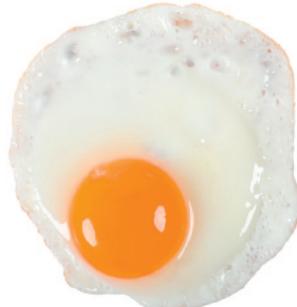
„Enol“ = Hydroxygruppe an einer Doppelbindung



B Biotechnologie

In diesem Kapitel wird die Biotechnologie als interdisziplinäre Ingenieurwissenschaft mit den drei Säulen der Biochemie, der Mikrobiologie und der Verfahrenstechnik dargestellt. Das biochemische Verständnis der Hauptnährstoffe und deren Stoffwechselwege in der Zelle sind wichtige Voraussetzungen für die Anwendung von Mikroorganismen in der biotechnologischen Verfahrenstechnik. Traditionelle und neu entwickelte biotechnologische Verfahren, die von der Brauereitechnologie bis zur Herstellung von Pharmazeutika reichen, unterstreichen die Komplexität der Anwendung lebender Zellen in technischen Prozessen.

| | |
|---|------------------|
| 1 Grundlagen der Biochemie und Ernährung | Seite 106 |
| 2 Molekulare Grundlagen der Zelle und Genetik..... | Seite 119 |
| 3 Stoffwechselprozesse | Seite 130 |
| 4 Mikrobiologie | Seite 143 |
| 5 Biotechnologische Verfahrenstechnik..... | Seite 148 |



Spiegelei



Ein Hühnerei besteht zu rund 13 % aus Eiweiß. Was sind die anderen Bestandteile?



GERARDUS JOHANNES MULDER,
1802 BIS 1880, NIEDERLÄNDI-
SCHER ARZT UND BIOCHEMIKER



Enzyme siehe Kap. B, 3.1.



Essenzielle Aminosäuren
siehe CD, Kap. C, 5.

1 Grundlagen der Biochemie und Ernährung

Lebewesen benötigen neben Wasser vor allem drei Grundnährstoffe: Proteine (Eiweiß), Fette und Kohlenhydrate.

1.1 Proteine

Gegen Mitte des 19. Jahrhunderts verwendete Gerardus Johannes Mulder für stickstoffhaltige Stoffe in tierischen Geweben, die mengenmäßig den ersten Platz einnahmen, den Begriff Proteine, abgeleitet von „proteion“ (altgriechisch an erster Stelle). Da Proteinuntersuchungen in weiterer Folge vor allem an Hühnereiweiß durchgeführt wurden, setzte sich im deutschen Sprachraum der Begriff „Eiweiß“ durch.



Meine Ziele

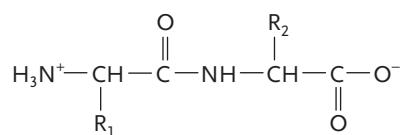
Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Proteine** nach ihrem Aufbau und ihren Aufgaben unterscheiden;
- darstellen, wie eine **Peptidbindung** entsteht;
- das Zustandekommen der **räumlichen Struktur eines Proteins** erklären;
- den **Proteininhalt** einer Probe aufgrund des Stickstoffgehaltes berechnen;
- **Raumstruktur, Nichtproteinkomponente** und **biologische Funktion eines Proteins** bewerten.

Die Proteine spielen in der lebenden Zelle nicht nur mengenmäßig, sondern auch funktionell eine herausragende Rolle.

- Als **Strukturproteine** sind sie am Aufbau der Zellen und größerer Zellkomplexe (der Organe, des Bindegewebes, der organischen Substanz der Knochen) beteiligt.
- **Membranproteine** tragen auch zum Transport von Stoffen in die Zelle und aus der Zelle im Rahmen des Stoffwechsels bei. Transportproteine sind für den Transport außerhalb der Zellen verantwortlich, z. B. der rote Blutfarbstoff Hämoglobin für den Sauerstofftransport von der Lunge zu den Körperzellen.
- **Speicherproteine**, wie das Gluten in den Getreidearten Weizen, Roggen, Gerste und Hafer, versorgen den Keimling mit den nötigen Stickstoffverbindungen.
- In der Biotechnologie stehen die **Enzyme**, die die biochemischen Reaktionen im Stoffwechsel katalysieren, im Mittelpunkt des Interesses.

Bausteine der Proteine sind die Aminosäuren, konkret die Stereoisomere der L-Aminosäuren (siehe Kap. 1.7.2). In pflanzlichen und tierischen Geweben sind 20 Aminosäuren für den Aufbau der Proteine verantwortlich, die sogenannten proteinogenen Aminosäuren. Die Aminosäuren sind über Peptidbindungen (Amidbindungen) zu Polymeren verknüpft. Die Bindung entsteht zwischen der Carboxylgruppe einer Aminosäure und der Aminogruppe der folgenden Aminosäure unter Wasserabspaltung.



Strukturformel der Peptidbindung am Beispiel eines Dipeptids: R₁, R₂ ... Seitenäste (Seitenketten) der Aminosäuren

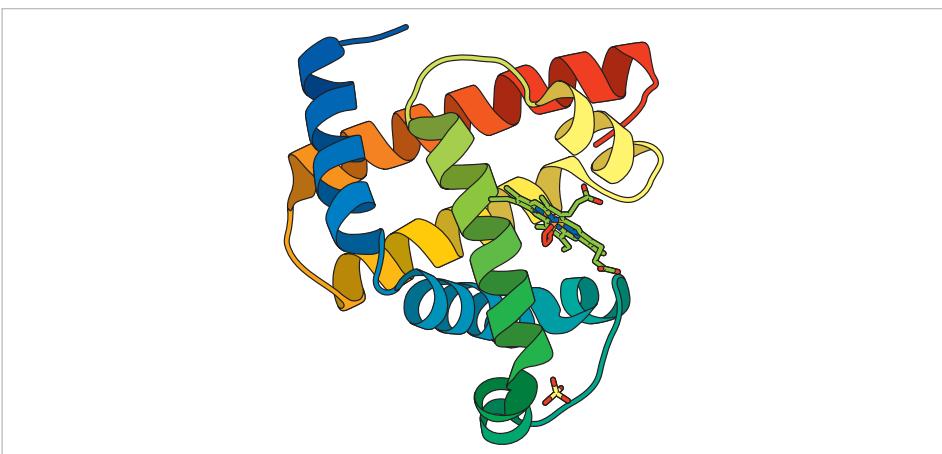
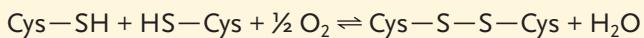
Protein (Eiweiß): Makromolekül aus ca. 100 bis zu 10 000 Aminosäuren, die durch Peptidbindungen verknüpft sind

Die Folge der Aminosäuren, die Aminosäuresequenz, auch Primärstruktur genannt, ist genetisch determiniert. Sie bestimmt durch den chemisch-physikalischen Charakter der einzelnen Aminosäuren, die als Seitenäste (Seitenketten) aus der Peptidbindungskette (Hauptkette) ragen, die Raumstruktur und die weiteren Eigenschaften der Proteine.

Ausbildung der Raumstruktur eines Proteinmoleküls

Hydrophobe (unpolare) Aminosäuren bilden durch hydrophobe Wechselwirkungen einen inneren Zusammenhalt des Proteinmoleküls und damit seine Gestalt. Nach außen hin ragen aus der Hauptkette die Seitenketten der hydrophilen (polaren) Aminosäuren, die über Wasserstoffbrückenbindungen mit Wassermolekülen eine Hydrathülle ausbilden und damit die Eigenschaft der Wasserlöslichkeit (ein molekular disperses System) bewirken.

Weitere innere (intramolekulare) Bindungen ergeben sich aus der elektrostatischen Wechselwirkung zwischen positiv geladenen Seitenketten basischer Aminosäuren und negativ geladenen Seitenketten saurer Aminosäuren. Eine besonders starke Bindung in Form der kovalenten Bindung ergibt sich durch die Disulfidbrücke zwischen zwei L-Cystein-Seitenketten. Die Disulfidbrücke wird durch Oxidation (Dehydrogenierung) gebildet. Die Reaktion ist durch Reduktionsmittel reversibel.



Modell des Myoglobins, des roten Muskelfarbstoffes

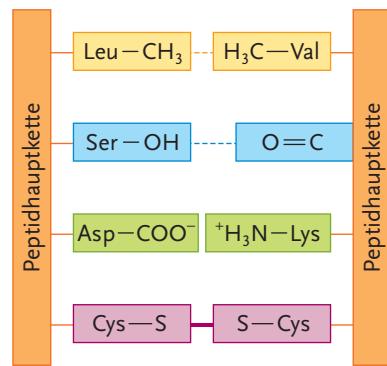
Die Raumstruktur eines Proteins wird auch als Kettenkonformation bezeichnet. Dabei findet man geometrisch geordnete Abschnitte (z. B. eine schraubenförmige Helixstruktur oder Faltblattstruktur) und Abschnitte ohne geometrische Ordnung („random coil“ = Zufallsknäuel). Die geometrisch geordneten Abschnitte eines Proteins werden als Sekundärstruktur bezeichnet, die räumliche Anordnung des ganzen Proteinmoleküls als Tertiärstruktur. Weiter bestehen manche Proteine aus mehreren Peptidhauptketten (Quartärstruktur), so das als Transportprotein erwähnte Hämoglobin, das aus vier Proteinuntereinheiten besteht (tetrameres Protein).

Primärstruktur: Abfolge der Aminosäuren

Sekundärstruktur: einzelne geordnete Abschnitte des Proteinmoleküls (Helix oder Faltblatt)

Tertiärstruktur: räumliche Gestalt eines ganzen Proteinmoleküls

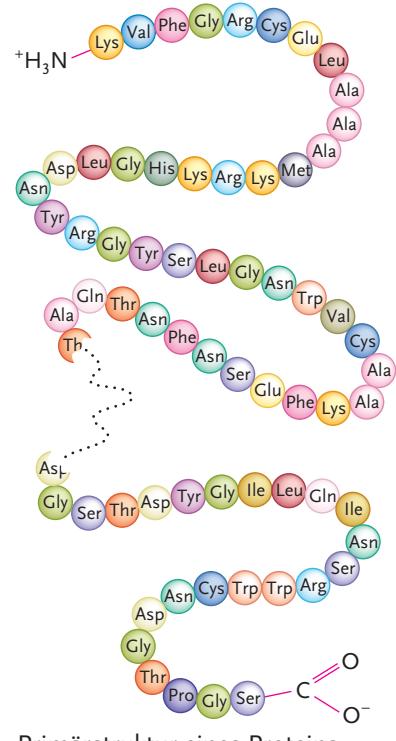
Quartärstruktur: Aggregat aus mehreren Proteinmolekülen (Untereinheiten)

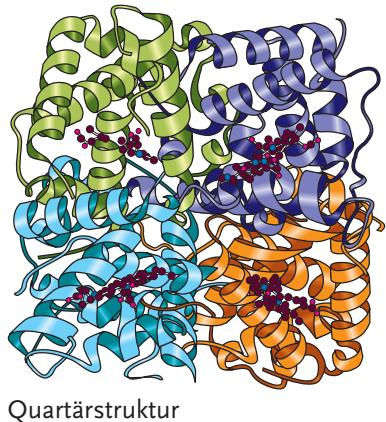


Wechselwirkungen zwischen Aminosäuren-Seitenketten innerhalb eines Proteins. Von oben nach unten von der schwächsten zur stärksten Bindung: Hydrophobe Wechselwirkung, Wasserstoffbrücke zwischen Seitenkette und $-\text{CO}$ der Hauptkette, elektrostatische Wechselwirkung, kovalente Bindung.

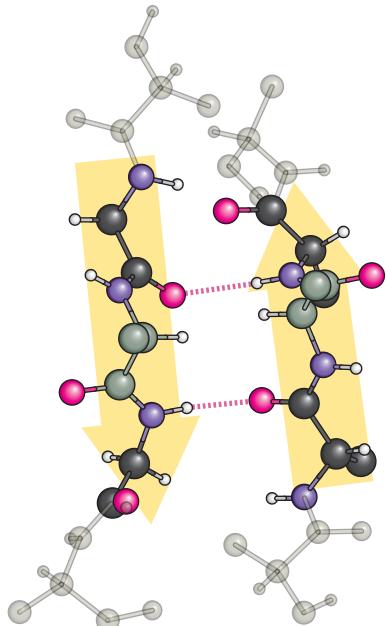
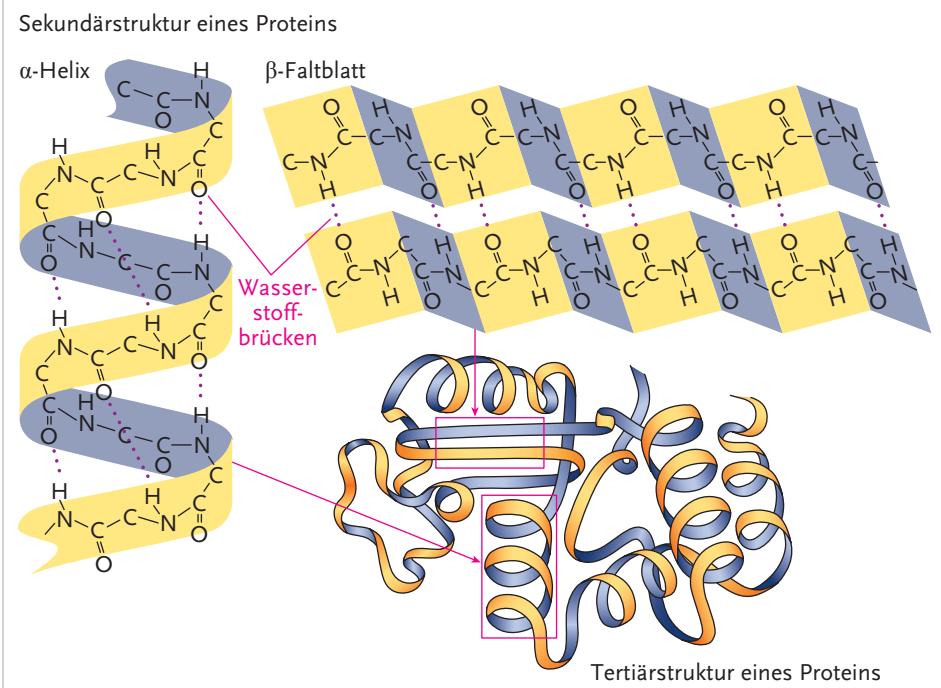


Welche Aminosäuren werden in der Darstellung der Wechselwirkungen (siehe oben) mit den verwendeten Abkürzungen bezeichnet?





Quartärstruktur

Sekundärstruktur β -Faltblatt mit zwei H-Brücken zwischen dem O-Atom (rot) und dem H-Atom (weiß)

⚠ Zusammengesetzte Proteine werden oft auch als Proteide bezeichnet.

🔗 Coenzyme siehe Kap. B, 3.1.

Die biologische Funktion eines Proteins steht mit der Raumstruktur in unmittelbarem Zusammenhang. Wird die Raumstruktur verändert, z. B. irreversibel durch Hitzeeinwirkung, spricht man vom Denaturieren des Proteins, das dadurch seine Funktionalität verliert.

Zusammengesetzte Proteine enthalten Nichtproteinbestandteile, die prothetische Gruppe, die für die biologische Funktion des Proteins von ausschlaggebender Bedeutung ist.

| Zusammengesetztes Protein | Prothetische Gruppe | Beispiel |
|---------------------------|---------------------|----------------------------|
| Metallprotein | Häm mit Eisen | Hämoglobin im Blut |
| Phosphoprotein | Phosphat | Casein in Wiederkäermilch |
| Lipoprotein | Lipid (Fett) | Gluten (Weizeneiweiß) |
| Glycoprotein | Kohlenhydrat | Allergene aus Birkenpollen |

Auch viele Enzyme sind zusammengesetzte Proteine, die als Nichtproteinbestandteil ein Coenzym (auch Cofaktor genannt) enthalten. Coenzyme sind jedoch im Gegensatz zu den zuvor genannten irreversibel gebundenen prothetischen Gruppen reversibel an das Protein gebunden und können dissoziiert werden.

Nach ihrer Raumstruktur und damit ihren Eigenschaften können Proteine in zwei Gruppen eingeteilt werden:

- **Globuläre Proteine** (auch **Sphäroproteine** genannt): Die Raumstruktur entspricht weitgehend einem Knäuel (siehe „random coil“). Die Proteine zeichnen sich durch gute Wasserlöslichkeit aus. Beispiele dafür sind das Hühnereiweiß (Ovalbumin) und das Molkeneiweiß (Lactalbumin), wobei unter Albuminen generell wasserlösliche Proteine zu verstehen sind. In die Gruppe der globulären Proteine sind auch die Enzyme einzuradern.
- **Fibrilläre Proteine** (auch **Faserproteine** oder **Skleroproteine** genannt): Die Raumstruktur entsteht aus mehreren parallel angeordneten, in sich geometrisch geordneten Polypeptidhauptketten (z. B. Faltblattstruktur oder Tripelhelix). Beispiele dafür sind das Kollagen in Bindegewebe, Haut und Knochen und das Keratin in Haaren und Wollfasern.

Der durchschnittliche Stickstoffgehalt von Proteinen beträgt 16 %. Diesen Umstand macht man sich in der Analytik zunutze, indem von organischen Substanzen der N-Gehalt ermittelt (z. B. mit Methode nach Kjeldahl) und daraus durch Multiplikation mit dem Faktor 6,25 (100/16) die Menge an Protein berechnet wird.

Beispiel 1.1.01: Proteingehalt eines Frischkäses

Einwaage 1 g Frischkäse

Verbrauch an 0,1 mol/L HCl: 13,7 ml

Berechnung:

1 ml 0,1 mol/L HCl entspricht 0,1 mMol H⁺ bzw. NH₃ bzw. N

0,1 mMol N = 1,4 mg N

1 ml 0,1 mol/L HCl entspricht somit 1,4 mg N * 6,25 = 8,75 mg Protein

13,7 ml 0,1 mol/L HCl entspricht daher (gerundet) 120 mg Protein

120 mg Protein in 1 g Frischkäse entspricht 12 % Protein



Methode nach Kjeldahl:

Aufschluss der N-haltigen Substanz mit konzentrierter H₂SO₄ zu (NH₄)₂SO₄, Wasserdampfdestillation mit NaOH und Titration des in Borsäure aufgefangenen NH₃ mit 0,1 mol/L HCl.

Proteine haben eine Molekülmasse zwischen 10 000 und 1 Mio. Da. Da eine durchschnittliche Aminosäure mit 120 Da berechnet wird, bestehen Proteine aus 80 bis 8 000 Aminosäuren. Unter 10 000 Da spricht man von Peptiden, die im Gegensatz zu Proteinen keine definierte räumliche Struktur ausbilden.

Da (Dalton) ist die Maßeinheit für die Molekülmasse. 1 Da = 1 u = 1/12 der Masse des ¹²C-Nuklids.



Ziele erreicht? – „Proteine“

- 1.1.01** Welche Aufgaben übernehmen Proteine in lebenden Zellen?
- 1.1.02** Was versteht man unter proteinogenen Aminosäuren?
- 1.1.03** Definieren Sie die Begriffe Primär-, Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur.
- 1.1.04** Welche Rolle spielen hydrophobe Aminosäuren im Zusammenhang mit der räumlichen Struktur eines Proteins?
- 1.1.05** Der Ausschnitt aus der Primärstruktur eines Proteins besteht aus den Aminosäuren Asparaginsäure, Leucin, Tyrosin, Lysin und Threonin. Beschreiben Sie die möglichen Funktionen dieser Aminosäuren in der Raumstruktur des Proteins.
- 1.1.06** Ordnen Sie Ovalbumin, Kollagen, Keratin und Lactalbumin den globulären bzw. den fibrillären Proteinen zu.
- 1.1.07** Handelt es sich beim Bluteiweiß Albumin und bei der Seide um globuläre Proteine? Begründen Sie Ihre Entscheidung.
- 1.1.08** Kjeldahl-Beispiel: Ein Hühnerei besteht zu 13 % aus Protein. Wie viel Milliliter 0,1 mol/L HCl werden bei einer Einwaage von 1,4 g Hühnerei verbraucht?



Pommes frites enthalten ca. 15 % Fett, die rund 40 % des Energieanteils ausmachen. Kartoffelchips enthalten etwa 35 % Fett, der Energieanteil des Fettes beträgt ca. 60 %. (Prozentangaben berechnet auf Lebensmittelgewicht bzw. Energiegehalt des Lebensmittels.)

1.2 Fette

Der Fettbedarf eines Erwachsenen liegt bei 60 bis 80 g je Tag. Individuell übersteigt die tägliche Fettaufnahme diesen Wert oft erheblich. Dies liegt häufig im besonderen Geschmackserlebnis fetter Speisen. Fett ist der energiereichste Nahrungsbestandteil. Übergewicht und daraus resultierend die sogenannten Zivilisationskrankheiten, wie Bluthochdruck, erhöhter Serumcholesterinspiegel, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Diabetes, sind die Folge davon. Bei der gesundheitspolitischen Zielsetzung, den Fettverbrauch zu reduzieren, wird Fett allerdings zu rasch ein negatives Image zugeschrieben. Fett hat nämlich als Quelle für essenzielle Fettsäuren und fettlösliche Vitamine große Bedeutung in der täglichen Ernährung. Es kommt auf die richtige Wahl des Fettes an. Pflanzlichen Fetten und Fischfetten ist der Vorzug zu geben. Seit einigen Jahren wird Fett auch in Form von Methylestern als Treibstoff bzw. Treibstoffzumischung für Dieselfahrzeuge eingesetzt. Um den Wettbewerb mit Speisefetten zu entlasten, ist es eine Zukunftsvision der Biotechnologie, Fett durch Algenzucht zu gewinnen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

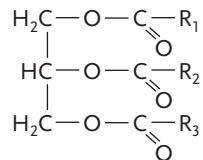
- die **Fette** nach ihrem Aufbau und ihren Aufgaben unterscheiden;
- das **Neutralfettmolekül** darstellen;
- die Eigenschaften der **verschiedenen Fettsäuren** erklären;
- die ernährungsphysiologische Bedeutung der **mehrfach ungesättigten Fettsäuren** beschreiben;
- die **Gruppen der Lipoide** und ihre Bedeutung darstellen.

Fette (Lipide) sind durch die gemeinsame Eigenschaft der Löslichkeit in unpolaren Lösungsmitteln, wie z. B. Chloroform, Ether, Petrolether (Leichtbenzin), definiert. Man unterscheidet zwischen **Neutralfetten** und **Lipoiden**.

Die biologische Funktion der Lipide ist einerseits im Aufbau von Membranen gemeinsam mit Proteinen (z. B. Zellmembranen) zu sehen, andererseits stellen sie eine wichtige Form der gespeicherten chemischen Energie in Lebewesen dar.

Neutralfette

Neutralfette bestehen aus dem dreiwertigen Alkohol Glycerin (Glycerol), der mit drei Fettsäuren über Esterbindungen verknüpft ist. Davon leiten sich die Bezeichnungen Triglyceride oder Triacylglycerole ab.



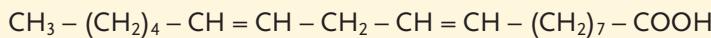
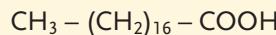
Strukturformel eines Neutralfettmoleküls. R₁, R₂, R₃ stellen die verschiedenen Fettsäuren dar.

Die chemisch-physikalischen Eigenschaften der Neutralfette leiten sich von den Eigenschaften der Fettsäuren ab. In pflanzlichen und tierischen Geweben kommen hauptsächlich Fettsäuren mit einer geraden Anzahl von C-Atomen vor, weil die Synthese aus C-2-Einheiten (aktivierter Essigsäure) erfolgt. Grundsätzlich unterscheidet man:



Aktivierte Essigsäure siehe
Kap. B, 3.2.

- Kurzkettige (bis zu zehn C-Atome) und langkettige Fettsäuren (ab zwölf C-Atomen)
- Gesättigte Fettsäuren (ausschließlich Einfachbindungen zwischen den C-Atomen)
- Einfach ungesättigte Fettsäuren (eine Doppelbindung an einer Stelle des Fettsäuremoleküls)
- Mehrfach ungesättigte Fettsäuren (zwei oder mehr Doppelbindungen)



Strukturformel einer gesättigten und einer zweifach ungesättigten Fettsäure mit je 18 C-Atomen: Stearinsäure und Linolsäure

Die meisten in der Natur vorkommenden Fettsäuren bestehen aus 16, 18 oder 22 C-Atomen. Die entsprechenden ungesättigten Fettsäuren weisen ein bis sechs Doppelbindungen auf.

| Fettsäure | Anzahl der C-Atome | Anzahl der Doppelbindungen |
|-------------------|--------------------|----------------------------|
| Palmitinsäure | 16 | – |
| Palmitoleinsäure | 16 | 1 |
| Stearinsäure | 18 | – |
| Ölsäure | 18 | 1 |
| Linolsäure | 18 | 2 |
| Linolensäure | 18 | 3 |
| Arachidonsäure | 20 | 4 |
| Erucasäure | 22 | 1 |
| Docosahexaensäure | 22 | 6 |

Das lang gestreckte Molekül der Fettsäuren ist mit seinem C-1-Atom, das die Carboxylgruppe trägt, über die Esterbindung (Sauerstoffbrücke des Alkohols) mit dem Glycerin verbunden. Das entgegengesetzte Ende der Kohlenwasserstoffkette der Fettsäure schließt mit einer Methylgruppe (CH_3), dem sogenannten Ω -C-Atom ab. Mehrfach ungesättigte Fettsäuren, die die erste Doppelbindung am dritten C-Atom, vom Ω -Ende gezählt, tragen, werden Ω -3-Fettsäuren genannt.

Die in Pflanzen und in den meisten Tierarten vorkommenden ungesättigten Fettsäuren weisen Doppelbindungen in Cisstellung (Z-Konfiguration) auf, d. h., die beiden H-Atome stehen auf derselben Seite der Bindungsebene. Als Konsequenz für die Raumstruktur ergibt sich ein Knick im Molekül der Fettsäure. Dieser Knick bewirkt eine Erhöhung des Abstandes zwischen den Kohlenwasserstoffketten eines Neutralfettes (Triacylglycerols) und somit eine Herabsetzung der hydrophoben Wechselwirkung. Die Folge ist in physikalischer Hinsicht ein niedrigerer Schmelzpunkt von ungesättigten Fettsäuren gegenüber den gesättigten mit gleicher Anzahl von C-Atomen. Dabei gilt aber grundsätzlich, dass der Schmelzpunkt wie bei den Kohlenwasserstoffen von der Kettenlänge (Anzahl der C-Atome) abhängt.

Hohe Schmelzpunkte ergeben sich durch gesättigte und langkettige, **niedrige Schmelzpunkte** durch ungesättigte und kurzkettige Fettsäuren



Strukturformel der Cis-(Z)- und Trans-(E)-Stellung



Doppelbindungen sind jeweils durch eine CH_2 -Gruppe getrennt = **isolierte Doppelbindungen**.



Besonders in Fischfetten kommen Fettsäuren mit 22 und mehr C-Atomen und bis zu sechs Doppelbindungen vor. Im Milchfett (in Butter) findet sich die gesättigte Buttersäure mit vier C-Atomen.



Physikalische Eigenschaften von **Kohlenwasserstoffen** siehe Kap. A, 2.



In **Österreich** wurde der Transfettsäuregehalt in verarbeiteten Fetten durch die **Transfettsäureverordnung** gesetzlich mit 2 % limitiert.



Halbfeste Fette sind bei Raumtemperatur fest, schmelzen jedoch bei Körpertemperatur (im Mund).



Mehrfach ungesättigte Fettsäuren, essenzielle Fettsäuren, Ω -3-Fettsäuren siehe CD, Kap. C, 5.



In wirtschaftlicher Hinsicht ist die **Sojabohne** die bedeutendste Quelle für Lecithin.

Unter **Emulgatoren** versteht man Stoffe, die durch ihren amphiphilen Charakter die Grenzflächenspannung herabsetzen und dadurch eine Verteilung von z. B. Fett in Wasser (Milch) oder Wasser in Fett (Butter) ermöglichen.



Biologische Membranen siehe Kap. B, 3.1.

Durch die Doppelbindung in Transisomerie bleibt die gerade Ausrichtung in der Kohlenwasserstoffkette erhalten. Transfettsäuren verhalten sich daher hinsichtlich physikalischer Eigenschaften, besonders des Schmelzpunktes, weitgehend wie gesättigte Fettsäuren.

Transfettsäuren (transisomere Fettsäuren) kommen in der Natur im Milch- und Körperfett von Wiederkäuern vor, wo sie im Zuge der Verdauung von den Pansenbakterien gebildet werden. Der natürliche Transfettsäuregehalt von Rinderfett (Milch- und Körperfett) liegt bei ca. 3,5 %. Außerdem kommen Transfettsäuren in verarbeiteten Fetten vor. Hier entstehen sie durch unvollständige Wasserstoffanlagerung (Hydrogenierung) bei der Fetthärtung. Darunter versteht man die katalytische Addition von atomarem Wasserstoff an die Doppelbindungen der natürlich vorkommenden Cisfettsäuren. Weiter bilden sich Transfettsäuren in hohen und langen Erhitzungsprozessen, z. B. beim Frittieren.

In den Neutralfettmolekülen sind jeweils zwei oder drei verschiedene Fettsäuren mit einem Molekül Glycerin verestert. Das durchschnittliche Vorkommen einzelner Fettsäuren ist dabei für eine bestimmte Fettart charakteristisch. In Abhängigkeit vom Schmelzpunkt einzelner Fettsäuren ergibt sich für Neutralfette gleichfalls ein für die jeweilige Fettart charakteristischer Schmelzbereich. Ihrem Zustand bei Raumtemperatur (20 bis 23 °C) entsprechend werden flüssige Fette als Öle bezeichnet.

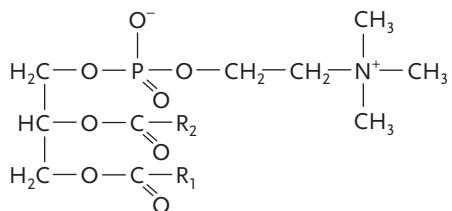
In ernährungsphysiologischer Hinsicht gelten mehrfach ungesättigte Fettsäuren als besonders wertvoll. Gesättigte und besonders Transfettsäuren werden hingegen als Risikofaktor für koronare Herzerkrankungen angesehen.

Lipoide

Lipoide sind fettähnliche Stoffe mit sehr unterschiedlichen chemischen Strukturen.

Von den Lipoiden haben zwei Gruppen besondere biologische Bedeutung: die Phospholipide und die Gruppe der Steroide und Terpene.

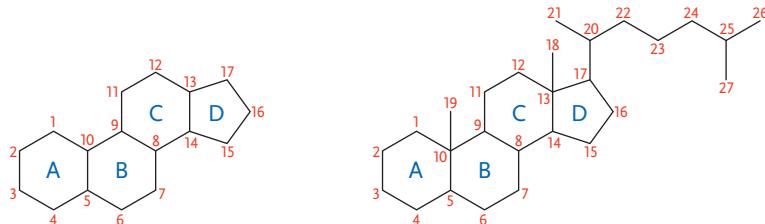
Phospholipide sind in ihrer Struktur den Neutralfetten verwandt. Das wohl bekannteste Phospholipid ist Lecithin. Es besteht aus Glycerin, das mit zwei Fettsäuren verestert ist. Die dritte alkoholische Gruppe ist mit Phosphorsäure verestert, die weiter mit dem Aminoalkohol Cholin über eine Esterbrücke verbunden ist.



Strukturformel des Lecithins mit Phospho-Cholin-Gruppe

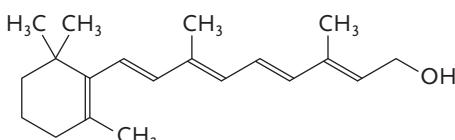
Die Konsequenz aus der Phospho-Cholin-Gruppe ist ein polarer Charakter in diesem Bereich des Moleküls, während das Lecithin im Abschnitt der beiden Fettsäuren unpolar wirkt. Diese Eigenschaft der polaren und unpolaren Bereiche im selben Molekül, amphiphil genannt, ist einerseits für die Anwendung als **Emulgator** ausschlaggebend, andererseits erklärt es die Bedeutung beim Aufbau von **biologischen Membranen**, z. B. Zellmembranen.

Die Gruppe der **Steroide** und **Terpene** ist hinsichtlich Molekülaufbau von cyclischen und kondensiert cyclischen Grundstrukturen geprägt. Grundstruktur der Steroide ist das Steran. In dieser Gruppe finden wir als bekanntesten Vertreter das Cholesterin (Cholesterin). Ihm werden häufig nachteilige Effekte in Bezug auf koronare Herzerkrankungen zugewiesen, wobei aber nur die sogenannten Low-Density-Lipoproteine (LDL) dafür verantwortlich zeichnen. Cholesterin selbst ist als wichtiges Stoffwechselprodukt an der Bildung von z. B. Sexualhormonen, aber auch Gallensäuren beteiligt. Auch das Vitamin D, das Cholecalciferol, wird aus Cholesterin synthetisiert.



Strukturformel von Steran und Cholesterin

Die Terpene sind in ihrer Grundstruktur ebenfalls durch cyclische Verbindungen charakterisiert, wobei auch aromatische und kondensierte aromatische Strukturen vorkommen. Die Carotinoide (Provitamin A) und die fettlöslichen Vitamine A (Retinol), E (Tocopherol) und K (Phyllochinon) zählen zu dieser Verbindungsklasse.



Strukturformel des Vitamins A (Retinols)



Cyclische Kohlenwasserstoffe siehe Kap. A, 2.



Vitamine siehe Kap. C, 5.



Karotten



Ziele erreicht? – „Fette“

- 1.2.01** Welche biologische Funktion haben Fette?
- 1.2.02** Welche Eigenschaft haben Neutralfette und Lipoide gemeinsam und wodurch unterscheiden sie sich?
- 1.2.03** Beschreiben Sie den molekularen Aufbau einer gesättigten und einer mehrfach ungesättigten Fettsäure sowie einer Transfettsäure.
- 1.2.04** Worin liegt der Unterschied zwischen Fetten und Ölen?
- 1.2.05** Welches Phospholipid hat wirtschaftlich große Bedeutung und was ist seine Funktion?
- 1.2.06** Beschreiben Sie den Aufbau des Lecithinmoleküls und begründen Sie die Wirkung als Emulgator.
- 1.2.07** Welche im Stoffwechsel bedeutenden Substanzen werden aus Cholesterin synthetisiert?

1.3 Kohlenhydrate

Bei den Kohlenhydraten handelt es sich um eine faszinierende Gruppe der Naturstoffe, ohne die ein Leben auf unserem Planeten nicht möglich wäre. Sie entstehen in grünen Pflanzen durch die Energie des Sonnenlichts aus Kohlenstoffdioxid und Wasser. Kohlenhydrate sind einerseits das wichtigste Stützelement der Pflanzen, andererseits neben Fett der wichtigste Speicherstoff. Für die Tierwelt und den Menschen sind sie aber auch der mengenmäßig wichtigste Bestandteil der Ernährung. Auch als Ausgangsstoff für die Erzeugung von Biogas und Bioethanol sowie vielen Erzeugnissen der Biotechnologie sind Kohlenhydrate unverzichtbar.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Kohlenhydrate** nach ihrem Aufbau und ihren funktionellen Gruppen systematisch zuordnen;
- **Beispiele für Zucker** nennen und ihren reduzierenden oder nicht reduzierenden Charakter darstellen;
- die **Bedeutung der glycosidischen Bindung** bei der Bildung von Di-, Oligo- und Polysacchariden erklären;
- den **Unterschied zwischen Stärke und Cellulose** beschreiben;
- die **Bedeutung der Kohlenhydrate als Verdickungs- und Geliermittel** in der Lebensmittelwirtschaft erklären;
- die **Ballaststoffe** in Gruppen einteilen und ihre physiologische Funktion erklären.



Falsch wäre es, die Zucker als „Kohlehydrate“ zu bezeichnen, da sich ihr Name nicht von Kohle ableitet.



Nukleinsäuren siehe Kap. B, 2.1. **Glycoproteine** siehe Kap. B, 1.1.



Zuckerstoffwechsel siehe Kap. B, 3.2.

Der Name **Kohlenhydrate**, synonym auch Zucker oder Saccharide genannt, leitet sich von der formalen Betrachtung der Summenformel als Hydrate (Verbindungen des Wassers) mit Kohlenstoff ab.

Allgemeine Formel der Kohlenhydrate: $C_xH_{2y}O_z$

Nach der **Anzahl der C-Atome** wird zwischen Triosen (drei C-Atome), Tetrosen (vier C-Atome), Pentosen (fünf C-Atome) und Hexosen (sechs C-Atome) unterschieden.

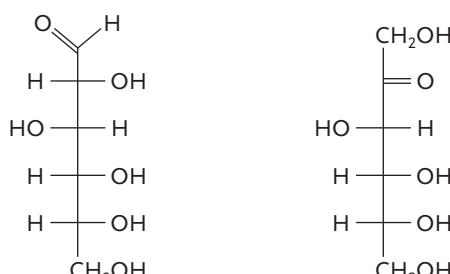
Diese Systematik gilt für **Monosaccharide** (Einfachzucker), die im Stoffwechsel als Einzelmoleküle von Bedeutung sind, in Verbindung mit anderen Stoffgruppen vorkommen (Nukleinsäuren, Glycoproteine) oder als Bausteine für weitere Gruppen von Kohlenhydraten Bedeutung haben. Nach der Anzahl der vorhandenen Monosaccharide (Einfachzucker) als Baustein der Kohlenhydrate wird wie folgt klassifiziert:

| Saccharide | Anzahl der Monosaccharidbausteine | Beispiele |
|--|-----------------------------------|---|
| Monosaccharide (Einfachzucker) | 1 | Hexosen: Glucose (Traubenzucker), Fructose (Fruchtzucker), Galactose (Schleimzucker) Pentosen: Ribose und Desoxyribose (in den Nukleinsäuren) Triosen: Glycerinaldehyd und Dihydroxyaceton (im Zuckerstoffwechsel) |

| | | |
|--|-------------------|--|
| Disaccharide (Zweifachzucker) | 2 | Maltose (Malzzucker; zwei Glucosemoleküle); Saccharose (Rüben- oder Rohrzucker; ein Molekül Glucose und ein Molekül Fructose), Lactose (Milchzucker; ein Molekül Glucose und ein Molekül Galactose) |
| Oligosaccharide (Mehrfachzucker) | 3 – 10 | Raffinose (Trisaccharid – Dreifachzucker aus je einem Molekül Galactose, Glucose, Fructose), Oligofructosen (Mehrfach-Fruchtzucker; Bestandteil von prebiotischen Lebensmitteln), Maltodextrine (Mehrfach-Glucose) |
| Polysaccharide (Vielfachzucker) | 11 – 5 000 | Stärke und Cellulose (Vielfachglucosen mit unterschiedlichen Bindungen) |



Prebiotische Lebensmittel enthalten quellfähige (lösliche) Ballaststoffe, die für die Ernährung und Entwicklung der Bakterien der Dickdarmflora von Bedeutung sind. Demgegenüber enthalten **probiotische Lebensmittel** (z. B. Joghurt) lebende Milchsäurebakterien.



Offenkettige Strukturformel der D-Glucose und D-Fructose – fischersche Projektionsformel

Die Strukturformeln der Glucose und Fructose unterscheiden sich dadurch, dass das C-1-Atom der Glucose eine Aldehydfunktion und das C-2-Atom der Fructose eine Ketofunktion aufweist.

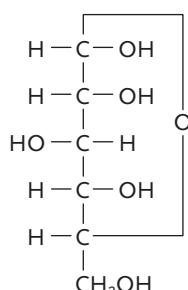


Aldehyde und **Ketone** siehe Kap. A, 5, **Alkohole** siehe Kap. A, 4.

Aldosen tragen eine Aldehydgruppe, **Ketosen** eine Ketogruppe.

An den übrigen C-Atomen finden wir alkoholische Hydroxylgruppen. Das jeweilige OH steht am C-5-Atom in der fischerschen Projektion rechts, es werden demnach die beiden Zucker als D-Stereoisomere bezeichnet. Die einzelnen Monosaccharide unterscheiden sich durch die Stellung der OH-Gruppen an den übrigen C-Atomen voneinander. So liegt z. B. der Unterschied zwischen den beiden Aldosen Glucose und Galactose nur an der Stellung der OH-Gruppe am C-4-Atom.

Aldehyd- und Ketogruppen zeigen große Reaktionsfähigkeit. Dies führt zur Reaktion mit der OH-Gruppe am C-5-Atom und zur Ausbildung eines Ringes über eine Sauerstoffbrücke.



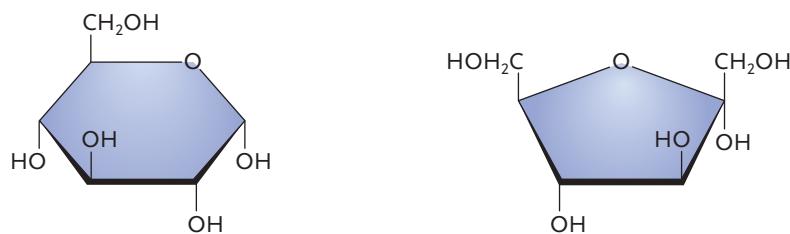
Strukturformel der D-Glucose nach Ringschluss zwischen der Aldehydgruppe am C-1-Atom und der alkoholischen OH-Gruppe am C-5-Atom – fischersche Projektionsformel



Die Unterscheidung einzelner Zucker durch die Isomerie der OH-Gruppe an einem C-Atom wird als **Epimerie** bezeichnet.

 Heterocyclen siehe
Kap. A, 7.3.

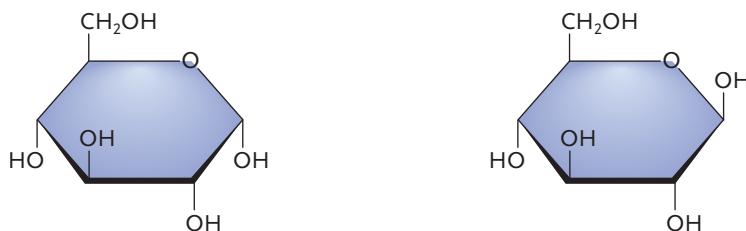
Auf diese Weise entsteht bei Aldosen ein 6-er Ring, abgeleitet vom Pyran die pyranide Form, und bei Ketosen ein Fünferring, abgeleitet vom Furan die furanoide Form. Die Zucker werden daher auch als **Pyranosen** oder **Furanosen** bezeichnet.



Strukturformel der D-Glucose und der D-Fructose in der haworthschen Ringform

Pentosen und Hexosen liegen meist in Ringform vor.

Am Beispiel der D-Glucose erkennt man die freie Drehbarkeit der OH-Funktion am chiralen C-1-Atom. In der Darstellung der pyranoiden Form unterscheidet man demnach die α -Glucose (OH am C-1-Atom nach unten gerichtet) von der β -Glucose (OH am C-1-Atom nach oben gerichtet).



Strukturformel der α -D-Glucose und der β -D-Glucose in der Ringform

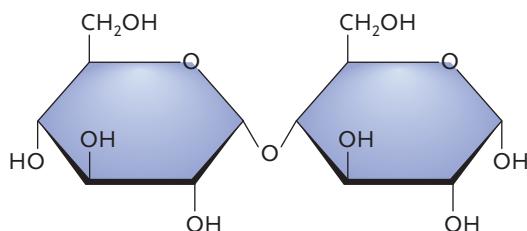
 Die Aldose **Glucose** ist der wichtigste reduzierende Zucker.

 Bei der **fehlingschen Probe** werden Cu^{2+} -Ionen zu einwertigem Cu^+ (als Cu_2O) reduziert, während der reduzierende Zucker Glucose zu Gluconsäure oxidiert wird.

Die α -Glucose und die β -Glucose stehen über die offenkettige Form mit der Aldehydgruppe im Gleichgewicht. Dadurch bleibt die reduzierende Wirkung des Zuckers erhalten. Die reduzierende Wirkung von Zuckern wird in manchen Nachweisreaktionen genutzt, z. B. beim Nachweis mit der fehlingschen Lösung.

Weiters ist die **reduzierende Wirkung** bei der nicht enzymatischen Bräunungsreaktion, der Maillardreaktion, einer komplexen Reaktion von reduzierenden Zuckern mit Aminen (z. B. Aminosäuren), z. B. beim Frittieren oder Backen, von Bedeutung.

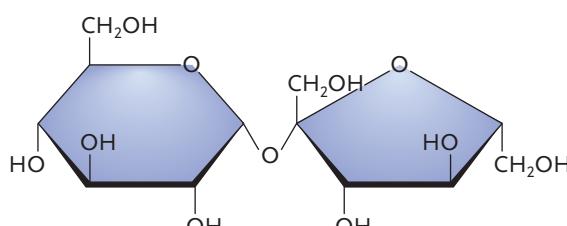
Auch nach Ringschluss zur Pyranose oder Furanose bleibt eine wesentliche Reaktionsfähigkeit am C-1-Atom von Aldosen bzw. am C-2-Atom von Ketosen erhalten, nämlich die Reaktion mit der OH-Gruppe eines weiteren Zuckermoleküls. Dabei wird unter Wasserabspaltung eine Sauerstoffbrücke zwischen den beiden Zuckermolekülen gebildet, die **glycosidische Bindung** genannt wird.



Strukturformel der Maltose mit der α -1,4-glycosidischen Bindung von zwei Glucosen

Die Verknüpfung von Monosacchariden erfolgt über die **glycosidische Bindung** (eine Etherbrücke).

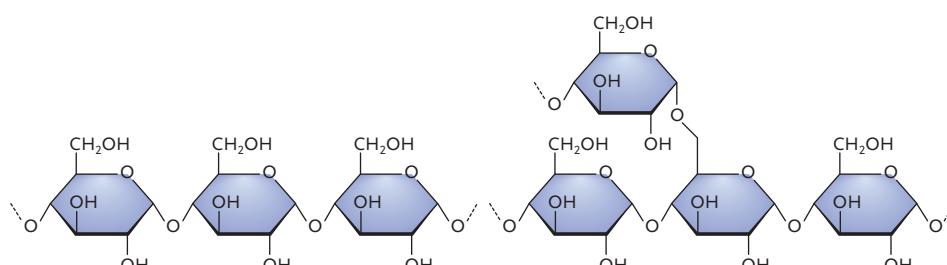
Sämtliche in der Tabelle angeführten Di-, Oligo- und Polysaccharide bestehen aus Monosaccharid-Bausteinen, die über glycosidische Bindungen verknüpft sind. Bleibt dabei das OH am C-1-Atom einer Aldose ungebunden, wie das bei der Maltose der Fall ist, weist das Disaccharid eine reduzierende Wirkung auf. Reagieren hingegen die beiden reaktionsfreudigen Funktionen am C-1-Atom der Aldosen und am C-2 der Ketosen miteinander, geht die reduzierende Wirkung im Disaccharid verloren, wie dies bei der Saccharose der Fall ist.



Strukturformel der Saccharose mit der glycosidischen Bindung zwischen dem C-1-Atom der α -D-Glucose mit dem C-2-Atom der β -D-Fructose

Laut Tabelle bestehen Polysaccharide aus über 10 bis zu mehr als 5 000 Einheiten an Monosacchariden. Die in der Natur häufigsten Polysaccharide bestehen aus Glucosebausteinen, verknüpft über glycosidische Bindungen. Es sind dies die Stärke und die Cellulose. Der Unterschied zwischen Stärke und Cellulose besteht in der Stellung der OH-Gruppe am C-1-Atom der Glucosebausteine. Stärke ist das Polymer der α -D-Glucose, Cellulose das der β -D-Glucose.

Stärke besteht aus zwei Fraktionen, Amylose und Amylopektin. Amylose ist ein lang gestrecktes, schraubenförmiges Makromolekül. Amylopektin ist in seiner räumlichen Struktur verzweigt, und zwar setzt bei etwa jedem 25. Glucosemolekül der Hauptkette eine über eine α -1,6-glycosidische Bindung verknüpfte Seitenkette aus Glucoseeinheiten an.

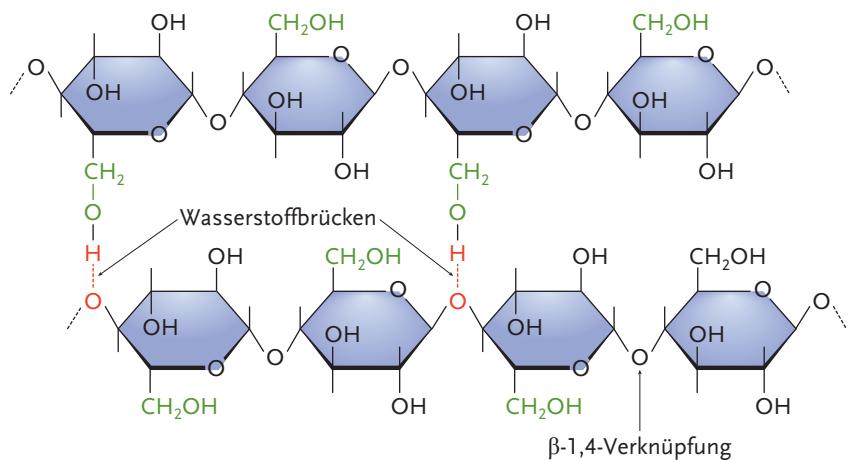


Strukturausschnitt aus der unverzweigten Stärkefraktion Amylose und dem verzweigten Amylopektin

Die β -1,4-glycosidische Bindung der Cellulose führt zu abwechselnd um 180° gedrehten Glucoseeinheiten und zu einer geradlinigen Struktur. Diese ermöglicht es, dass sich mehrere Makromoleküle zu parallel angeordneten Strukturen über Wasserstoffbrücken binden. Daraus entstehen mechanisch sehr feste und widerstandsfähige Faserbündel, die eine wichtige Stützfunktion in Pflanzen erfüllen und dem Menschen auch als Baumwolle dienen. Die Struktur der Cellulose verhindert zudem einen Abbau der Glucosemoleküle mit den Verdauungsenzymen, z. B. im Darm des Menschen. Wiederkäuer hingegen vermögen durch die Enzyme der Pansenbakterien die Cellulose abzubauen und zu verwerten.



Wir unterscheiden zwischen **reduzierenden** und **nicht reduzierenden Disacchariden**.



Strukturausschnitt aus der Cellulose mit jeweils um 180° gedrehten Glucoseeinheiten (grün markiert) und Wasserstoffbrücken zwischen den geradlinigen Makromolekülen (rot markiert)

Das Beispiel der Stärke und der Cellulose zeigt uns die beiden Hauptfunktionen von Kohlenhydraten in biologischen Systemen und Organismen, nämlich als **Energiespeicher** und **Strukturkohlenhydrate**.

Stärke ist ein typischer Vertreter der sogenannten **Speicherkohlenhydrate**, die dem Keimling die erforderliche Energie zur Verfügung stellen (z. B. Getreidekörner, Kartoffeln). Weitere Beispiele für Speicherkohlenhydrate sind das Inulin, ein Polymer der Fructose besonders in Wurzeln von Korbblüttern (Zichorien, Löwenzahn, Sonnenblumen) sowie das Disaccharid Saccharose in Zuckerrüben und Zwiebeln. Auch im Organismus der Säugetiere und des Menschen finden wir ein Speicherkohlenhydrat, das Glycogen, das eine ähnliche Struktur wie das Amylopektin hat. Glycogen ist der kurzfristig verfügbare Energiespeicher zur Aufrechterhaltung des Blutzuckerspiegels und findet sich vor allem in der Leber und in Muskeln.

! Mehr als 50 % des weltweit organisch gebundenen Kohlenstoffes liegen in Form von Cellulose vor!

! Das Außenskelett von Insekten, Krebs- und Spinnentieren besteht aus dem Polysaccharid Chitin, einem Polymer des Stickstoff-Essigsäure-Derivats der Glucose, N-Acetylglucosamin.

 Lebensmittelzusatzstoffe
siehe CD, Kap. C, 5.

Mannose ist eine Hexose, ein C-2-Atom-Epimer zur Glucose.

Cellulose ist ein Vertreter der sogenannten **Strukturkohlenhydrate**, die am Aufbau von Zell- und Organstrukturen in der Pflanzen- und Tierwelt von großer Bedeutung sind.

Weitere Strukturkohlenhydrate sind am Aufbau von Zellstrukturen und an der Bildung von Schleimen maßgeblich beteiligt. Für diese Polysaccharide ist die hohe Wasserbindungskapazität typisch. Dadurch finden sie bei der Herstellung von Lebensmitteln als Verdickungs- und Geliermittel Anwendung. Sie sind entweder natürlich in den Zutaten vorhanden oder werden dem Lebensmittel als Zusatzstoff zugesetzt.

- Die Verdickungsmittel Guarkeimkernmehl und Johanniskernkernmehl (aus Leguminosen samen) bestehen aus dem Polysaccharid Galactomannan (Hauptkette aus Mannoseeinheiten, kurze Seitenketten aus Galactose).
- Das Geliermittel Pektin (z. B. aus Äpfeln oder Zitrusfrüchten) ist ein Polymer aus Galacturonsäure, einem Oxidationsprodukt der Galactose.
- Agar-Agar wird als Geliermittel in der Lebensmittelproduktion und in Laboratorien zur Verfestigung von Nährböden verwendet. Es wird aus maritimen Algen gewonnen und besteht aus Galactoseeinheiten und Schwefelverbindungen der Galactose.

Strukturkohlenhydrate können von den menschlichen Verdauungsenzyme nicht abgebaut werden und sind daher energetisch nicht bzw. eingeschränkt verwertbar. In der Ernährungswissenschaft werden sie als **Ballaststoffe** bezeichnet, die wichtige Verdauungs- und Stoffwechselfunktionen erfüllen.

Unter **Ballaststoffen** versteht man im Allgemeinen die durch menschliche Verdauungsenzyme nicht abbaubaren Inhaltsstoffe von Lebensmitteln, im Besonderen sogenannte pflanzliche Faserstoffe. Man teilt sie in nicht quellfähige (unlösliche) und quellfähige (lösliche) Ballaststoffe ein.

| | Wirkung | Beispiele |
|--|--|---|
| Nicht quellfähige Ballaststoffe | Darmfüllung (Anregung der Darmperistaltik) | Cellulose, Lignin (Holzstoff) |
| Quellfähige Ballaststoffe | Nährstoff (Prebiotikum) für die Darmbakterien (Gesunderhaltung des Darms); Bindung von Gallensäuren (Senkung des Cholesterins); verlangsamte Aufnahme von Glucose (Regulierung des Blutzuckerspiegels, Slow-Carb-Effekt). | Pentosane (Vielfachzucker von Pentosen) in Roggenbrot, Schleimstoffe in Hafer, Pektin in Früchten |

Darmbakterien sind mit mehr als 50 % an der Masse des Darminhaltes (am Stuhlgewicht) beteiligt.



Ziele erreicht? – „Kohlenhydrate“

- 1.3.01** Wie lautet die allgemeine Formel der Kohlenhydrate und wie können Monosaccharide eingeteilt werden?
- 1.3.02** Ordnen Sie folgende Kohlenhydrate der Systematik nach dem Aufbau zu: Ribose, Lactose, Raffinose, Cellulose.
- 1.3.03** Beschreiben Sie die Reaktion des Ringschlusses zur pyranoiden Form der Glucose und zur furanoiden Form der Fructose.
- 1.3.04** Worin liegt der Unterschied zwischen α - und β -Glucose und welche Konsequenzen hat er für die Eigenschaften von Stärke und Cellulose?
- 1.3.05** Wovon hängt der reduzierende oder nicht reduzierende Charakter eines Disaccharids ab?
- 1.3.06** Beschreiben Sie die glykosidische Bindung.
- 1.3.07** Welche Wirkungen haben Ballaststoffe?

2 Molekulare Grundlagen der Zelle und Genetik

Nur ein kleines Teilgebiet der Biotechnologie steht manchmal im Rampenlicht öffentlichen Interesses, und zwar die Gentechnik, ein Teilgebiet der Molekularbiologie. Viele Anwendungen gentechnisch veränderter Organismen in der Medizin, der Pharmazie und auch im Bereich der Futtermittel-Zusatzstoffe werden als willkommen und selbstverständlich akzeptiert, einzig und allein die Verwendung gentechnisch veränderter Nutzpflanzen bei der Herstellung von Lebensmitteln wird in einigen Ländern, darunter Österreich, zurzeit abgelehnt.

2.1 DNA und genetischer Code

Die Verbraucher/innen können sich **gentechnikfreie** Lebensmittel wünschen, **genfreie** gibt es aber nicht! In jeder pflanzlichen und tierischen Zelle, die wir mit der Nahrung aufnehmen, sind die Gene der Pflanze oder des Tieres enthalten. Dies stellt jedoch kein Problem dar, da die in der Nahrung enthaltenen Gene teilweise schon bei der Zubereitung, in jedem Fall während der Verdauung, in die einzelnen Bausteine zerlegt und für den Aufbau körpereigener Verbindungen herangezogen werden.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe „**Gene**“ und „**genetischer Code**“ erklären;
- die **Bestandteile der Chromosomen** und ihren chemischen **Aufbau** beschreiben;
- den **Aufbau und die Bedeutung der DNA** darlegen.



Chromosomenpaare werden als **diploider Chromosomensatz** bezeichnet, einzelne Chromosomenstränge als **haploider Chromosomensatz**.



Zur Veranschaulichung der Größenordnungen sei das zur Jahrtausendwende entschlüsselte und 2001 veröffentlichte menschliche Genom herangezogen. Es besteht – und das in jedem einzelnen Zellkern – aus 23 Chromosomen-Doppelsträngen, also 46 Einzelsträngen, rund 23 000 Genen und aus etwa drei Milliarden Stickstoffbasenpaaren.

Genetically Modified Organisms (GMOs) enthalten mit molekulargenetischen Methoden eingepflanzte Fremdgene.



Pyrimidin und Purin siehe Kap. A, 7.3.

Die Eigenschaften der Organismen (Bakterien, Pflanzen, Tiere) sind in den **Erbanlagen** festgelegt. Diese bestehen aus den fadenförmigen **Chromosomen**, die der wesentliche Bestandteil des **Zellkerns** sind. **Körper- oder Gewebezellen** enthalten stets Chromosomenpaare, **Geschlechtszellen** einzelne Chromosomenstränge.

Gene sind einzelne Abschnitte auf den Chromosomensträngen, die jeweils ein oder mehrere bestimmte Eiweißmoleküle (Enzym bzw. Gewebe- oder Gerüsteiweiß) in der **Proteinbiosynthese** bestimmen und mittels weiterer Mechanismen bilden. Dadurch werden alle **Ausprägungen unseres Lebens** definiert, von den Abläufen des Stoffwechsels, die auf den Enzymen beruhen, bis hin zu der Charakteristik der Gewebe- und Gerüsteiweiße, die letztendlich auch die Merkmale **Gestalt und Aussehen** bestimmen. Die Gesamtheit aller Gene nennt man das **Genom**, das für jede Art spezifisch ist.

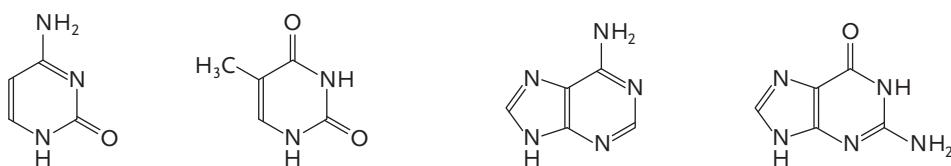
In chemischer Hinsicht besteht das Erbmaterial aus **Desoxyribonukleinsäure** (abgekürzt DNS oder englisch DNA, „A“ für Acid = Säure), deren Bausteine **vier organische Stickstoffbasen**, der Zucker **Desoxyribose** und **Phosphorsäure** sind.

Die **vier Stickstoffbasen, Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin**, treten jeweils in einer bestimmten Kombination und Folge im DNA-Strang auf und sind auf diese Weise für den **genetischen Code** verantwortlich, der die Proteinbiosynthese bestimmt.

Die DNA aller Lebewesen (Bakterien, Pflanzen, Tiere) und der Viren hat exakt den **gleichen chemischen Aufbau**. Daher werden einerseits Bausteine der Gene aus der Verdauung zum **Aufbau von körpereigenen Genen** herangezogen, andererseits ist dadurch die **Herstellung von GMO** durch Fremdgeneinpflanzung möglich.

Stickstoffbasen, Nukleoside, Nukleotide

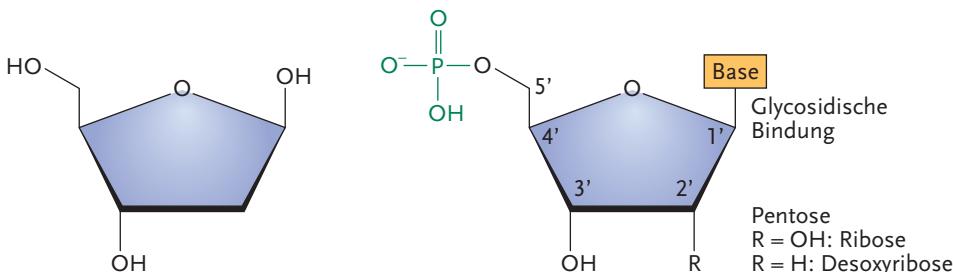
Zwei der vier Stickstoffbasen der DNA sind von der heterozyklischen Verbindung **Pyrimidin** und zwei von der heterozyklischen Verbindung **Purin** abgeleitet.



Strukturformeln der Pyrimidinbasen Cytosin und Thymin

Strukturformeln der Purinbasen Adenin und Guanin

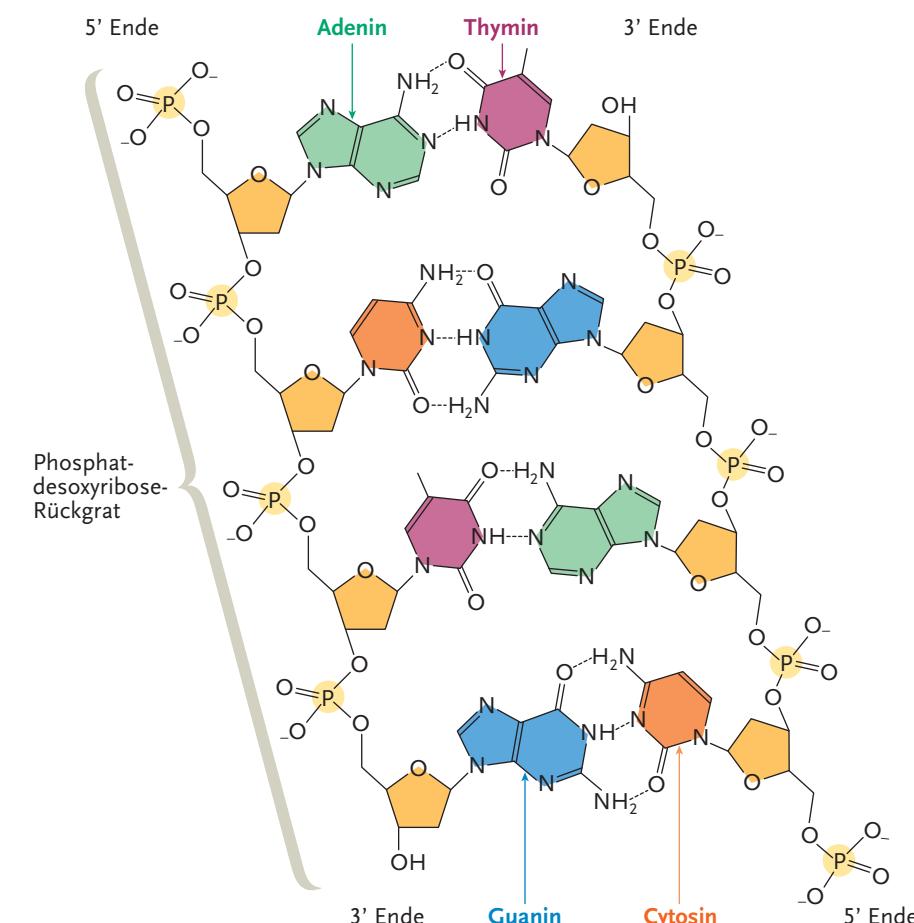
Über eine **glycosidische Bindung** sind die Stickstoffbasen mit der Pentose **Desoxyribose** am C-1-Aтом verknüpft. Weiters ist am C-5-Aтом der Ribose ein **Phosphatmoleköl** gebunden.



Strukturformeln der Desoxyribose und eines Nukleotidbausteins

Desoxyribonukleinsäure (DNA)

Die DNA besteht aus einem **helixförmigen Doppelstrang**. Nukleotide stellen die Einzelbausteine dar. Die beiden **Hauptstränge** werden aus den **Desoxyribosemolekülen**, verbunden über **Phosphatbrücken**, gebildet. Die Stickstoffbasen sind nach innen gerichtet. Über **Wasserstoffbrücken** sind die jeweils **korrespondierenden Basenpaare** Adenin und Thymin sowie Cytosin und Guanin verbunden.



Glycosidische Bindung und Pentosen siehe Kap. B, 1.3.



Die Verbindung einer Stickstoffbase mit einer Pentose wird als **Nukleosid** bezeichnet, die Verbindung eines Nukleosids mit einem Phosphatmoleköl als **Nukleotid**.



Abkürzungen der Stickstoffbasen:

A = Adenin, C = Cytosin, G = Guanin, T = Thymin

Zwischen A und T bestehen **zwei H-Brücken**, zwischen C und G **drei**.

Im nebenstehenden Ausschnitt aus der **Doppelhelix der DNA** bezeichnen die Zahlen die C-Atome der Desoxyribose.



Das Modell der Doppelhelix der DNA entdeckten 1953 die Biochemiker Francis Crick (GB) und James Watson (USA).



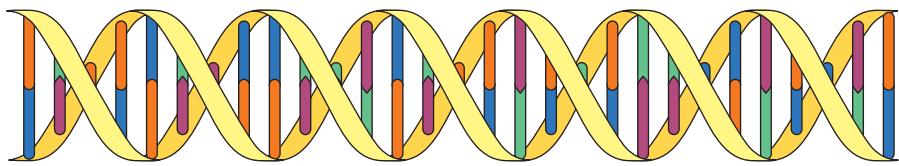
FRANCIS H. C. CRICK, 1916 BIS 2004, BRITISCHER BIOCHEMIKER



JAMES D. WATSON, GEB. 1928, US-AMERIKANISCHER BIOCHEMIKER



Aminosäuresequenz in der Proteinbiosynthese siehe Kap. B, 2.2.



Die Abfolge der Stickstoffbasen (Basensequenz) bestimmt den genetischen Code, der in weiterer Folge für die Primärstruktur (Aminosäuresequenz) der Proteine verantwortlich ist.



Ziele erreicht? – „DNA und genetischer Code“

- 2.1.01** Was versteht man unter Chromosomen und unter Genen?
- 2.1.02** Wie sind die Chromosomen von Körperzellen und von Geschlechtszellen aufgebaut?
- 2.1.03** Nennen Sie die Bausteine der DNA und beschreiben Sie ihren räumlichen Aufbau.
- 2.1.04** Ordnen Sie die Stickstoffbasen den heterozyklischen Verbindungen zu und beschreiben Sie die korrespondierenden Basenpaare mit ihren Bindungen zueinander.
- 2.1.05** Worin besteht der genetische Code und was bewirkt er?

2.2 Zellteilung und Proteinbiosynthese

Leben ist durch ständige Zellvermehrung gekennzeichnet. Besonders in Phasen der embryonalen, fötalen, kindlichen und jugendlichen Entwicklung können wir die Zellvermehrung am sichtbaren Wachstum erkennen. Aber nicht nur in diesen Phasen, sondern so lange der Mensch lebt, erneuern sich die Körperzellen durch ständige Zellteilung.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **Zellteilung** und **Proteinbiosynthese** erklären;
- die einzelnen Phasen der **Verdoppelung der DNA**, der **Replikation**, beschreiben;
- den Aufbau und die Bedeutung der verschiedenen **Formen der RNA** und die **Vorgänge der Proteinbiosynthese** darlegen;
- die Begriffe **Transkription** und **Translation** erklären.



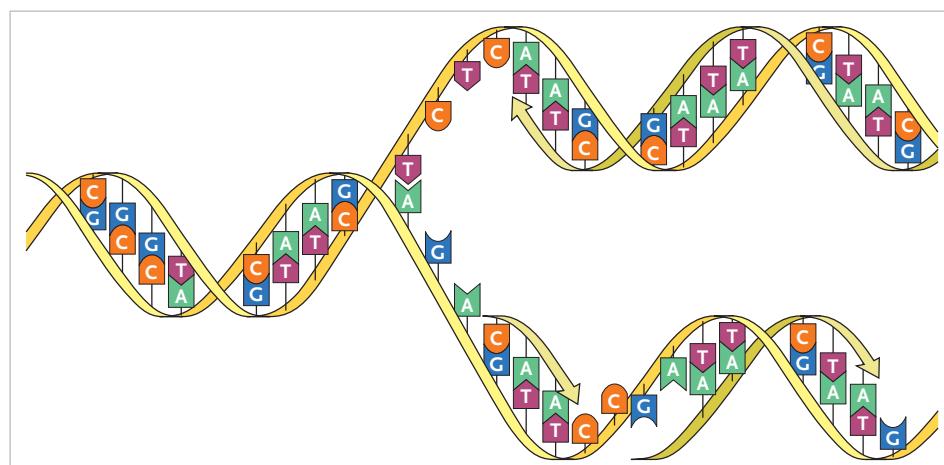
Mitose ist der biologische Fachausdruck für Zellteilung.

Zellteilung, Replikation

Voraussetzung für die **Zellteilung**, die Entwicklung zweier genetisch identischer Tochterzellen aus einer Mutterzelle, ist die **Verdoppelung der DNA**. Diesen Vorgang nennt man **Replikation**.

Bei der **Replikation** werden folgende Abschnitte unterschieden:

- **Initiationsphase:** Auf trennung der DNA-Doppelhelix durch das Enzym **Helicase** und Setzen eines **Primers** durch das Enzym **Primase**.
- **Elongationsphase:** Das Enzym DNA-Polymerase synthetisiert einen komplementären DNA-Hauptstrang (Tochterstrang) mit den jeweils komplementären Stickstoffbasen (A-T und C-G) zum Mutterstrang. Auf diese Weise entstehen **semikonservativ**, das heißt jeweils zur Hälfte erhaltend, zwei identische DNA-Doppelhelices.
- **Terminationsphase:** Ende der DNA-Polymerisation an einer besonders codierten Sequenz der Nukleotide.



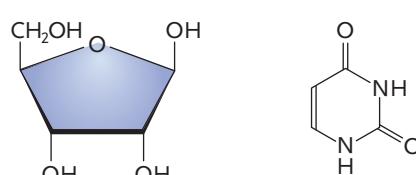
Schematische Abbildung der Replikation

Ribonukleinsäure (RNA)

Nach der **Verdoppelung der DNA** muss zur Neubildung einer Zelle auch der wichtigste Baustoff synthetisiert werden, nämlich Protein. Für die **Proteinbiosynthese** ist eine weitere Form der Nukleinsäuren, nämlich die **Ribonukleinsäure (RNA)**, erforderlich.

Desoxyribonukleinsäure und Ribonukleinsäure unterscheiden sich in drei Merkmalen:

- **Struktur:** Während die DNA eine Doppelhelix von enormer Länge bildet, sind RNA-Moleküle relativ kurze Moleküle aus einem Einfachstrang.
- RNA enthält die Pentose **Ribose**.
- Anstelle von Thymin enthält RNA die **Pyrimidinbase Uracil**, die die komplementäre Base zu Adenin bildet.



Strukturformeln der Pentose Ribose und der Pyrimidinbase Uracil

Wir unterscheiden drei Arten der RNA:

- **Messenger-RNA (mRNA):** Überträger des genetischen Codes an die **Ribosomen**.
- **Ribosomale RNA (rRNA):** Baustein der Ribosomen gemeinsam mit Proteinen.
- **Transfer-RNA (tRNA):** Überträger von Aminosäuren zur Proteinbiosynthese; für jede Aminosäure gibt es eine oder mehrere spezifische tRNAs.

Der **Primer** kennzeichnet und ermöglicht den Beginn der Anknüpfung neuer Nukleotide, siehe auch Kap. B, 2.3.



Das **menschliche Genom** besteht aus rund drei Milliarden Nukleotidpaaren mit einer DNA-Länge von etwa 1,8 Meter pro Zellkern!

Die **Ribosomen** sind Teile der Zellen (Organellen), an denen die Proteinbiosynthese stattfindet. Die Ribosomen befinden sich entweder frei im Cytosol oder an der Membran des endoplasmatischen Reticulum.



Aufbau der Zelle siehe Kap. B, 4.

Die **Transkription** erfolgt in einem Teil des Zellkerns, dem sogenannten **Nukleolus** oder Kernkörperchen. In diesem Teil des Zellkerns werden auch die rRNA und die tRNA synthetisiert.



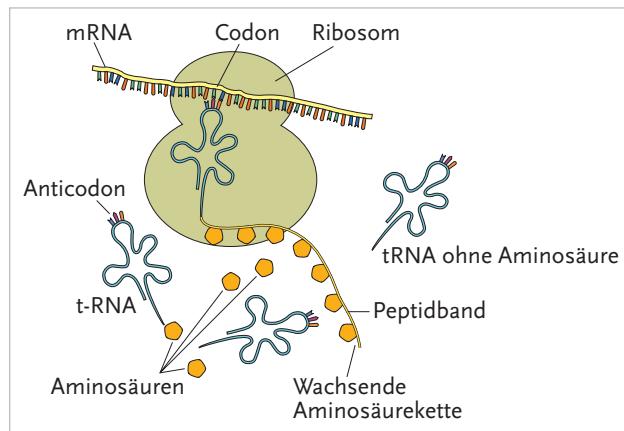
Kompletter genetischer Code.

Proteinbiosynthese

Bei der Synthese von Proteinen, die sowohl die äußere Erscheinungsform als auch den Stoffwechsel der Lebewesen determinieren, wird der **genetische Code** in zwei Schritten in die **Aminosäuresequenz** (Primärstruktur des Proteins) übersetzt.

Der Übertragung des genetischen Codes in der Proteinbiosynthese liegen folgende Vorgänge zugrunde:

- **Transkription:** Ein für ein Protein spezifischer **Abschnitt der DNA** wird auf eine **Messenger-RNA (mRNA)** in Form der korrespondierenden Basenpaare übertragen. Das entsprechende Enzym ist die **RNA-Polymerase**, die die einzelnen Nukleotide zur mRNA verbindet.
- **Translation:** An den **Ribosomen** wird die **mRNA** schrittweise und gemäß dem übertragenen Code von der tRNA abgetastet. Die Abfolge von drei Basen determiniert eine bestimmte Aminosäure. Die **tRNA** transportiert diese **Aminosäure** und dockt an den komplementären Basen der **mRNA** an. Die zuvor gebildete **Peptidkette** wird mit der Aminosäure verknüpft.



Die Abbildung zeigt die jeweils mit einer Aminosäure beladenen tRNAs, die sich an die mRNA gemäß dem übertragenen genetischen Code anbinden. Die schon synthetisierte Peptidkette wird an die neu ankommende tRNA bzw. deren Aminosäure geknüpft.



Ziele erreicht? – „Zellteilung und Proteinbiosynthese“

- 2.2.01** Was versteht man unter Zellteilung und unter Proteinbiosynthese?
- 2.2.02** Was versteht man unter Replikation und wie läuft sie ab?
- 2.2.03** Was sind die Unterschiede zwischen DNA und RNA und welche Arten von RNA sind Ihnen bekannt?
- 2.2.04** Beschreiben Sie den Vorgang der Transkription.
- 2.2.05** Wie wird eine Peptidkette bei der Proteinbiosynthese gebildet?

2.3 Molekularbiologische Analytik

Jedes Lebewesen hinterlässt mit der DNA aus jeder seiner Zellen einen spezifischen genetischen Fingerprint. Diesen Umstand macht sich z. B. die Gerichtsmedizin zunutze und findet den Täter durch Identifikation seiner DNA. In der Lebensmittelanalytik werden auf diese Weise Spuren von genetisch veränderten Pflanzenzellen gefunden. Ermöglicht wird dies im Labor durch die Anwendung von Enzymen zur gezielten Vermehrung der DNA in Kombination mit moderner Laborgerätetechnik.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Vorgangsweise im Labor zur gezielten **Vermehrung der DNA** erklären;
- die einzelnen **Labormethoden zur molekularbiologischen Analytik** beschreiben.

Polymerase-Kettenreaktion (PCR)

Die **PCR** kann als wichtigste Labormethode der **molekularbiologischen Analytik** bezeichnet werden. Dabei wird ein definierter **Ausschnitt des DNA-Stranges** weniger Zellen so weit vermehrt, dass er mit der sogenannten **Elektrophorese**, einer üblichen Arbeitsmethode in Laboratorien, festgestellt (detektiert) werden kann.

Bei der **PCR** werden folgende Analysenschritte vorgenommen:

- **Aufbereitung des Probenmaterials:** Extraktion der DNA. Dabei muss jede Form der Kontamination mit Fremd-DNA, z. B. aus dem Staub der Luft, vermieden werden. Die Tätigkeit muss daher in Reinraumtechnik an **Sterilwerkörpern** vorgenommen werden.
- **Denaturierung: Auf trennung der DNA-Doppelhelix** durch Erhitzen auf ca. 90 °C in einem **Thermocycler**. Diesen Vorgang nennt man auch Schmelzen der DNA. Dabei werden die **Wasserstoffbrücken** zwischen den korrespondierenden Basenpaaren getrennt.
- **Setzen eines Primers** bei einer Temperatur von ca. 60 °C. Der **Primer** besteht aus einer Folge einiger Nukleotide, die an die geschmolzenen DNA-Stränge gebunden werden und den Anfang der weiteren Polymerisation von DNA kennzeichnen.
- **Elongationsphase:** Bei einer Temperatur von ca. 70 °C synthetisiert das Enzym **DNA-Polymerase**, beginnend beim Primer, einen komplementären DNA-Strang im gewählten DNA-Abschnitt. Die dafür erforderlichen Nukleotide werden als Reagenz zugesetzt. In einer Minute können bis zu 1 000 Nukleotide (Basenpaare) polymerisiert werden.
- Danach beginnt der **Zyklus** wieder bei der Auf trennung des DNA-Doppelstranges.
- **Elektrophorese:** Nach ca. 50 Vermehrungsschritten liegen die DNA-Abschnitte in einer ausreichenden Menge vor, um sie mit Elektrophorese in einem **Agarosegel** aufzutrennen und mit geeigneten Färbe- bzw. Fluoreszenzmethoden sichtbar zu machen.
- **Auswertung:** Durch Mitführen eines **Vergleichsmaterials** als Standard kann festgestellt werden, ob die Probe einen gleichen DNA-Ausschnitt aufweist. Damit ist es z. B. möglich, genetisch veränderte Maiskörner in einer Maislieferung zu detektieren oder bestimmte Viren in medizinischen Proben festzustellen.

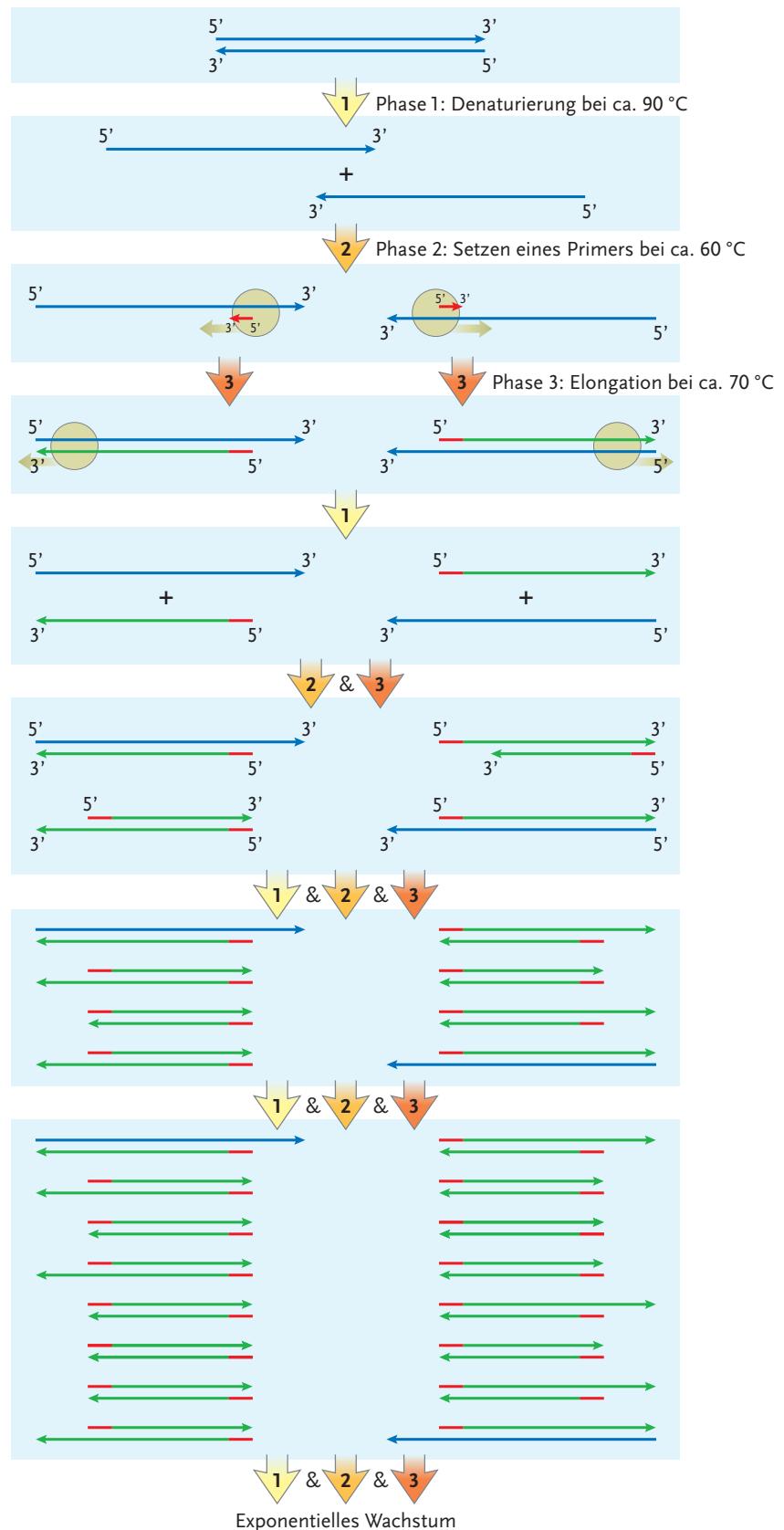
PCR ist die Abkürzung des englischen Fachausdrucks Polymerase-Chain-Reaction.

Sterile Werkbänke ermöglichen das Arbeiten in einem Umluftstrom mikrofein gefilterter Luft.

Der **Primer** besteht aus einem sogenannten **Oligonukleotid**.



Thermocycler sind Laborge-
räte, in denen ein Temperaturpro-
gramm wiederholt wird.

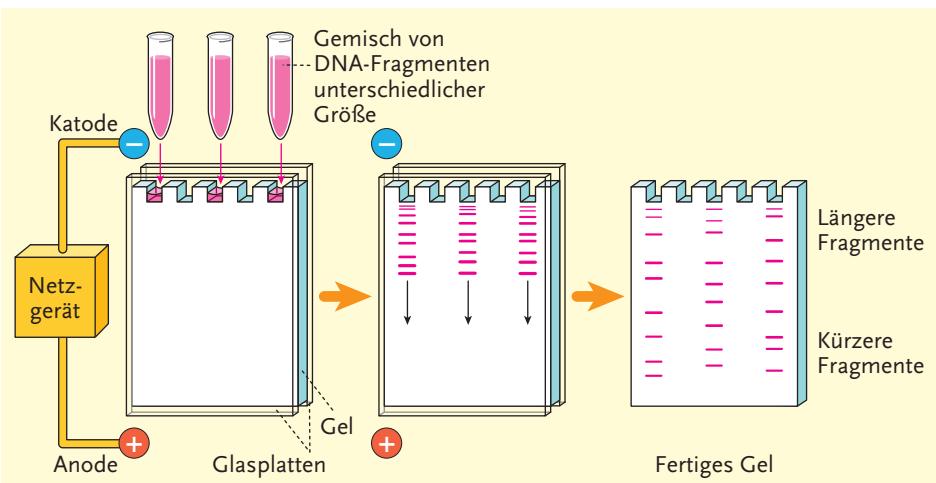


Die Elektrophorese ist ein
Trennverfahren, bei dem Sub-
stanzen nach ihrer Molekülgröße
und ihrem Ladungszustand durch
Anlegen elektrischer Spannung
aufgetrennt werden. Negativ ge-
ladene DNA-Abschnitte bewegen
sich zum Pluspol.



Agarosegel besteht aus
Galactose-Polysacchariden aus
Rotalgen.

Schematische Darstellung der einzelnen Phasen der PCR



Schematische Darstellung der Arbeitsschritte bei der Agarose-Gelelektrophorese



Ziele erreicht? – „Molekularbiologische Analytik“

- 2.3.01** Was versteht man unter der Abkürzung PCR?
- 2.3.02** Wie läuft die PCR in den einzelnen Phasen ab?
- 2.3.03** Was geschieht in einem Thermocycler?
- 2.3.04** Beschreiben Sie den Unterschied zwischen der Replikation in der lebenden Zelle und dem Vorgang in der PCR!
- 2.3.05** Wie erfolgt die Auswertung nach der Gelelektrophorese der DNA-Abschnitte?

2.4 Methoden der Gentechnik und DNA-Rekombinations-technik

Der Wunsch, lebende Organismen nach dem Idealbild des Menschen zu gestalten, ist wahrscheinlich so alt wie die Menschheit selbst. Ein klassisches Beispiel ist die Zucht von Saatgut. Dabei wurden verschiedene Arten von Pflanzen gekreuzt und selektiert, sodass folgende Generationen bestimmte gewünschte Merkmale aufwiesen, die bei den Elterngenerationen in dieser Ausprägung noch nicht vorhanden waren. Erst mit den Methoden der modernen Gentechnik gelang es, das Genom von Bakterien, Pflanzen und Tieren direkt zu beeinflussen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den **Einsatz bestimmter Enzyme** als Werkzeuge der Gentechnik erklären;
- die einzelnen **Methoden zur Einschleusung von Gensequenzen in Zellen** und ihren **Einbau in Genome** beschreiben;
- Fachausdrücke wie **Restriktion, Rekombination** und **Klonen** definieren.



Replikation siehe Kap. B, 2.2,
PCR siehe Kap. B, 2.3.



Ligasen sind eine Klasse der Enzyme siehe Kap. B, 3.1.



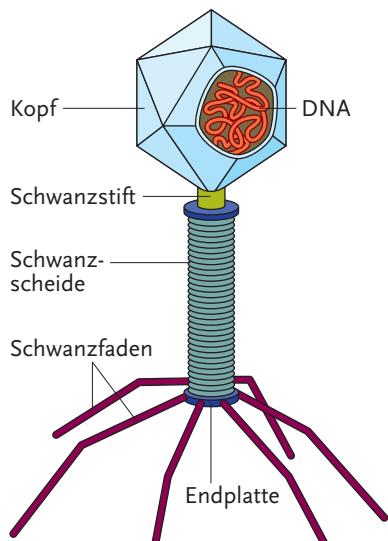
Oligonukleotide werden z. B. als **Primer** in der PCR verwendet – siehe Kap. B, 2.3.



Ein typisches Beispiel für ein zusätzliches Merkmal zum genetischen Code ist die **Antibiotikaresistenz** von Bakterien.



Nucleoid siehe Kap. B, 4 (prokaryotische Bakterienzelle).



Darstellung eines **Bakteriophagen**

Unter **Liposomen** versteht man Aggregate aus **Lipiden**, meist Phospholipiden (siehe Kap. B, 1.2).

Enzyme als Werkzeuge der Gentechnik

DNA-Polymerasen wurden sowohl bei der Zellteilung und Replikation der DNA als auch bei der Polymerase-Kettenreaktion als Labormethode beschrieben. In der Gentechnik spielen weitere Enzyme wichtige Rollen:

- **Restriktionsenzyme** schneiden aus der DNA einzelne definierte Abschnitte heraus, die sie an bestimmten Codes der Basenpaare erkennen.
- **DNA-Ligasen** verbinden DNA-Abschnitte miteinander zu rekombinanter DNA.
- **Rekombinationsenzyme** schneiden DNA-Sequenzen aus zwei DNA-Strängen und bauen sie kreuzweise, also einen Abschnitt aus Strang A in den Strang B, ein.

Außerdem ist es möglich, aus Nukleotiden kürzere DNA- oder RNA-Abschnitte (Oligonukleotide) **chemisch** zu synthetisieren.

Transport von DNA-Sequenzen in Zellen

Nachdem nunmehr **rekombinante DNA-Sequenzen** vorliegen, die in weiterer Folge gewünschte Merkmale des Individuums ausprägen sollen, müssen diese Abschnitte in Zellen bzw. in den Zellkern **transportiert** werden. Dieser Vorgang wird **Transfektion** genannt. Dafür verwendet die Gentechnik sogenannte **Genfären**, auch **Vektoren** genannt. Die wichtigsten Genfären sind:

- **Plasmide:** Darunter versteht man meist **ringförmige DNA-Stränge**, die sich in den Zellen, meist Bakterienzellen, **außerhalb** des **Nucleoids** befinden. Plasmide übertragen somit **zusätzliche Merkmale** zum genetischen Code.
- **Bakteriophagen:** **Viren** sind strukturierte Aggregate aus **DNA oder RNA und Proteinen**. Sie sind **keine Lebewesen**, da sie sich weder eigenständig vermehren können, noch einen eigenen Stoffwechsel aufweisen. Zur DNA-Replikation benötigen sie eine **Wirtszelle**, die sie befallen und darin ihre DNA vermehren. Nach Zerstörung der Wirtszelle verbreiten sie sich. Viren, die **Bakterien** befallen, nennt man **Bakteriophagen**.
- **Bakterielle Chromosomen:** Bestimmte **Abschnitte von DNA**, die aus Bakterien gewonnen werden, eignen sich ebenfalls als Genfären.

Die **Durchlässigkeit der Zellmembran** ist Voraussetzung für die **Transfektion**.

Auf folgende Weise kann sie erreicht werden:

- **Physikalische Methoden:** Mikroinjektion, Anlegen von magnetischen oder elektrischen Feldern (Elektroporation).
- **Chemische Methoden:** Bindung der DNA an Calciumphosphatteilchen oder an **Liposomen**, die in die Zelle aufgenommen werden.

Klone und Klonieren

Klone sind genetisch identische Organismen. Sie entstehen durch den Vorgang des **Klonens**. Unter **Klonieren** versteht man das Herstellen von **identischen DNA-Kopien** durch Replikation einer definierten DNA-Sequenz.

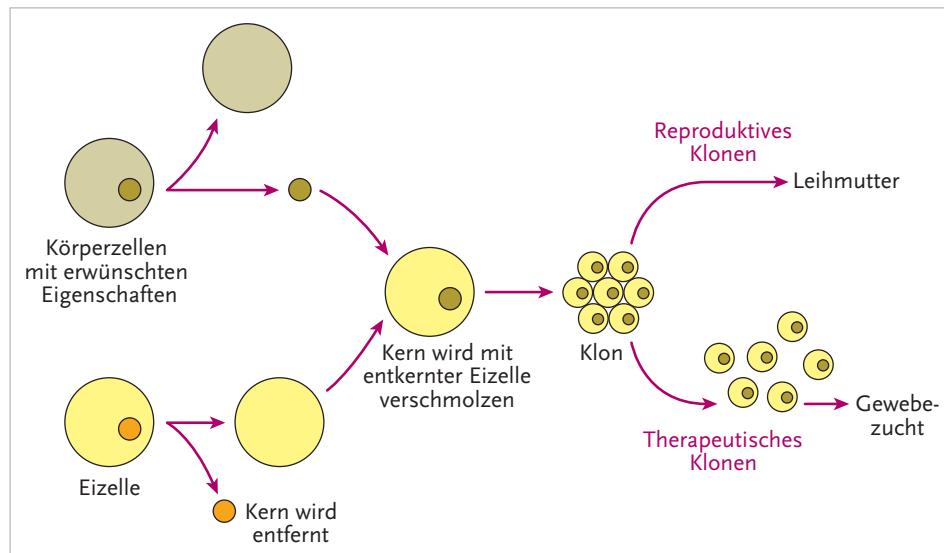
Eineiige Zwillinge entstehen durch natürliches Klonen, indem sich in einem frühen embryonalen Stadium zwei Embryonen mit identischem genetischem Code bilden.

In der sogenannten **Reproduktionsmedizin** werden Klone im **Labor** hergestellt, indem einer entkernten Eizelle ein Zellkern des zu klonenden Organismus meist mit Mikroinjektion eingesetzt wird. Der daraus durch **Replikation und Zellteilung** entstandene Embryo wird einer **Leihmutter** zur weiteren Entwicklung bis zur Geburt eingesetzt.

Eine weitere Anwendung des **Klonens im Labor** erfolgt beim sogenannten **therapeutischen Klonen**, dem Züchten von **Gewebekulturen**, z. B. Säugetierzellen zur Herstellung medizinischer Präparate, wie Impfstoffe. Bei diesem Verfahren folgt der Vermehrung durch Replikation und Zellteilung ein Verteilen der Zellen in einer Nährösung in einem **Fermenter**.



Fermenter siehe Kap. B, 5.1.



Schematische Darstellung des Klonens in der Reproduktionsmedizin und in der Zellkulturzüchtung



Ziele erreicht? – „Gentechnik und DNA-Rekombinations...“

- 2.4.01 Was versteht man unter den Werkzeugen der Gentechnik und welches Ziel wird mit ihnen verfolgt?
- 2.4.02 Was versteht man unter Vektoren?
- 2.4.03 Beschreiben Sie den Vorgang der Transfektion.
- 2.4.04 Was ist der Unterschied zwischen Klonen und Klonieren?
- 2.4.05 Beschreiben Sie den Unterschied zwischen reproduktivem und therapeutischem Klonen.

3 Stoffwechselprozesse

3.1 Metabolismus und Enzyme

Die Zellen der Organismen sind biotechnologische Fabriken im Mikromafstab. Jede Zelle, sei sie noch so klein, enthält in wenigen Kubikmikrometern Volumen mehrere hundert chemische Verbindungen, die von mehr als 1 000 verschiedenen Enzymen in Stoffwechselprozessen umgesetzt werden.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Unterschiede zwischen **Katabolismus** und **Anabolismus** sowie **chemotrophen** und **fototrophen Organismen** erklären;
- die **Enzyme** nach ihrer Substratspezifität und Wirkungsweise **klassifizieren**;
- das **Zusammenwirken von Enzymen** und einigen wichtigen **Coenzymen** beschreiben;
- den **Stofftransport** in die und aus den Zellen darstellen.

Katabolismus und Anabolismus

Der Stoffwechsel, **Metabolismus** genannt, kann in **zwei Richtungen** erfolgen:

- **Katabolismus:** Chemische Verbindungen werden mit dem Ziel der **Energiefreisetzung** abgebaut.
- **Anabolismus:** Chemische Verbindungen werden unter Aufwendung von Energie zu **körpereigenen Substanzen** (Gerüstsubstanzen oder Speicherstoffen) aufgebaut.

In diesem Zusammenhang werden **zwei Gruppen von Organismen** unterschieden:

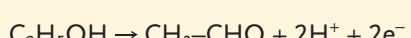
- **Fototrophe Organismen** (grüne Pflanzen und Einzeller): bauen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser mithilfe von **Lichtenergie (Sonnenenergie)** Zellbestandteile und Speicherstoffe auf.
- **Chemotrophe Organismen** (alle anderen Organismen): benötigen **Nährstoffe** zur Energiefreisetzung und zum Aufbau von Zellbestandteilen und Speicherstoffen.

Bei allen Stoffwechselprozessen handelt es sich um chemische Reaktionen, die bei **Umgebungsbedingungen** (Temperatur, pH-Wert, Stoffkonzentrationen) der **lebenden Zelle** ablaufen.

Daraus leiten sich einige **wesentliche Unterschiede zwischen biochemischen Reaktionen** zum **Schutz der Zelle** und organischchemischen Reaktionen ab:

- **Oxidationsvorgänge** erfolgen nicht durch Übertragung von Sauerstoff, sondern durch **Dehydrogenierung** (Abspaltung von aktiviertem Wasserstoff).

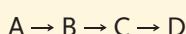
Beispiel: Dehydrogenierung (Oxidation) von Ethanol zu Ethanal (Acetaldehyd)



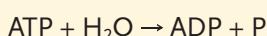
- Die **Kohlenstoffdioxibildung** erfolgt nicht durch Oxidation von Kohlenstoff, sondern durch **Decarboxylierung** (Abspaltung von Kohlenstoffdioxid).

Beispiel: Oxidative Decarboxylierung von Pyruvat zu Acetat

- Biochemische Reaktionen spielen sich über mehrere Stufen in einer Reaktionskette über Zwischenprodukte (Metaboliten) ab. Dabei stellt sich ein **Fließgleichgewicht** (englisch: steady state) gleichbleibender Konzentrationen der Metaboliten ein. Für die Gesamtreaktion ist damit nur die Gleichgewichtseinstellung zwischen dem Ausgangsstoff und dem Endprodukt entscheidend.

Beispiel: Reaktion des Ausgangsproduktes A über die Metaboliten B und C zum Endprodukt D:

- Energie wird in katabolischen Reaktionen zum Teil als Wärme frei, wesentlicher ist jedoch die Bildung energiereicher chemischer Verbindungen. Eine der bedeutendsten energiereichen Verbindungen im Stoffwechsel ist **Adenosintriphosphat (ATP)**.

Beispiel: Reaktion des Adenosintriphosphats (ATP) durch Hydrolyse zum Adenosindiphosphat (ADP) und Phosphat (P). Dabei werden **pro Mol ATP –30 kJ** Energie freigesetzt:

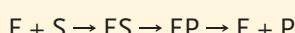
Enzyme

Für die meisten Reaktionen sind Enzyme erforderlich, die als Biokatalysatoren fungieren.

Enzyme wirken auf folgende Weise:

- Verringerung** der **Aktivierungsenergie** einer chemischen Reaktion, wodurch die Reaktion zum Laufen kommt.
- Erhöhung** der **Reaktionsgeschwindigkeit**.
- Enzyme verändern jedoch **nicht das Gleichgewicht** einer chemischen Reaktion!

Enzyme katalysieren die Reaktion, indem sie mit dem Ausgangsstoff, dem **Substrat**, einen **Komplex** bilden. Nach erfolgter Reaktion des Substrates zum Produkt wird der Komplex gelöst und das Produkt freigesetzt (dissoziiert). Das Enzym steht zur nächsten Katalyse bereit.

Beispiel: Reaktion des Substrates S über die Enzymkomplexe ES und EP zum Endprodukt P:

Unter **Reaktionsbedingungen der Zelle** (Temperatur, pH-Wert, Stoffkonzentrationen) benötigt ein Enzym für einen derartigen **Reaktionszyklus** wenige Millisekunden, sodass **bis zu 1 000 Moleküle je Sekunde** katalytisch umgesetzt werden können.



Pyruvat ist das Anion der 2-Oxopropansäure (Brenztraubensäure). 2-Oxosäuren wurden früher als **Alphaketosäuren** bezeichnet.



Gemäß den **thermodynamischen Gesetzmäßigkeiten** chemischer Reaktionen wird bei der Reaktion A → D ein stabilerer (energiärmerer) Zustand erreicht und Energie freigesetzt.



Verbindungen des **Adenins mit Ribose und Phosphaten** siehe Kap. B, 2.1.



Die chemische Energie von ATP liegt in der energiereichen **Anhydridbindung** zwischen den Phosphatgruppen.



Bei chemischen Reaktionen frei werdende Energie erhält ein **negatives Vorzeichen**.



Enzyme sind **Proteine** oder zusammengesetzte Proteine mit einer prosthetischen Gruppe, siehe Kap. B, 1.1.



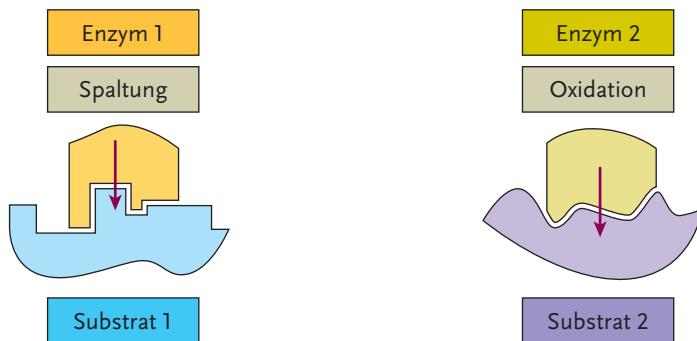
Enzyme katalysieren Reaktionen grundsätzlich in **beide Richtungen**. Das **Gleichgewicht** zwischen der Konzentration der Ausgangs- und Endprodukte wird dabei nicht beeinflusst.



Die **Komplexbildung zwischen Enzym und Substrat** erfolgt über **Nebenvalenzbindungen** (Ionenbindungen, Wasserstoffbrücken, hydrophobe Wechselwirkungen). Dabei verändert das Enzym so lange seine Form (räumliche Struktur des Proteins), bis es das Produkt wieder freigegeben hat.

Enzyme weisen **zwei wesentliche Eigenschaften** auf:

- **Substratspezifität:** Ein Enzym bindet spezifisch nur einen bestimmten Stoff.
- **Wirkungs- oder Reaktionsspezifität:** Ein Enzym katalysiert spezifisch nur eine bestimmte Reaktion.



Die Abbildung zeigt schematisch die **Substratspezifität** von Enzym 1 bzw. 2 mit Substrat 1 bzw. 2 (Schlüssel-Schloss-Prinzip). Es wird jeweils nur eine Reaktion (Spaltung oder Oxidation) **wirkungs- oder reaktionsspezifisch** katalysiert.

Die **Bezeichnung** der Enzyme erfolgt nach:
Substrat-Reaktion-Endsilbe „ase“

Nach der **Wirkungs- oder Reaktionsspezifität** unterscheidet man **sechs Klassen** von Enzymen:

| Klasse | Reaktion | Beispiel |
|------------------------|---|--|
| Oxidoreduktasen | Oxidation (Dehydrogenierung) Reduktion (Hydrogenierung) | Glucoseoxidase Ethanoldehydrogenase Pyruvathydrogenase |
| Transferasen | Übertragung von funktionellen Gruppen | Glutamat-Oxalacetat-Transaminase |
| Hydrolasen | Hydrolytische Spaltung von: Esteren Glycosidischen Bindungen Peptidbindungen | Lipase (Esterase) Amylase (Glycosidase) Protease (Peptidase) |
| Lyasen | Nicht hydrolytische Spaltung | Fructose-1,6-diphosphat-Aldolase |
| Isomerasen | Isomerisierung | Triosephosphat-Isomerase |
| Ligasen | Bindung von zwei Molekülen | DNA-Polymerase |

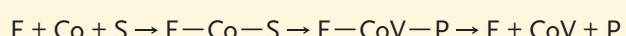
Die **Glutamat-Oxalacetat-Transaminase** hat in der medizinischen Labordiagnostik Bedeutung. Erhöhte Werte deuten z. B. auf eine Erkrankung der Leber hin.

 **Fructose-1,6-diphosphat** und Triosephosphat siehe Kap. B, 3.2.

Coenzyme

Coenzyme, auch **Kofaktoren** genannt, sind organische Nichtproteinmoleküle, die in gleicher Weise wie das Substratmolekül einen **Komplex mit dem Enzym** eingehen und erst dadurch die katalysierte Reaktion ermöglichen. Das Coenzym geht wie das Produkt **verändert aus der Reaktion** heraus.

Beispiel: Komplexbildung des Enzyms E mit dem Coenzym Co und dem Substrat S, Reaktion im Enzymkomplex zum veränderten CoV und zum Endprodukt P, danach Dissoziation:



Beispiele für wichtige Coenzyme im Stoffwechsel:

| Coenzym | Reaktion | Beispiel |
|--|--|--|
| Nicotinamid-adenin-dinukleotid NAD ⁺ | Oxidation (Dehydrogenierung) und Reduktion (Hydrogenierung), Übertragung von $2 \text{ H}^+ + 2 \text{ e}^-$ | Coenzym der Ethanol-dehydrogenase, Pyruvathydrogenase |
| Flavin-adenin-dinukleotid FAD | Oxidation (Dehydrogenierung) und Reduktion (Hydrogenierung), Übertragung von $2 \text{ H}^+ + 2 \text{ e}^-$ | Coenzym der Succinat-Dehydrogenase |
| Adenosin-triphosphat ATP | Übertragung von Phosphatgruppen; energiereiche Verbindung | Coenzym der Glucose-6-Phosphorylase (Hexokinase) |
| Coenzym A CoA | Übertragung von Säuregruppen; energiereiche Verbindung | Coenzym der Pyruvat-Decarboxylase und der Citratsynthase |



$2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ wird als „aktivierter Wasserstoff“ bezeichnet.



Succinat-Dehydrogenierung
siehe Kap. B, 3.2.



Glucose-6-Phosphorylase
siehe Kap. B, 3.2.



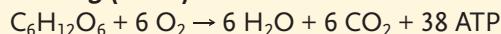
Pyruvat-Decarboxylierung
und Citratsynthese siehe
Kap. B, 3.2.

Biokybernetik

Biokybernetik ist die Wissenschaft von der **Steuerung biologischer Abläufe**. Wesentlich sind dabei Feedbackmechanismen, die Stoffwechselwege **aktivieren oder hemmen**.

Ein in der Biotechnologie wichtiges Beispiel ist der sogenannte **Pasteureffekt**. Hefe ist befähigt, Zucker in Gegenwart von Sauerstoff **aerob** zu metabolisieren, zu verarbeiten. Bei Abwesenheit von Sauerstoff kann sie Zucker **anaerob** vergären.

Atmung (aerob):



Gärung (anaerob):



Der **Steuerungseffekt** erfolgt dabei über **ATP**, das im aeroben Stoffwechselweg gegenüber dem anaeroben in 19-facher Menge entsteht:

- **Aerob** tritt ein **ATP-Überschuss** gegenüber dem Verbrauch ein. ATP wirkt als **Inhibitor** auf das Enzym Phosphofructokinase, das für den Abbau des Zuckers wesentlich ist, wodurch der Zuckerstoffwechsel verlangsamt wird.
- **Anaerob** tritt ein **ADP-Überschuss** ein, da mehr ATP zu ADP umgesetzt wird, als zur Verfügung gestellt werden kann. ADP wirkt als **Aktivator** auf das Enzym Phosphofructokinase, wodurch mehr Zucker metabolisiert wird.

Auf molekularer Ebene erfolgt die Aktivierung oder Hemmung durch den sogenannten **allosterischen Effekt**. Dabei wird durch Anlagerung des Aktivators oder des Inhibitoren an das Enzym dessen **räumliche Struktur** so verändert, dass es bei **angelagertem Aktivator das Substrat binden** kann, nicht jedoch bei gebundenem Inhibitor. Aktivator bzw. Inhibitor und Substrat werden an **unterschiedlichen Stellen** des Enzymmoleküls gebunden.



Louis Pasteur siehe Kap. B, 4.



Phosphofructokinase
(Fructose-1,6-phosphorylase)
siehe Kap. B, 3.2.

Biologische Membranen

Membranen trennen Zellen von ihrer Umgebung ab. Innerhalb einer eukaryotischen Zelle umschließen sie Organellen. Für den Stoffwechsel ist daher ein **Transport** von Wasser, Gasen, Nährstoffen und Metaboliten durch die Membran hindurch erforderlich.

 Lipoide siehe Kap. B, 1.2.

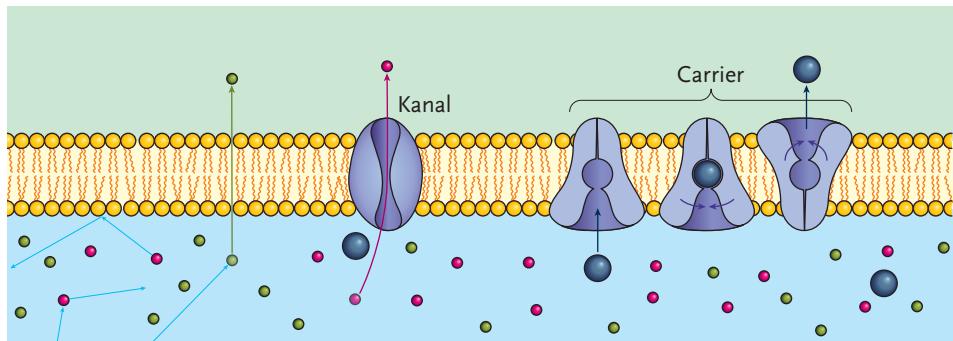


Manche Zellen, sowohl Körperzellen wie auch Bakterienzellen, sind mit einer **Schleimhülle** umgeben, die aus **Polysacchariden** besteht.

Biologische Membranen bestehen aus einer **Doppelschicht aus Lipoiden**, wie Phospholipiden. Ihre hydrophoben Molekülbereiche sind zur **Innenseite** der Membran orientiert und halten die beiden Schichten durch **hydrophobe Wechselwirkungen** zusammen. Die hydrophilen Molekülbereiche sind zu den beiden Außenseiten der Membran gerichtet.

Durch die Lipiddoppelschicht entsteht zunächst für **polare Moleküle**, auch für Wasser und die meisten ionisierten (geladenen) Moleküle der Metaboliten, eine **Sperrsicht**.

In die Lipiddoppelschicht sind Proteine eingebettet: **Kanal-** oder **Tunnelproteine** und **Trägerproteine** (Carrier).



Mechanismen des **Transports durch biologische Membranen** von links nach rechts:
Diffusion (passiver Transport), Tunnel- oder Kanalprotein, Trägerprotein oder Carrier (aktiver Transport).

Der Aufbau der biologischen Membran ermöglicht folgende **Transportmechanismen**:

- **Passiver Transport:** Kleine Moleküle, vor allem apolare Moleküle, z. B. die Gase Sauerstoff und Kohlendioxid, können aufgrund eines **Konzentrationsgradienten** diffundieren. Dabei wird keine Energie verbraucht.
- **Aktiver Transport:** Dabei wird **Energie in Form von ATP** verbraucht. ATP ist erforderlich, um die **Strukturen** von folgenden Proteinen zu verändern:
 - **Tunnel- oder Kanalproteine** bilden im geöffneten Zustand Poren, durch die kleinere polare Moleküle, vor allem Wasser, diffundieren können.
 - **Trägerproteine** oder **Carrier** bilden mit Substraten oder Metaboliten einen **Komplex**, ähnlich dem der Enzyme. Auf diese Weise wird z. B. der Nährstoff Glucose an der Außenseite einer Zelle gebunden, als Komplex mit dem Carrier durch die Membran geschleust und im Inneren der Zelle **dissoziiert** (abgegeben).



Ziele erreicht? – „Metabolismus und Enzyme“

- 3.1.01 Erklären Sie den Unterschied zwischen Katabolismus und Anabolismus sowie zwischen fototrophen und chemotrophen Organismen!
- 3.1.02 Auf welche Weise entsteht Kohlendioxid aus biochemischen Reaktionen? Wie erfolgt in biochemischen Reaktionen eine Oxidation?
- 3.1.03 Beschreiben Sie das Prinzip des Fließgleichgewichtes.
- 3.1.04 Wie wird Energie im Stoffwechsel gebildet?
- 3.1.05 Was versteht man unter Enzymen und wie wirken sie?
- 3.1.06 Was versteht man unter Substrat- und Wirkungsspezifität von Enzymen?

- 3.1.07** Ordnen Sie folgende Enzyme in die Klassifikation der Enzyme ein: DNA-Polymerase, Lipase und Glucoseoxidase.
- 3.1.08** Erklären Sie die Funktion der Coenzyme NAD⁺, ATP und CoA.
- 3.1.09** Auf welche Weise wird im aeroben und anaeroben Hefestoffwechsel der Zuckerverbrauch gesteuert?
- 3.1.10** Wie werden Gase, Wasser und Glucose durch biologische Membranen transportiert?

3.2 Ausgewählte Stoffwechselwege

Nach der Aufnahme der Nahrung werden die großen Moleküle der Hauptnährstoffe Eiweiß, Fett und Kohlenhydrate durch die Verdauung zu kleinen Molekülen abgebaut, die wir über die Darmschleimhaut aufnehmen. Den größten Teil davon benötigen wir in unseren Zellen als Ausgangsstoff für die Energieproduktion. Nur dadurch ist es möglich, unsere Körperwärme, die Atmung, den Herzschlag und alle sonstigen Körperfunktionen aufrechtzuerhalten. Einen kleineren Teil der aufgenommenen Nährstoffe verbrauchen wir für den Aufbau von Körpersubstanz, dies ganz besonders in den Lebensabschnitten Kindheit und Jugend, aber auch während der Schwangerschaft. Nehmen wir allerdings darüber hinaus zu viel an Nährstoffen auf, setzen wir den Reservestoff Fett an. Nimmt die dadurch bedingte Gewichtszunahme ein großes Ausmaß an, sprechen wir von starkem Übergewicht, das ein hohes gesundheitliches Risiko darstellt.



Eine besonders starke Form des Übergewichts wird **Adipositas** genannt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die wichtigsten Vorgänge beim **Abbau der Hauptnährstoffe** erklären;
- die **Abbauwege der Kohlenhydrate**, der **Fette** und der **Proteine** skizzieren;
- die **Produktion von Kohlendioxid** und energiereichem **Adenosintriphosphat (ATP)** im **Citratzyklus** und in der **Elektronentransportkette** (Atmungskette) darstellen;
- die **Fotosynthese** und die **Bildung von Kohlenhydraten** in grünen Pflanzen erklären.

Verdauung

Die komplex zusammengesetzten **Hauptnährstoffe** werden in unserer Verdauung zu leicht resorbierbaren kleinen Molekülen abgebaut.

| Nährstoff | Abbau zu | Enzyme |
|---|----------------------|---|
| Verdauliche Polysaccharide: Stärke | Glucose | Speichelamylase, Pankreasamylase |
| Fette: Triglyceride | Fettsäuren, Glycerin | Pankreaslipase, Lipasen der Darmschleimhaut |
| Proteine | Aminosäuren | Pepsin des Magens, Trypsin des Pankreas |

Über das **Blut** und die **Lymphe** werden die abgebauten Nährstoffbestandteile zu den **Zellen** durch die **Zellmembran** und in die **Organellen** transportiert.



Im **Pankreas**, der **Bauchspeicheldrüse**, werden nicht nur alle wichtigen **Verdauungsenzyme** gebildet, sondern auch das Hormon **Insulin**, das den **Blutzuckerspiegel** regelt.

Voraussetzung für die **Wirkung der Lipasen** ist die Emulsion des aufgenommenen Fettes durch die **Gallensäuresalze**.

Die **Lymphe** ist eine klare Körperflüssigkeit. Sie spielt in unserem **Immunsystem** eine wichtige Rolle, transportiert aber auch die abgebauten **Fettbestandteile** in das venöse Blut.



Über den **Citratzyklus** stehen die Stoffwechselwege der Glucose, der Fettsäuren und der Aminosäuren in einem **Zusammenhang**. Dadurch wird es verständlich, dass z. B. eine große Menge an aufgenommenem Zucker zum Speicherstoff Fett umgebaut wird.



Glucose-6-Phosphorylase (Hexokinase) und **Phosphofructokinase** siehe Kap. B, 3.1.

Für **Fructose-1,6-diphosphat** findet sich auch die Bezeichnung **Fructose-1,6-biphosphat**.

Abkürzungen

Glu-6-P = Glucose-6-phosphat
 Fru-6-P = Fructose-6-phosphat
 Fru-1,6-bP = Fructose-1,6-bisphosphat
 DHAP = Dihydroxyacetophosphat
 GAP = Glycerinaldehyd-3-phosphat
 1,3-bPG = 1,3-Bisphosphoglycerat
 3-PG = 3-Phosphoglycerat
 2-PG = 2-Phosphoglycerat
 PEP = Phosphoenolpyruvat
 Pyr = Pyruvat



Alle **Stoffwechselreaktionen** werden von Enzymen katalysiert. Die **Bezeichnung** der Enzyme siehe Kap. B, 3.1.



Aldolase und **Triosephosphate-Isomerase** siehe Kap. B, 3.1.

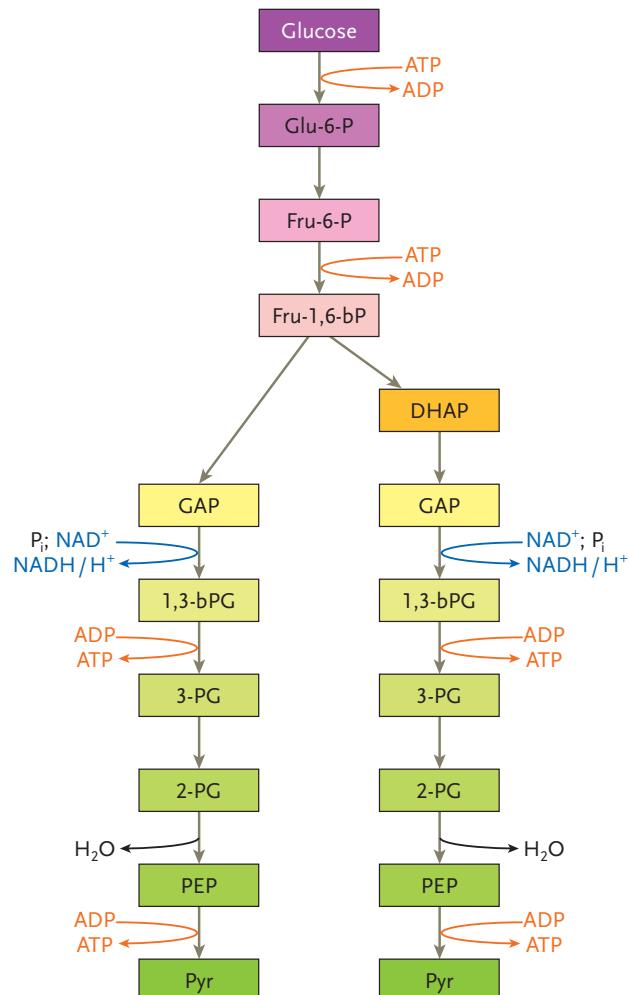
Die abgebauten Nährstoffbestandteile werden im **Stoffwechsel** umgesetzt:

- **Glucose (und Glycerin)**: überwiegend zu **Energie**, ein kleiner Teil zum Speicherstoff **Glycogen**.
- **Fettsäuren**: überwiegend zu **Energie**, ein kleiner Teil (gemeinsam mit Glycerin) zum Speicherstoff **Triglyceride**.
- **Aminosäuren**: überwiegend zum Aufbau **körpereigenen Proteins** in der Proteinbiosynthese, ein kleiner Teil zur **Energieproduktion**.

Abbau von Glucose

Der Abbau von Glucose, **Glycolyse** genannt, erfordert zunächst den Aufwand von Energie in Form von ATP, um das sonst reaktionsträge Glucosemolekül zu **aktivieren**. Dies erfolgt durch das Enzym **Glucose-6-Phosphorylase**, auch Hexokinase genannt, und das Coenzym ATP.

Glucose-6-phosphat wird weiter zu **Fructose-6-phosphat** umgewandelt. Danach erfolgt unter Abspaltung eines Phosphats von ATP katalysiert von der **Phosphokinase** eine weitere Phosphorylierung zu **Fructose-1,6-diphosphat**. Nach diesem Metaboliten wird der Stoffwechselweg der Glycolyse auch als **Fructose-Diphosphatweg (FDP-Weg)** bezeichnet.



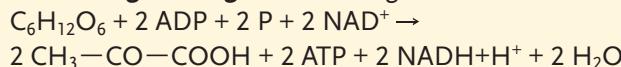
Schematische Darstellung des FDP-Weges (der Glycolyse)

Das Enzym **Aldolase** spaltet Fructose-1,6-diphosphat in zwei Triosemoleküle, **Glycerinaldehyd-3-phosphat** und **Dihydroxyacetophosphat**, das von der **Triosephosphate-Isomerase** wieder zu Glycerinaldehyd-3-phosphat isomerisiert wird. Somit verläuft der weitere FDP-Weg **parallel** über zwei Triosemoleküle.

Glycerinaldehyd-3-phosphat reagiert mit dem Coenzym **NAD⁺** unter gleichzeitiger Bindung eines Moleküls **anorganischen Phosphats** an die Carboxylgruppe zu **1,3-Diphosphoglycerat** (1,3-Biphosphoglycerat) und NADH+H⁺. Im nächsten Schritt wird das soeben gebundene Phosphat auf ADP unter Bildung von **ATP** und **3-Phosphoglycerat** übertragen.

3-Phosphoglycerat wird zu **2-Phosphoglycerat** umgewandelt, das unter Bildung einer C=C-Doppelbindung und Wasserabspaltung zu **Phosphoenolpyruvat** reagiert. Die energiereiche Verbindung Phosphoenolpyruvat überträgt eine Phosphatgruppe auf ADP und bildet letztendlich **ATP** und **Pyruvat**.

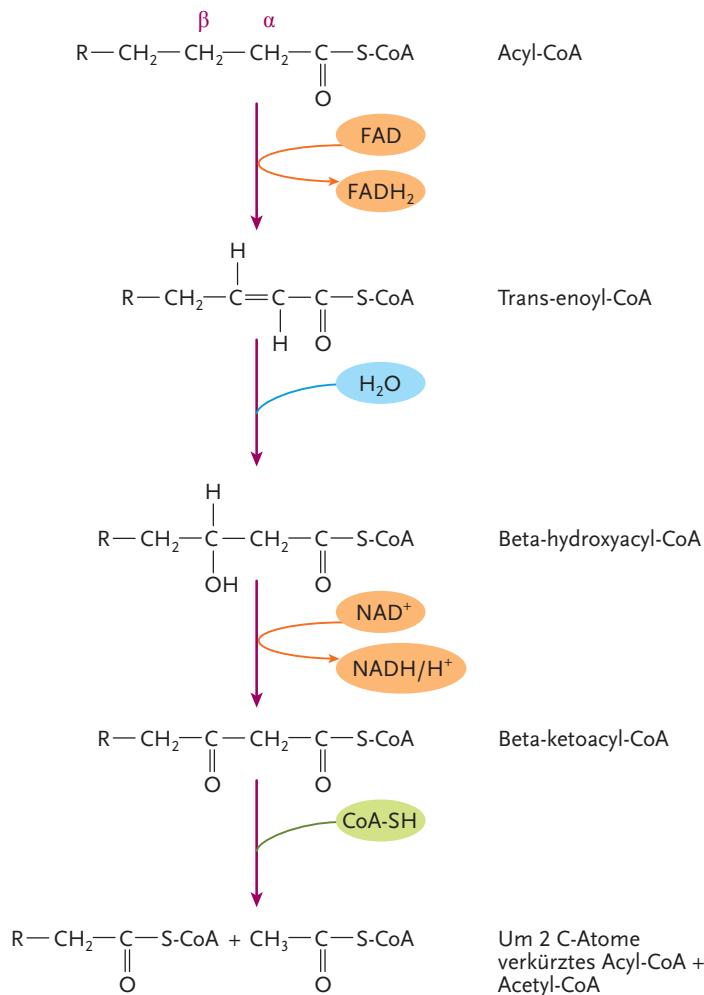
Die **Bilanzgleichung** des FDP-Wegs lautet somit:



Ein Mol **Glucose** wird im FDP-Weg zu **2 Mol Pyruvat** (Brenztraubensäure) unter Gewinn von **zwei Mol ATP** und **zwei Mol NADH+H⁺** abgebaut.

Abbau der Fettsäuren

Der Abbau von Fettsäuren, **Betaoxidation** genannt, erfordert zunächst den Aufwand von Energie in Form von ATP, um das sonst reaktionsträge Fettsäuremolekül zu **aktivieren**. Es entsteht zunächst ein Fettsäure-Adenosinmonophosphat (Acyl-AMP) unter Abspaltung eines Diphosphats. In einer weiteren Reaktion wird die Fettsäure unter Abspaltung von AMP auf das Coenzym A übertragen.



Schematische Darstellung der Betaoxidation

Da das Coenzym **NAD** im oxidierten Zustand eine positive Ladung am heterozyklischen Stickstoffatom trägt, lautet die korrekte Schreibweise **NAD⁺** und in der reduzierten Form **NADH+H⁺**.

Die Bildung von **ATP** aus anderen Reaktionsabläufen als dem der Elektronentransportkette (Atmungskette) wird **Substratphosphorylierung** genannt.

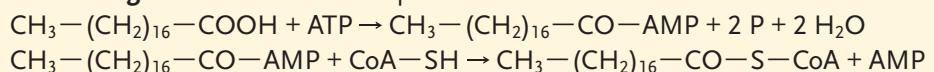


Das durch die lipolytische Fettspaltung entstandene **Glycerin** wird durch Phosphatübertragung vom Coenzym ATP zu Glycerinphosphat und nach Oxidation mit dem Coenzym NAD⁺ zu **Glycerinaldehyd-3-phosphat** umgewandelt und in den **FDP-Weg** eingeschleust.



Beim Abbau von ungesättigten Fettsäuren entfällt an den Doppelbindungen der erste Schritt der Betaoxidation. Es wird lediglich die Cis-Doppelbindung in die Trans-Form isomerisiert.

Aktivierung der Fettsäure am Beispiel der Stearinsäure:

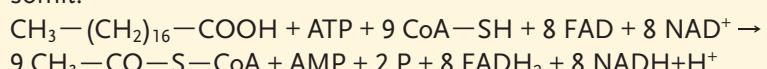


Beim resultierenden **Acyl-CoA** ist die Fettsäure über eine **energiereiche Thioesterbindung** an das Coenzym-A gebunden. Die **freie Enthalpie** dieser Bindung liegt mit rund **-30 kJ/Mol** im Bereich der freien Enthalpie des **ATP**.

Acyl-CoA wird mit dem Coenzym **Flavin-adenin-dinukleotid (FAD)** zu **Trans-Enoyl-CoA** unter Bildung von **FADH₂** oxidiert. An die C=C-Doppelbindung wird Wasser angelagert. Das entstehende **Beta-hydroxyacyl-CoA** (3-Hydroxyacyl-CoA) wird mit dem Coenzym **NAD⁺** zu **Beta-ketoacyl-CoA** (3-Ketoacyl-CoA) und **NADH+H⁺** oxidiert. Diese Reaktion gibt dem Stoffwechselweg des Fettsäureabbaus den Namen **Betaoxidation**.

In einer abschließenden Reaktion wird mit einem weiteren Coenzym A eine sogenannte **thioklastische Spaltung** durchgeführt. Dabei wird nach Übertragung eines CoA auf die nunmehr **um zwei C-Atome verkürzte** Fettsäure **Acetyl-CoA** (aktivierte Essigsäure) abgespalten. Mit dem verkürzten Acyl-CoA beginnt der **Zyklus** von Neuem. Das Acetyl-CoA wird in den **Citratzyklus** eingeschleust.

Die **Bilanzgleichung** der Betaoxidation einer C-18-Fettsäure (Stearinsäure) lautet somit:



Ein Mol einer **gesättigten C-18-Fettsäure** (Stearinsäure) wird in der **Betaoxidation** zu **neun Mol Acetyl-CoA** (aktivierter Essigsäure) unter Aufwand von einem Mol ATP und 9 Mol Coenzym-A sowie unter Gewinn von **acht Mol FADH₂** und **acht Mol NADH+H⁺** (in 8 Cyclen) abgebaut.

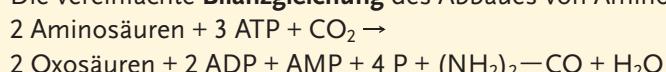
Abbau der Aminosäuren, Harnstoffzyklus

Der Abbau von Aminosäuren folgt dem Grundprinzip, dass aus den Reaktionen der Aminogruppe **keinesfalls giftiger Ammoniak** entsteht.

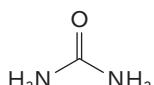
Der Abbauweg gliedert sich in vereinfachter Darstellung in folgende Abschnitte:

- Eine **Aminotransferase** (früher Transaminase) überträgt die Aminogruppe der abzubauenden Aminosäure auf eine 2-Oxosäure, auf **2-Oxoglutarat** bzw. **Oxalacetat**. Daraus entstehen als Metaboliten die 2-Oxosäure der abzubauenden Aminosäure sowie **Glutamat** und **Aspartat**.
- Die 2-Oxosäure der abzubauenden Aminosäure (das **Kohlenstoffskelett** der Aminosäure) wird zum weiteren Abbau je nach Verbindung in den **Citratzyklus** oder in den **FDP-Weg** eingeschleust.
- Über einige Zwischenschritte des sogenannten **Harnstoffzyklus** werden je zwei Aminogruppen aus Glutamat und Aspartat auf **Hydrogencarbonat** übertragen, wodurch der ungiftige und lösliche, somit leicht ausscheidbare **Harnstoff** entsteht. Pro Mol Harnstoff werden dabei **drei Mol ATP** verbraucht. Glutamat und Aspartat werden wieder in die entsprechenden 2-Oxosäuren überführt.

Die vereinfachte **Bilanzgleichung** des Abbaues von Aminosäuren lautet somit:



Hydrogencarbonat entsteht aus CO_2 , dem Produkt aus Decarboxylierungsreaktionen.



Strukturformel des Harnstoffs

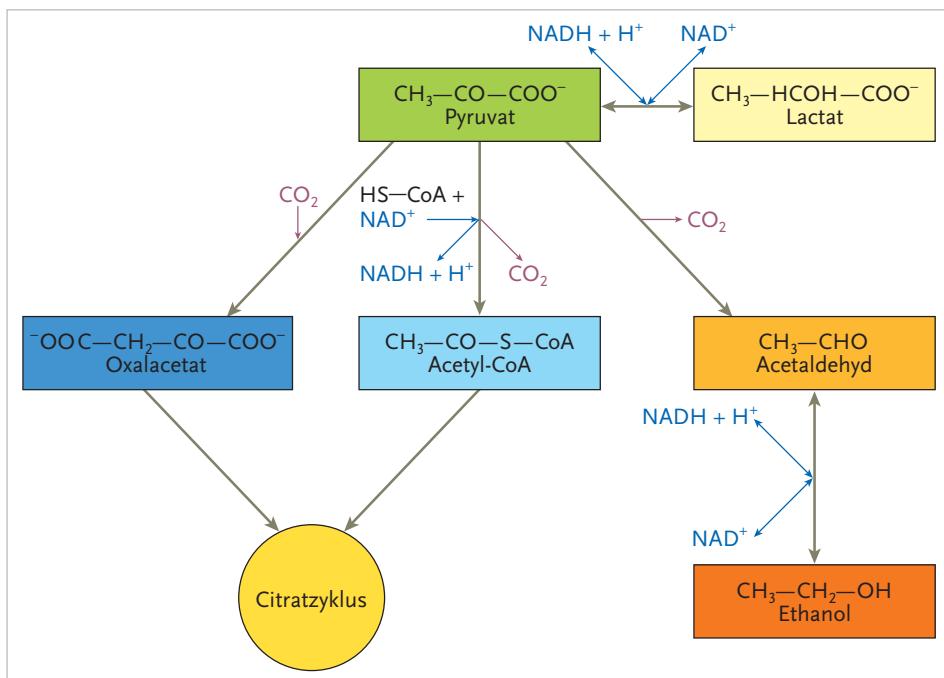
Citratzyklus

Der **Citratzyklus** ist ein Ausschnitt aus dem aeroben Metabolismus, dem Stoffwechsel bei Anwesenheit von Sauerstoff. Die **Verzweigung** zwischen **aerobem** und **anaerobem** Stoffwechsel erfolgt schon in einem Reaktionsschritt vor dem eigentlichen Citratzyklus, beim **Pyruvat**.

Pyruvat, das als **Endprodukt des FDP-Weges** anzusehen ist, reagiert wie folgt:

- Mit $\text{NADH}+\text{H}^+$ zu **Lactat** → anaerober Stoffwechselweg der homofermentativen Lactobacteriaceae (Milchsäuregärung).
- Unter Abspaltung von CO_2 (Decarboxylierung) zu **Ethanal** (Acetaldehyd) und weiter mit $\text{NADH}+\text{H}^+$ zu **Ethanol** → anaerober Stoffwechselweg der Hefe.
- Unter gleichzeitiger Abspaltung von CO_2 und Bildung von $\text{NADH}+\text{H}^+$ (oxidative Decarboxylierung) sowie Bindung an das Coenzym A zu **Acetyl-CoA** (aktivierter Essigsäure) → aerober Stoffwechselweg, Einschleusung in den Citratzyklus.
- Unter Bindung von CO_2 (Carboxylierung) zu **Oxalacetat**, das zur Auffüllung des Citratzyklus eingeschleust wird → **anapleurotische Reaktion**, besonders wichtig, wenn Metaboliten aus dem Citratzyklus entnommen werden und dieser sonst zum Stillstand käme (z. B. bei der Citronensäurefermentation).

Die vier Stoffwechselwege, ausgehend vom Pyruvat (Pyruvat-Kreuzung):



Im aeroben **Stoffwechsel** wird nach oxidativer Decarboxilierung des Pyruvats Acetyl-CoA in den Citratzyklus eingeschleust.

Acetyl-CoA reagiert mit **Oxalacetat** unter Abspaltung von Coenzym A zu **Citrat**. Über das Zwischenprodukt **Aconitat** entsteht **Isocitrat**. Die sekundäre Alkoholgruppe des Isocitrats kann nunmehr unter Bildung von $\text{NADH}+\text{H}^+$ zu **Oxalsuccinat** oxidiert werden. Oxalsuccinat ist eine instabile 3-Oxosäure und spaltet CO_2 ab, woraus **2-Oxoglutarat** entsteht.

Der **Citratzyklus** hat seinen Namen vom Citrat, dem ersten Metaboliten nach der Startreaktion, der Einschleusung von Acetyl-Coenzym A. Da die Citronensäure eine Tricarbonsäure mit drei Carboxylgruppen ist, wird er auch **Tricarbonsäurezyklus (TCC)** genannt. Ein weiterer Name ist Krebszyklus, benannt nach dem Entdecker des TCC, Hans Adolf Krebs.



HANS ADOLF KREBS,
1900 BIS 1981, DEUTSCHER,
SPÄTER BRITISCHER BIOCHEMIKER



Milchsäuregärung, alkoholische Gärung der Hefe und Citronensäurefermentation (Citratfermentation) siehe Kap. B, 5.2.



IUPAC-konforme Schreibweise „Citronensäure“; als Handelsware und Lebensmittelzusatzstoff auch „Zitronensäure“.



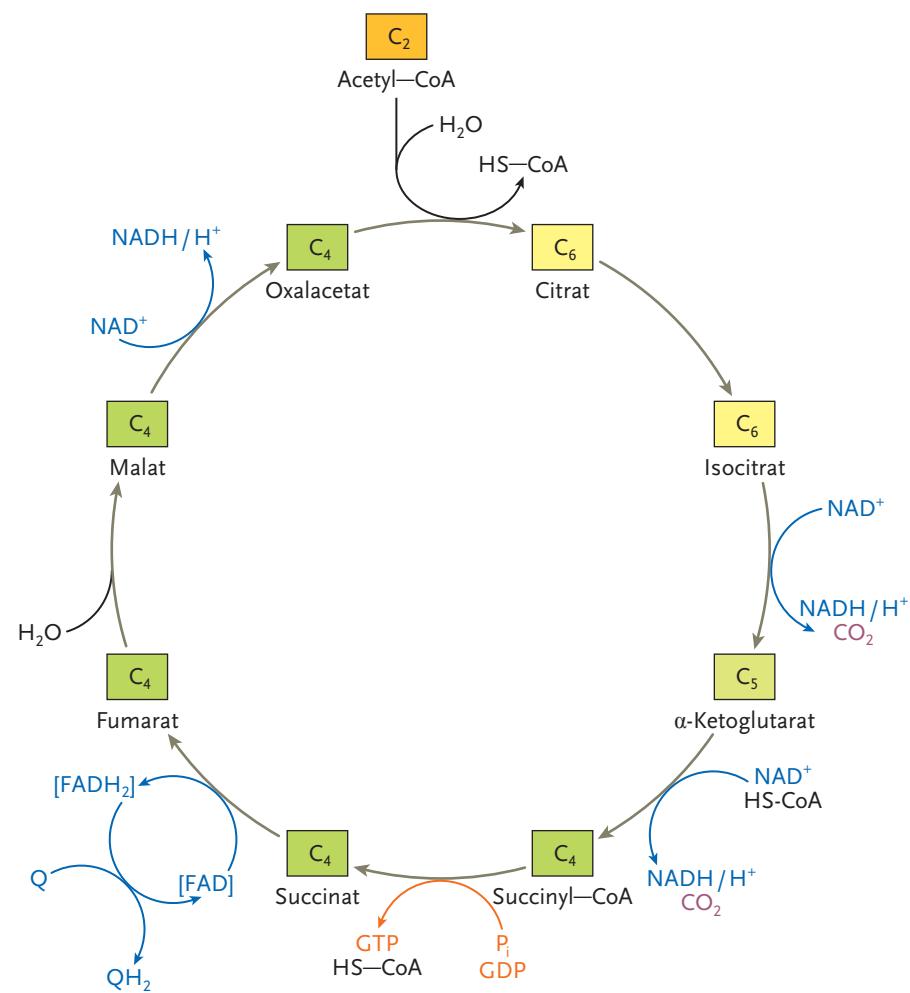
C_2 , C_4 , C_6 bezeichnet die Anzahl der C-Atome in den einzelnen Metaboliten.



α -Ketoglutarat ist die alte Bezeichnung für 2-Oxoglutarat.



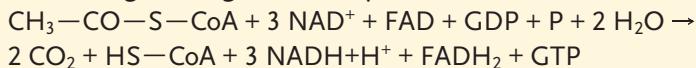
Reaktion des FADH_2 zu QH_2 siehe Elektronentransportkette in Kap. B, 3.2.



Schematische Abbildung des Citratzyklus

2-Oxoglutarat spaltet CO_2 unter Bildung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ (oxidative Decarboxylierung) ab, gleichzeitig wird Coenzym A gebunden. Es entsteht **Succinyl-CoA**. Diese energiereiche Verbindung gibt das Coenzym A unter Übertragung der frei werdenen Energie auf GTP (Guanosintriphosphat, gleicher Energiegehalt wie ATP) ab. Es entsteht **Succinat**, das in einem weiteren Schritt unter Bildung von FADH_2 zu **Fumarat** oxidiert wird. Unter Anlagerung von H_2O an die Doppelbindung reagiert Fumarat zu **Malat**. Letztendlich wird diese Hydroxsäure unter Bildung von $\text{NADH} + \text{H}^+$ zu **Oxalacetat** oxidiert, wodurch der Zyklus geschlossen ist.

Die **Bilanzgleichung** des Citratzyklus lautet:



Nach der Bilanzgleichung des TCC wird ein Mol Essigsäure zu **zwei Mol CO_2** unter Bildung von **drei Mol $\text{NADH} + \text{H}^+$** , einem Mol FADH_2 und **einem Mol GTP** abgebaut. Unter Berücksichtigung der Energieausbeute aus der Atmungskette entstehen insgesamt **zwölf ATP**.

Elektronentransportkette (Atmungskette)

Im Zuge des Abbaus der Glucose (FDP-Weg), der Fettsäuren (Betaoxidation) und des Citratzyklus entstehen bei den **Dehydrogenierungsreaktionen** $\text{NADH} + \text{H}^+$ und FADH_2 .

Der **aktivierte Wasserstoff** wird im aeroben Stoffwechsel in der **Elektronentransportkette**, auch **Atmungskette** genannt, auf Sauerstoff übertragen. Dieser Abschnitt des Stoffwechsels ist bei aeroben Lebewesen der bedeutendste zur **Energiegewinnung**. Gleichzeitig werden die Coenzyme zu NAD^+ und FAD regeneriert.

Die Elektronentransportkette ist die in Kaskaden geführte **zellschonende Form der Knallgasreaktion**, der Übertragung von Wasserstoff und Elektronen auf Sauerstoff unter Bildung von Wasser. Die dabei entstehende Energie wird in **ATP** gespeichert (**oxidative Phosphorylierung**).

Vergleich von Knallgasreaktion und Elektronentransportkette:

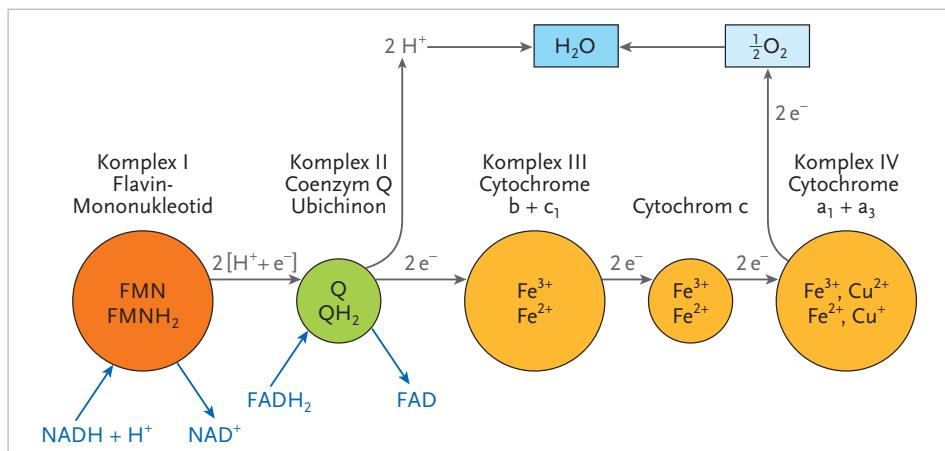
Knallgasreaktion: $\text{H}_2 + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{O}$; freie Enthalpie – 242 kJ/Mol

Atmungskette: $\text{NADH}+\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NAD}^+$; freie Enthalpie – 219 kJ/Mol

Aus einem Mol NADH+H⁺ entstehen drei ATP (ca. 90 kJ).

Die Reaktionen der Elektronentransportkette erfolgen in vier **Enzymkomplexen**:

- Zwei Mol $[\text{H}^+ + \text{e}^-]$ aus $\text{NADH}+\text{H}^+$ werden auf **Komplex I** mit dem Coenzym FMN (Flavin-Mononukleotid) übertragen.
- Zwei Mol $[\text{H}^+ + \text{e}^-]$ werden weiter auf **Komplex II, Coenzym Q**, übertragen.
- **FADH₂** wird direkt auf Coenzym Q übertragen. Da dadurch eine Reaktion weniger vorliegt, beträgt die Energieausbeute auch nur **zwei Mol ATP** je Mol **FADH₂**.
- Nunmehr teilt sich die Übertragungsreaktion: **H⁺** wird abgespalten, die **Elektronen (e⁻)** werden auf **Komplex III** (Cytochrome b + c₁) übertragen. Dabei ändert sich die Wertigkeit bzw. Oxidationsstufe des Eisenzentralatoms von Fe^{3+} auf Fe^{2+} .
- **Cytochrom c** überträgt die Elektronen von Komplex III auf Komplex IV.
- In **Komplex IV** mit den Cytochromen a₁ und a₃ ändern die Elektronen nicht nur die Oxidationsstufe des Hämeisens von Fe^{3+} auf Fe^{2+} , sondern auch enthaltenen Kupfers von Cu^{2+} auf Cu^+ .



Schematische Abbildung der Elektronentransportkette (Atmungskette)

Von Komplex IV werden die Elektronen direkt auf Sauerstoff übertragen, der vom Hämoglobin zu den Zellen transportiert wurde. Dabei entstehen aus molekularem Sauerstoff in einem kurzen Übergangsstadium **Oxoniumionen** (O^-), die spontan mit je zwei H^+ zu **Wasser** reagieren.

Da die Reaktionen der Elektronentransportkette von der Verfügbarkeit von Sauerstoff (aerober Stoffwechsel) abhängen, wird die daraus entstehende Energieübertragung von Phosphat auf ADP zu ATP **oxidative Phosphorylierung** genannt. Treiber dieser Reaktion ist die sogenannte **Protonenpumpe**. Die Komplexe I, III und IV pumpen durch die frei werdende Energie Protonen (H^+) aus den Mitochondrien. Die aufgrund des Konzentrationsgefälles **zurückfließenden Protonen** sind der Treiber für das **Enzym ATP-Synthase**, die Phosphat auf ADP zu ATP überträgt.



Aktivierter Wasserstoff und Coenzyme siehe Kap. B, 3.1.



Da der Energiestoffwechsel in den **Mitochondrien** stattfindet, werden diese Organellen auch **Kraftwerke der Zelle** bezeichnet – siehe Kap. B, 3.1 und Kap. B, 4.



Die Energieausbeute von drei Mol ATP je Mol $\text{NADH}+\text{H}^+$ entspricht ca. **40 %**. Die restlichen 60 % werden bei Warmblütern zur Aufrechterhaltung der **Körperwärme** verwendet.



Coenzym Q wird auch Ubichinon genannt, es ist ein Derivat der phenolischen Verbindung **Chinol**.



Phenole siehe Kap. A, 4.



Die verschiedenen Cytochrome enthalten wie der rote Blutfarbstoff **Hämoglobin** Eisen als Zentralatom. Während die Cytochrome Elektronen weiterleiten, transportiert Hämoglobin molekularen Sauerstoff.

Fotosynthese

Die Fotosynthese kann als die wichtigste Reaktion für das **Leben** auf unserem Planeten Erde bezeichnet werden. Ohne Fotosynthese gäbe es keinen lebenswichtigen **Sauerstoff** und auch keine Hauptnahrungsquelle **Kohlenhydrate**.

Der **Einzeller Euglena** (Augentierchen), ein Urtierchen, enthält ebenfalls Chlorophyll.

 **Cyanobakterien** und **Urtierchen** siehe Kap. B, 4.

Das **Coenzym NADP⁺** reagiert in gleicher Weise wie NAD⁺, enthält jedoch ein zusätzliches Phosphat.

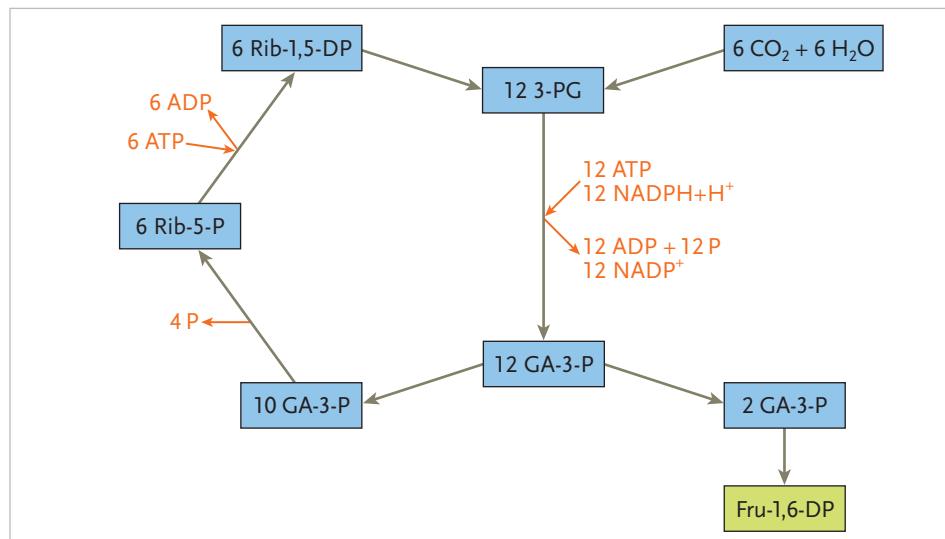
Fotosynthese können nur **grüne Pflanzen** und **Einzeller** (einzellige Algen, Cyanobakterien) mithilfe von Chlorophyll betreiben. Dabei wird zwischen der **Lichtreaktion** und der **Dunkelreaktion** unterschieden.

Lichtreaktion: Energiereiche Lichtquanten (Photonen) spalten im Enzymkomplex der Chloroplasten mithilfe des Chlorophylls Wasser zu $\frac{1}{2} O_2$ und $2 H^+ + 2 e^-$. Letztere werden auf **NADP⁺** (Nicotinamid-Dinukleotid-Phosphat) übertragen, weiter entsteht **ATP**.

Bilanzgleichung der Lichtreaktion:

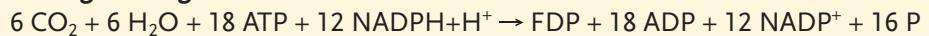
- $H_2O + 4 \text{ Photonen } (h\nu) \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^-$
- $H_2O + 4 \text{ Photonen } (h\nu) + ADP + P + NADP^+ \rightarrow \frac{1}{2} O_2 + ATP + NADPH + H^+$

Dunkelreaktion: CO_2 wird unter Aufwendung des in der Lichtreaktion gebildeten ATP und NADPH+H⁺ an Ribulose-1,5-diphosphat gebunden (**Kohlenstoffdioxiddixierung**). Im **Calvinzyklus** entsteht letztendlich aus zwei Triosen (Glycerinaldehyd-3-phosphat) ein Mol **Fructose-1,6-diphosphat**. Ribulose-1,5-diphosphat wird unter ATP-Aufwand wieder gebildet.



Schematische Abbildung des Calvinzyklus

Bilanzgleichung der Dunkelreaktion:



Pflanzen, die die CO_2 -Fixierung unter Bildung von Triosen bewerkstelligen, werden **C3-Pflanzen** genannt. Bei ihnen reagiert aber nicht CO_2 mit Ribulose-1,5-diphosphat, sondern auch O_2 (Fotorespiration), wodurch ein Teil der Triosen nicht gebildet wird. **C4-Pflanzen** (z. B. Mais, Zuckerrohr) haben insofern einen höheren Wirkungsgrad, als sie in einem parallelen Stoffwechselweg CO_2 auch an Phosphoenolpyruvat binden können, woraus der Verlust aus der Fotorespiration ausgeglichen werden kann.

 **Phosphoenolpyruvat** siehe FDP-Weg in Kap. B, 3.2.



Ziele erreicht? – „Ausgewählte Stoffwechselwege“

- 3.2.01** Beschreiben Sie den Abbau der Hauptnährstoffe und die Wirkung der Enzyme in der Verdauung!
- 3.2.02** In welchen Reaktionsschritten wird Glucose abgebaut und wie lautet die Bilanzgleichung?
- 3.2.03** In welchen Reaktionsschritten werden Fettsäuren abgebaut und wie lautet die Bilanzgleichung einer gesättigten Fettsäure aus 12 C-Atomen?
- 3.2.04** In welchen Reaktionsschritten werden Aminosäuren abgebaut und wie wird der Stickstoff ausgeschieden?
- 3.2.05** Wie kann Pyruvat im Stoffwechsel reagieren?
- 3.2.06** In welchen Reaktionsschritten wird Acetat im TCC abgebaut und wie lautet die Bilanzgleichung?
- 3.2.07** In welchen Reaktionsschritten wird aktiver Wasserstoff in der Atmungskette auf Sauerstoff übertragen und wie lautet die Bilanzgleichung?
- 3.2.08** In welchen Teilreaktionen erfolgt die Fotosynthese und wie lauten die Bilanzgleichungen?

4 Mikrobiologie

Im 19. Jahrhundert gelangen wesentliche wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich der Mikrobiologie. Namen von berühmten Forschern, wie Louis Pasteur oder Robert Koch, sind uns wohlbekannt. Die Isolierung von Bakterien und Hefen und die Aufklärung ihrer Stoffwechselvorgänge ermöglichen die Entwicklung der Impfungen als Anwendung der medizinischen Biotechnologie im Kampf gegen pathogene Bakterien. Als Weiterentwicklung gibt es heute auch Impfungen gegen Viruserkrankungen.

Penicillin als erstes Antibiotikum wurde aus Pilzen gewonnen, die das Wachstum von Bakterien hemmen.

Ein Blick in die Welt der mit freiem Auge nicht sichtbaren Lebewesen ist nicht nur Voraussetzung zum Verständnis der Biotechnologie, sondern vermittelt uns auch eine Vorstellung von der Evolution.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Unterschiede zwischen **Prokaryoten** und **Eukaryoten** erklären;
- die wichtigsten **Gattungen der Bakterien** aufzählen und ihre Stoffwechselleistungen beschreiben;
- die wichtigsten Gruppen der **einzelligen Pilze** und **Schimmelpilze** nennen und ihre Bedeutung in der Biotechnologie darstellen;
- einen Überblick über sonstige **Mikroorganismen** und **einellige Lebewesen** geben.



LOUIS PASTEUR, 1822 BIS 1895,
FRANZÖSISCHER CHEMIKER UND
MIKROBIOLOGE, UND ROBERT
KOCH, 1843 BIS 1910, DEUTSCHER
MEDIZINER UND MIKROBIOLOGE,
DIE BEGRÜNDER DER MODERNEN
MIKROBIOLOGIE



ALEXANDER FLEMING, 1881 BIS
1955, BRITISCHER MIKROBIOLOGE,
ENTDECKER DES PENICILLINS

Mikroorganismen

Die **Mikrobiologie** ist die Wissenschaft und Lehre von den **Mikroorganismen**. Darunter versteht man mikroskopisch kleine, mit freiem Auge nicht sichtbare Lebewesen. Mikroorganismen sind meist **Einzeller**. Mikroskopisch kleine **Mehrzeller**, wie z. B. Schimmelpilze, werden jedoch auch dazugezählt.

Die **Mikroorganismen** werden in folgende Gruppen eingeteilt:

- **Bakterien** einschließlich der **Archebakterien**
- **Pilze** (Hefen, Schimmelpilze)
- **Mikroalgen** (Cyanobakterien, früher Blaualgen)
- **Protozoen** (Urtierchen)

Die **Archebakterien** (Urbakterien) werden in der jüngsten Literatur auch als eigene Gruppe der Mikroorganismen (Archaea) geführt.

 **Viren** siehe Kap. B, 2.4.

Da die **Viren** keine Lebewesen im eigentlichen Sinn sind, werden sie hier nicht als eigene Gruppe angeführt.

In der medizinischen Mikrobiologie spielt der **Unterschied zwischen Bakterien und Viren** als Krankheitserreger eine bedeutende Rolle. Bakteriell verursachte Krankheiten, z. B. eitrige Entzündungen verschiedener Körperregionen, können mit **Antibiotika** behandelt werden. Die Therapie viral bedingter Erkrankungen, z. B. Grippe, erfolgt hingegen nur mit spezifischen **Virostatika**, die die Vermehrung der Viren in den Wirtszellen hemmen.

FSME ist die durch Zecken übertragene „Frühsommer-Meningoenzephalitis“, eine viral bedingte Entzündung der Gehirnhaut und des Gehirns.

 **Globuline** siehe Kap. B, 1.1.

Impfungen schützen spezifisch gegen bestimmte bakterielle Krankheitserreger, z. B. Typhusimpfung, Diphtherieimpfung, und gegen Viren, z. B. Poliomyelitis-Impfung, **FSME**- („Zecken“)-Impfung. Dabei werden durch vorbehandelte, nicht mehr pathogene Erreger, **Antikörper im Immunsystem** gebildet, sogenannte **Immunglobuline**. In diesem Fall spricht man von der **aktiven Immunisierung**. Bei der **passiven Immunisierung** werden bereits z. B. in Zellkulturen oder Versuchstieren vorgebildete Immunglobuline injiziert.

Zellaufbau der Prokaryoten und Eukaryoten

Die **Zellen der Organismen** bestehen aus drei wesentlichen Teilen:

- **DNA:** Träger des genetischen Codes.
- **Zytoplasma:** Innenraum der Zelle, in der sich der Stoffwechsel und die Proteinbiosynthese vollziehen.
- **Zellmembran:** Umhüllung der Zelle, Abtrennung vom umgebenden Medium oder von benachbarten Zellen, gleichzeitig Regulator des Stofftransports in die und aus der Zelle.

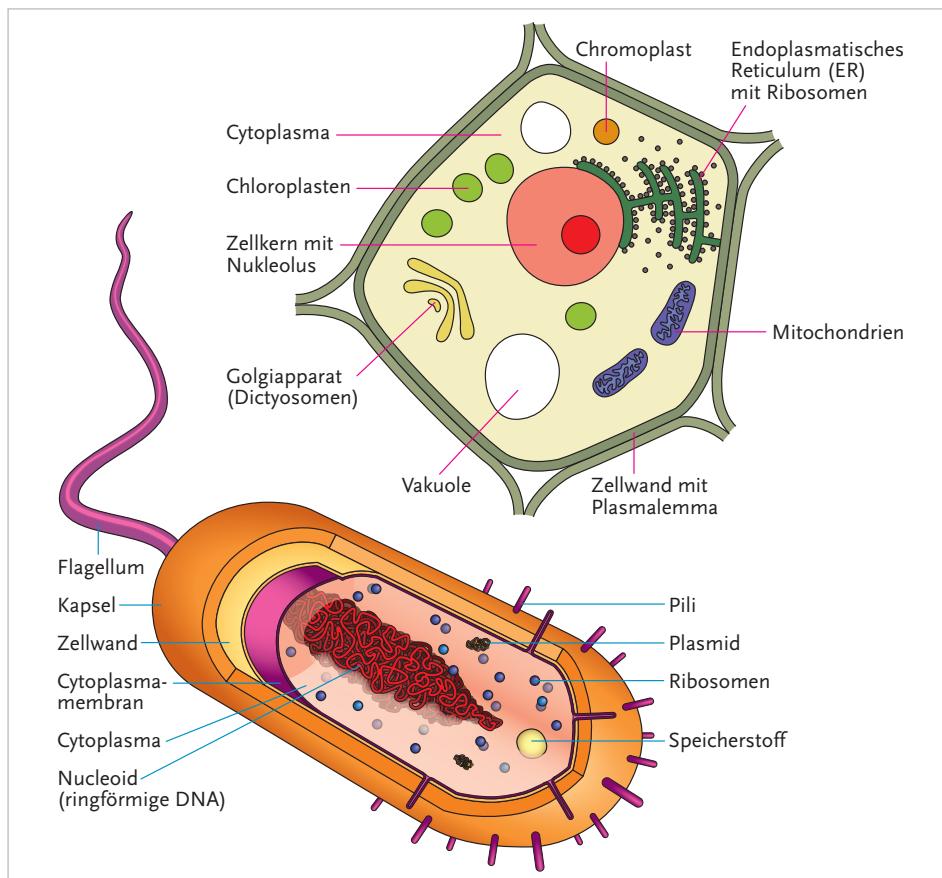
 **Proteinbiosynthese** siehe Kap. B, 2.2.

 Die Bezeichnung **Prokaryonten** und **Eukaryonten** war früher üblich.

Nach dem Aufbau der Zellen wird zwischen **Prokaryoten** und **Eukaryoten** unterschieden. Die **Bakterien** sind Prokaryoten, alle **anderen Organismen** Eukaryoten.

Die **wesentlichsten Unterschiede** zwischen Prokaryoten und Eukaryoten:

- Bei **Eukaryoten** befindet sich die **DNA im Zellkern**, **Prokaryoten** haben **keinen Zellkern**, die DNA befindet sich frei im Zytoplasma.
- **Eukaryoten** weisen ein strukturiertes **Zytoplasma mit Organellen** auf, **Prokaryoten** haben **keine Organellen**.



Die Abbildungen zeigen eine **prokaryotische Bakterienzelle** und eine **eukaryotische Pflanzenzelle**

Am Beispiel der Pflanzenzelle können folgende **Organellen** unterschieden werden:

- **Mitochondrien:** Energiestoffwechsel, „Kraftwerke der Zelle“
- **Endoplasmatisches Reticulum mit Ribosomen:** Proteinbiosynthese, Verbindung zwischen Organellen
- **Golgiapparat:** Hormonbildung, Transportfunktion, Fremdkörperabwehr
- **Chloroplasten:** Fotosynthese
- **Chromoplasten:** Pflanzenfarbstoffe
- **Vakuole:** Speicher für Nährstoffe

Bakterien

Bakterien weisen meist eine **Größe von ein bis zehn Mikrometern** auf und sind daher nur im **Mikroskop** sichtbar.

Einteilung einiger Bakterien nach der Form und weiteren Merkmalen:

| Form | Weiteres Merkmal | Beispiele |
|--|---|---|
| Kugelförmige Kokken (in verschiedenen Anordnungen) | Diplokokken (paarweise) | Pneumokokken (Auslöser von Lungenentzündungen) |
| | Streptokokken (kettenförmig) | Enterokokken (eine Art der Milchsäurebakterien im Darm des Menschen) |
| | Staphylokokken (haufenförmig) | Staphylococcus aureus (Auslöser von eitrigen Entzündungen) |
| Stäbchenförmige Bakterien ohne Sporenbildung | Enterobacteriaceae (Darmbakterien) | Escherichia coli (typische Darmbakterien) oder Salmonellen (Erreger von Darmerkrankungen, wie Typhus) |



Unter **Pili** versteht man haarförmige Ausstülpungen der Zellmembran mancher Bakterienarten. Mithilfe der Pili können sich Bakterien an Oberflächen und anderen Zellen festsetzen.



Unter **Flagellen** oder **Geißeln** versteht man Fortbewegungsorgane einzelliger Organismen.



Fotosynthese siehe Kap. B, 3.2.



Im menschlichen **Darm** leben ca. 100 Billionen Bakterien, im **Mund** etwa zehn Milliarden.



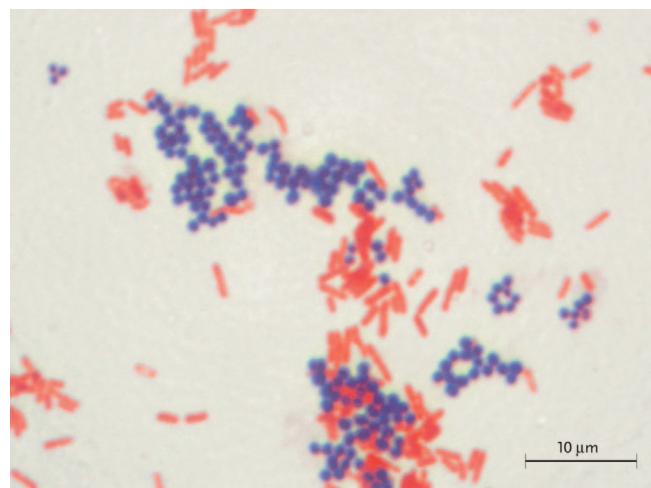
Aerobe Bakterien benötigen Sauerstoff, für **anaerobe Bakterien** ist Sauerstoff toxisch.

Unter **Fadenziehen** versteht man eine Krankheit des Brotes, bei der die Enzyme von Bazillen die **Brotkrume** zu einer schleimigen, Fäden ziehenden Beschaffenheit auflösen.

Die **Gramfärbung** wurde vom dänischen Mikrobiologen **Hans Christian Gram** (1853 bis 1938) entwickelt. Dabei wird die Bakterienmembran mit dem Farbstoff **Gentianaviolett** behandelt. Je nach Eigenschaft der Membran kann der Farbstoff an ihr gebunden (**grampositiv**) oder wieder gelöst werden (**gramnegativ**).

| | | |
|---|--|---|
| Stäbchenförmige Bakterien ohne Sporenbildung | Lactobacteriaceae (Milchsäure-bakterien) | Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus casei (in Sauermilchprodukten, Joghurt) |
| Stäbchenförmige Bakterien mit Sporenbildung | Bacillaceae (Bazillen); aerob | Bacillus subtilis (Heubacillus; in Mehl und Getreideprodukten, Auslöser des Fadenziehens von Brot) |
| | Clostridiaceae (Clostridien); anaerob | Clostridium botulinum (Toxinbildner, z. B. in Fleischkonserven), Clostridium tetani (Erreger des Wundstarrkrampfes) |

Neben Form, Sporenbildung und der aeroben oder anaeroben Lebensweise stellt die **Gramfärbung** ein weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal dar. Aus der Tabelle sind die Enterobacteriaceae **gramnegativ**, alle anderen **grampositiv**. Dieses Unterscheidungsmerkmal hat im Einsatz von **Antibiotika** gegen bakterielle Krankheitserreger Bedeutung. Einige Antibiotika wirken nämlich nur gegen grampositive, andere gegen gramnegative Bakterien.



Mikroskopische Aufnahme nach Gramfärbung: grampositive Staphylokokken (violett) neben gramnegativen Enterobacteriaceae (rot)

In der **Biotechnologie** ist ein weiteres Merkmal der Bakterien von Bedeutung, nämlich ihr **primäres Stoffwechselendprodukt** bzw. ein Stoffwechselzwischenprodukt, auch Enzym. Beispiele:

- Lactobacteriaceae: Milchsäure
- Bacillus subtilis: Alphaamylase
- Clostridium acetobutylicum: Aceton, Butanol, Ethansäure (Essigsäure), Butansäure (Buttersäure)
- **Streptomyces**: Antibiotikum Streptomycin

Hefen

Hefen sind einzellige Pilze, die sich durch Sprossung oder Teilung vermehren. Hefen sind eukaryotische Organismen.

Hefen stellen in der **Biotechnologie** eine der wichtigsten Gruppen von Mikroorganismen dar. Sie waren in der Geschichte der Menschheit die **ersten** für die Herstellung von Bier und Wein **biotechnologisch genutzten Organismen** und werden wegen ihres Vorkommens im Sauerteig auch zur Brotlockerung genutzt. In jüngster Zeit spielen sie bei der Herstellung von **Agroethanol (Bioethanol)** aus kohlenhydrathaltigen Rohstoffen eine vorrangige Rolle.

Hefen können unter **aeroben** und **anaeroben** Bedingungen Zucker verwerten. Unter **aeroben** Bedingungen gewinnen die Hefezellen die 19-fache Menge an energiereichem ATP, was sie zur **Vermehrung** befähigt. Damit kann **proteinreiche Biomasse**, z. B. für Futterzwecke, gewonnen werden. Unter **anaeroben** Bedingungen wird Ethanol produziert.

Wichtige Vertreter der Hefen:

- **Saccharomyces cerevisiae**: Backhefe, Ethanolproduktion
- **Saccharomyces carlsbergensis**: Bierhefe (für untergäriges Bier)

Schimmelpilze

Schimmelpilze sind mehrzellige Mikroorganismen, deren **Myzel**, das Pilzgeflecht, nur mit dem Mikroskop sichtbar ist. Die Vermehrung erfolgt durch **Sporen**, die auf Sporeenträgern, Sporangien, gebildet werden. Die **Sporeenträger** sind als Pilzrasen auf den Oberflächen von Lebensmitteln oder auf Wänden mit freiem Auge sichtbar. Nach der **Form der Sporeenträger** werden die Gattungen der Schimmelpilze unterschieden.

In der **Biotechnologie** sind folgende Schimmelpilzarten von Bedeutung (Beispiele):

- *Penicillium roqueforti* und *Penicillium camemberti*: Käseherstellung
- *Aspergillus niger*: Citronensäure
- *Penicillium chrysogenum*: Penicillin (Antibiotikum)
- *Aspergillus oryzae*: Alphaamylase
- *Fusarium venenatum*: Quorn, ein vegetarischer Fleischersatz (vergleichbar mit Sojaeiweiß)



Ziele erreicht? – „Mikrobiologie“

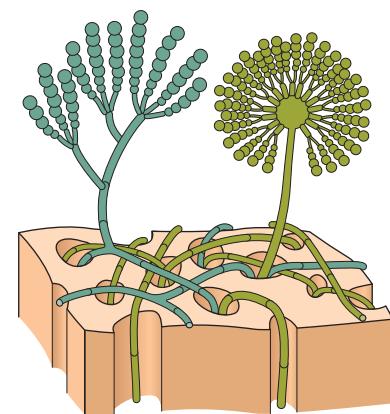
- 4.01 Welche Gruppen von Mikroorganismen kennen Sie?
- 4.02 Welche Bestandteile hat eine Zelle und wodurch unterscheiden sich dabei Prokaryoten und Eukaryoten?
- 4.03 Beschreiben Sie folgende Bakterien nach Form, Gramfärbung und Sporenbildung: Clostridien, Enterobacteriaceae, Streptokokken, Bazillen und Lactobacteriaceae.
- 4.04 Worin liegen die Unterschiede zwischen Atmung und Gärung der Hefen?
- 4.05 Welche Hefen und welche Schimmelpilze haben in der Biotechnologie Bedeutung?
- 4.06 Warum werden Hefen und Schimmelpilze in der Systematik getrennt behandelt? Begründen Sie dies mit ihrem Aufbau und ihrer Vermehrung.



Reaktionsgleichungen für den aeroben und anaeroben Glucoseabbau siehe Kap. B, 3.1.



Bei der Gärung von **untergärigem Bier** setzt sich die Hefe am Boden des Gärgefäßes ab, bei **obergärigem Bier** schwimmt sie mit dem Schaum oben.



Schematische Darstellung der typischen Fruchtkörper:
links einer **Penicillium**-Art („Pinselschimmel“),
rechts einer **Aspergillus**-Art („Gießkannenschimmel“)

5 Biotechnologische Verfahrenstechnik

Biotechnologische Verfahren werden seit mehreren Tausend Jahren angewendet. Beispiele dafür sind die Bier- und Weinherstellung durch die alkoholische Gärung mit Hefen, die Milchsäuregärung zur Herstellung gesäuerter Milchprodukte, Sauermüse und Sauerteig. Später erlangten Bakterien und Schimmelpilze zur Käseherstellung Bedeutung. Die Essigerstellung mit Bakterien war ein weiteres Verfahren. Diese traditionellen biotechnologischen Methoden basierten weitgehend auf empirischen Erkenntnissen.

Ausgangsrohstoff für viele biotechnologische Verfahren sind **nachwachsende Rohstoffe**, häufig **stärkehaltige Nutzpflanzen**. Neben der **stofflichen Nutzung** hat die **energetische** eine starke wirtschaftliche Bedeutung, z. B. in Form von **Biogas** oder **Agroethanol** (Bioethanol). Biotechnologische Produkte sind selbstverständlicher Bestandteil unseres täglichen Lebens und werden nur durch exakte Anwendungsformen dieser Ingenieurwissenschaft ermöglicht.

5.1 Fermenter und Prozessparameter

Sauerteig, lateinisch fermentum, gab den Fermenten, die in der moderneren Literatur Enzyme genannt werden, ihren Namen. Die von Fermenten ausgelösten Vorgänge werden Fermentation, deutsch Gärung, genannt. Sie finden in Fermentern statt.

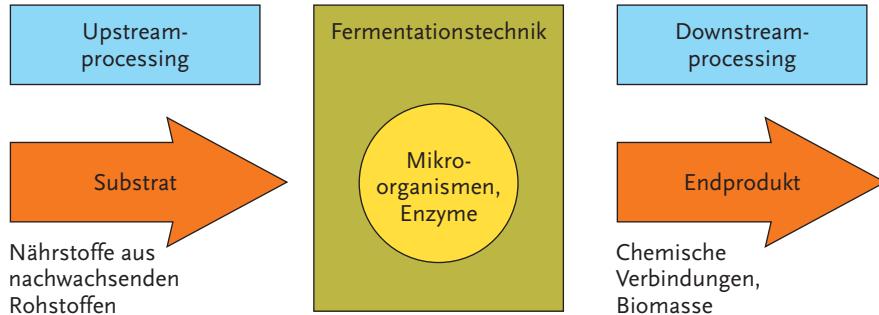


Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **Fermentation** und **Fermenter** erklären;
- die verschiedenen **Bauweisen von Fermentern** und die **Belüftungssysteme bei aeroben Prozessen** darstellen;
- die Begriffe „**Upstreaming**“ und „**Downstreaming**“ in biotechnologischen Prozessen mit Beispielen erläutern;
- die Zusammenhänge zwischen der **Wachstumskurve von Mikroorganismen** und der **Regelung von biotechnologischen Prozessen** erkennen.

Lebende Zellen und Teile daraus als Werkzeuge der Biotechnologie



Schematische Darstellung von biotechnologischen Prozessen

Biotechnologische Prozesse gliedern sich in folgende Abschnitte:

- **Fermentation:** Zentraler Prozess, in dem die Werkzeuge der Biotechnologie, die **lebenden Zellen**, hauptsächlich Mikroorganismen, oder Bestandteile daraus, vor allem **Enzyme**, die **Umsetzung des Substrats** zum Endprodukt bewirken.
- **Upstreaming:** Aufbereitung des **Substrats**, der Nährstoffe, meist aus **nachwachsenden Rohstoffen**. In den meisten biotechnologischen Verfahren sind die **Kohlenhydrate** Stärke oder niedermolekulare Zucker der wichtigste Ausgangsstoff.
- **Downstreaming:** Aufarbeitung bzw. **Aufreinigung** der Endprodukte, das sind entweder chemische Verbindungen aus den **Stoffwechselprodukten** der lebenden Zellen oder die lebenden Zellen selbst, **Biomasse** genannt.

Die wichtigsten Vorgänge des **Upstreamings** sind:

- **Aufschluss der Nährstoffe:** z. B. Abbau von Stärke zu vergärbaren, niedermolekularen Zuckern (Glucose, Maltose) durch Hitzebehandlung (z. B. Dämpfen) zur Verkleisterung der Stärke und danach enzymatischer Abbau mit Amylasen.
- **Sterilisation des Substrats:** Durch Hitzebehandlung wird die Nährstofflösung weitgehend keimfrei gemacht, da sich nur die im Fermenter zugesetzten Zellen entwickeln sollen, nicht jedoch Fremdkeime.

Die wichtigsten Vorgänge des **Downstreamings** sind:

- **Trennung** der lebenden Zellen von der Lösung mit den Endprodukten, z. B. durch Filtration oder Separation (Zentrifugieren).
- **Biomassegewinnung:** Aufarbeitung der lebenden Zellen zu
 - ▶ **lebenden Präparaten**, wie z. B. Backhefe, Bierhefe, Milchsäurebakterien für Joghurt- und Sauermilchprodukte; dabei spielen die Kühlung oder Tiefkühlung der lebenden Zellen sowie die Schutzverpackung zur Vermeidung von Kontaminationen die entscheidende Rolle;
 - ▶ **hitzestabilisierten Präparaten**, wie z. B. Futter- oder Nährhefe; dabei stehen die Inaktivierung der Zellen und ihre Trocknung im Mittelpunkt.
- Gewinnung von **Stoffwechselendprodukten**
 - ▶ **Aufschluss der Zellen** als vorbereitender Schritt, sofern sich die Stoffwechselprodukte vor allem noch in den Zellen befinden; der Aufschluss erfolgt mechanisch durch Pressen durch Mikrometeröffnungen bei extrem hohem Druck oder durch Hochgeschwindigkeitsmixer (z. B. ULTRA-TURRAX®) oder durch Ultraschall.
 - ▶ **Destillation und Rektifikation:** Abtrennung mithilfe verschiedener Siedebereiche der zu gewinnenden Stoffe, z. B. Gewinnung von Ethanol.
 - ▶ **Fällung und Umkristallisation:** Leicht lösliche Stoffwechselendprodukte werden durch Zugabe von z. B. Calciumverbindungen als schwer lösliche Calciumumsalze ausgefällt und danach wieder gelöst und umkristallisiert; Beispiel: Fällung von Citrat als schwer lösliches Calciumcitrat und Umkristallisation zu Citronensäure.
 - ▶ Trennung durch **Ultrafiltration** durch Kunststoffmembranen mit definierter Durchlässigkeit für Teilchen in der Größe von rund 0,01 Mikrometer. Die Durchlässigkeit wird auch als Maß für die Molmasse in Dalton zum Ausdruck gebracht, dies besonders, wenn es sich um die Abtrennung von Proteinen (Enzymen) handelt.

Fermenter: Bauweisen, Belüftung

Fermenter sind die zentrale Einheit in der biotechnologischen Verfahrenstechnik. Sie werden auch als **Bioreaktoren** bezeichnet. In einfacherster Ausführung bestehen sie aus einem **Gefäß** für die Umsetzung des Substrates durch die lebenden Zellen sowie Einrichtungen für die **Zufuhr** des Substrates und den **Abzug** der Endprodukte nach der Fermentation. Auch **mess- und regeltechnische Einrichtungen**, wie z. B. Thermometer für die Temperaturkontrolle, sind vorhanden.



Die **Vermeidung der Kontamination** (Infektion) durch Fremdkeime ist während der gesamten Fermentation eine der wichtigsten Aufgaben.



Citronensäurefermentation
siehe Kap. B, 5.2.



Maßeinheit **Dalton** für die Molmasse von Proteinen siehe Kap. B, 1.1.



Gärsubstrate liegen meist in Form von leicht pumpbaren Lösungen vor. Im Fall der **Sauerteiggärung** können jedoch durch den Einsatz von Dickstoffpumpen auch **hochviskose Medien** in den und aus dem Fermenter gefördert werden.

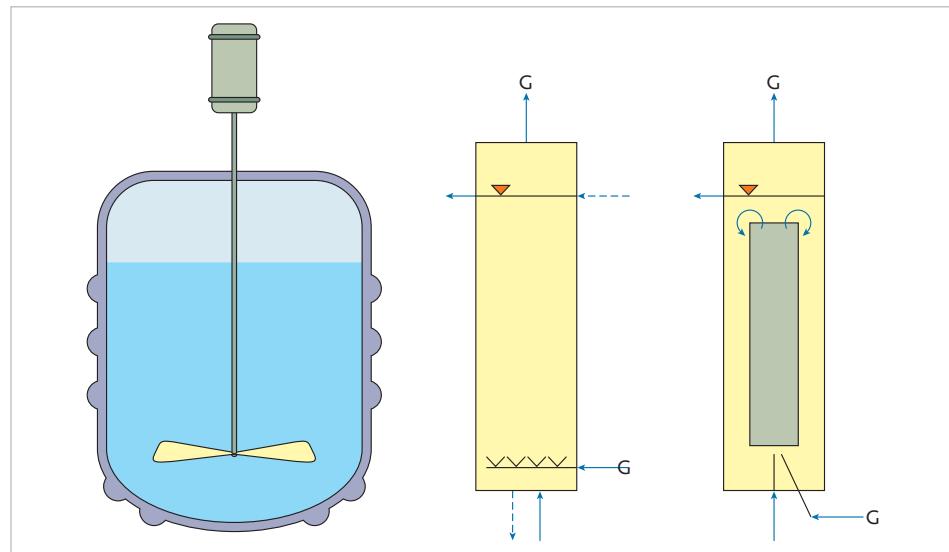


Die Zufuhr des Substrates wird als **Feeding** bezeichnet.

Mit dieser **einfachsten Form** von Fermentern lässt sich vor allem die **alkoholische Gärung** in der Bier-, Wein- und Bioethanolherstellung durchführen. Da es sich dabei um einen **anaeroben** Prozess handelt, wird durch das bei der alkoholischen Gärung gebildete Kohlenstoffdioxid, das sich über das Gärsubstrat legt, der Zutritt von **Luftsauerstoff unterbunden**.

Beispiele für einfache Konstruktionen der beschriebenen Art finden sich als offene Gärbottiche in traditionellen Brauereien und als geschlossene Gärtanks (Gärsilos) in der modernen **Brauereitechnologie** und in der **Technologie der Weinherstellung**.

Sind jedoch **aerobe Fermentationen** das verfahrenstechnische Ziel, kommen aufwendigere Konstruktionen zum Einsatz. Fermenter für aerobe Prozesse sind in jedem Fall mit Einrichtungen für die **intensive Belüftung und Sauerstoffzufuhr** ausgestattet. Damit im Zusammenhang steht die Ausstattung zur Gewährleistung einer **intensiven Umwälzung, Durchmischung und Sauerstoffverteilung** im Bioreaktor.



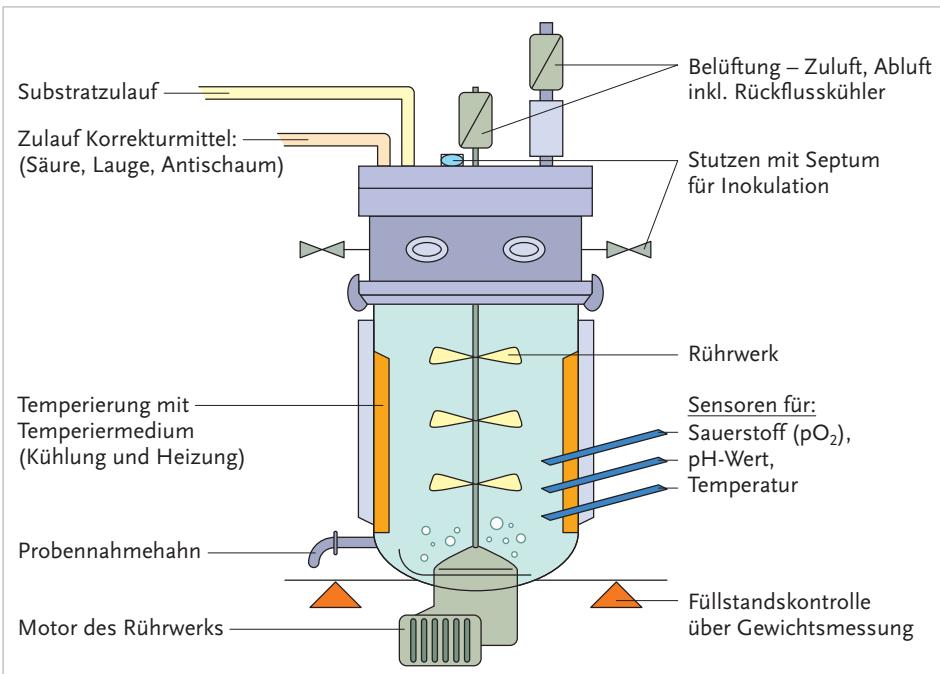
Drei Fermenterbauweisen für die aerobe Fermentation: von links nach rechts Rührkesselfermenter, Blasensäulenfermenter, Airlift-Schlaufenfermenter



Zur **Vermeidung von Kontaminationen** durch Fremdkeime muss die zugeführte Luft durch Mikrofeinfilter entkeimt werden.

Da in aeroben Prozessen der **Eintrag von Luftsauerstoff** in das Fermentationssubstrat von entscheidender Bedeutung ist, kommt neben der **zugeführten Luftmenge** auch der **Verteilung** der mikrofeinen Luftbläschen besondere Bedeutung zu. Im **Rührkesselfermenter** wird die eingebrachte Luft durch ein Rührwerk verteilt. Im **Blasensäulenfermenter** führt die eingebrachte Luft selbst die innige Durchmischung aus. Die dafür nötige Konstruktion im Unterteil des Fermenters ist entweder ein Ringrohr mit Luftauslässen oder eine mikroperforierte Platte. Im **Airlift-Schlaufenfermenter** wird die Umwälzung durch Hochströmen der Luft im Zentralrohr und Abwärtsströmen im Außenkanal erreicht.

Die **Komplexität** der biotechnologischen Verfahrenstechnik lässt sich aus der folgenden Darstellung eines Laborfermenters ableiten. Neben der Zufuhr des Substrates, dem Abzug der Endprodukte und der Belüftung sowie Durchmischung sind **Mess- und Regeleinrichtungen** für die **Steuerung des Prozesses** vorzusehen, wie dies in der Folge ausgeführt wird.



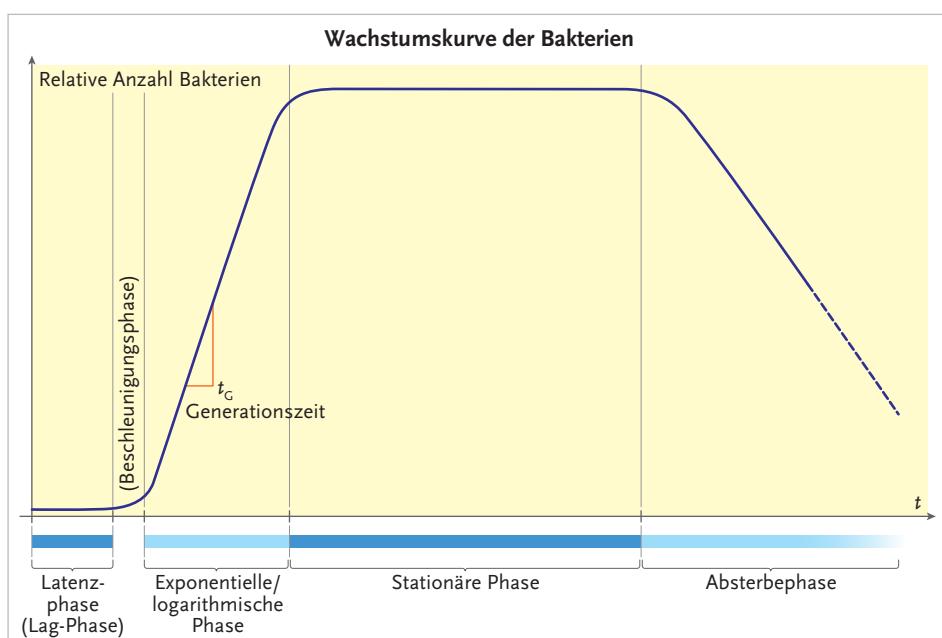
Laborfermenter mit mess- und regeltechnischen Einrichtungen zur Steuerung des biotechnologischen Prozesses



Fermenter in der biotechnologischen Industrie

Mess- und regeltechnische Einrichtungen in Fermentern – Prozessparameter

Zum Verständnis der Prozessparameter einer Fermentation und ihrer Beeinflussung durch mess- und regeltechnische Maßnahmen betrachten wir zunächst die sogenannte **Wachstumskurve von Mikroorganismen**.



Wachstumskurve von Mikroorganismen

Die **Wachstumskurve** von Mikroorganismen zeigt im Diagramm der **logarithmischen Zellzahl** (Ordinate) und der **Zeit** (Abszisse) folgende Abschnitte (Phasen):

- **Anlaufphase (Lag-Phase):** Transport der Nährstoffe durch die Zellmembran, Beginn der Stoffwechselvorgänge.
- Phase des **exponentiellen (logarithmischen) Wachstums (Log-Phase):** In der Generationszeit (t_G) verdoppelt sich die Zellzahl. Unter optimalen Bedingungen beträgt die Generationszeit bei Bakterien 20 bis 30 Minuten.



Die Mikroorganismen, mit denen das Substrat zu Beginn des Prozesses **geimpft** wird, nennt man **Starterkultur** oder **Anstellgut**, lateinisch **inoculum**.

- **Stationäre Phase:** Die Zellzahl bleibt konstant, wegen des zunehmenden Mangels an Nährstoffen, auch an Sauerstoff, oder zu hoher Konzentration der Endprodukte findet keine Vermehrung mehr statt. Der Stoffwechsel hält die Zellen noch am Leben.
- **Absterbephase:** Durch anhaltenden Mangel an Nährstoffen oder Sauerstoff bzw. zu hohe Konzentration an Endprodukten sterben die Zellen ab.

Biotechnologische Verfahren werden durch die **Prozessparameter** so gesteuert, dass sich die Mikroorganismen grundsätzlich im Bereich der **Phase exponentiellen Wachstums** befinden.

Bei biotechnologischen Prozessen unterscheiden wir zunächst zwischen **Emerskulturen (Oberflächenkulturen)**, z. B. von Schimmelpilzen) und **Submerskulturen**, bei denen sich die Mikroorganismen in der Nährlösung befinden. Während Emerskulturen immer **chargenweise** geführt werden, unterscheiden wir bei **Submerskulturen**:

- **Batchverfahren – chargenweise Fermentation:** Der Fermenter wird mit **Substrat** gefüllt und mit dem **Inoculum** geimpft. Der Prozess wird bis zum **Ende der exponentiellen Wachstumsphase** geführt, allenfalls noch in der **stationären Phase**, sofern in dieser die zu gewinnende Konzentration an Endprodukten zunimmt.
- **Kontinuierliche Verfahren:** Der Fermenter wird **zu Beginn** mit Substrat gefüllt und mit dem Inoculum geimpft. Im Zuge der kontinuierlichen Führung des Prozesses wird **laufend Substrat zugegeben** und Produktlösung abgezogen. Kontinuierliche Fermentationen werden in der **exponentiellen Wachstumsphase** geführt. Dies wird durch folgende Fermentertypen bewerkstelligt:
 - ▶ **Chemostat:** Verfahrensführung auf Basis **konstanter Substratkonzentration**, daraus resultierend eine konstante Endproduktkonzentration.
 - ▶ **Turbidostat:** Verfahrensführung auf Basis **konstanter Zellzahl bzw. Zellmasse**. Die Messung und Steuerung erfolgen durch eine kontinuierliche Trübungsmessung (Turbidimetrie). Die Trübung entspricht der Zellmasse.

Die Steuerung der biotechnologischen Verfahren erfolgt durch **Prozessparameter**:

| Messgröße | Messeinrichtung | Regelung durch: |
|---|---|---|
| Temperatur | Widerstandsthermometer, z. B. „Pt 100“ | Heizung bzw. Kühlung; Doppelmantelfermenter bzw. Heiz-/Kühlrohre |
| pH-Wert | pH-Meter mit Glaselektrode | Korrekturmittel Säure oder Lauge oder Pufferlösung |
| Redoxpotenzial oder O₂-Partialdruck | Redoxelektrode oder O ₂ -sensitive Elektrode | Lufteintrag (Luftmenge je Zeiteinheit), bei Rührkesselreaktoren zusätzlich Rührerdrehzahl |
| Luft- bzw. CO₂-Konzentration | Infrarot-Gaskonzentrationsmesseinrichtung | Lufteintrag (Luftmenge je Zeiteinheit), bei Rührkesselreaktoren zusätzlich Rührerdrehzahl |
| Ionenkonzentration | Ionensensitive Elektroden | Dosierung Korrekturmittel |
| Nährlösungskonzentration | Fotometer | Substratdosierung |
| Zellzahl | Turbidimeter | Substratdosierung |

Formel für die **Zunahme der Zellzahl (Zellmasse)** in der Phase exponentiellen (logarithmischen) Wachstums:

$$\lg X_t = \lg X_0 + \lg 2 \cdot t/t_G$$

Dabei bedeuten:

X_t = Zellzahl nach der Zeit t

X_0 = Zellzahl zu Beginn

t_G = Generationszeit (Zeit, in der sich die Zellen verdoppeln)



Bei einer angenommenen **Generationszeit von 30 Minuten** unter optimalen Bedingungen (Prozessparametern) vermehrt sich **eine Zelle** (z. B. Bakterie) in **zwölf Stunden auf 16,8 Millionen Zellen**, bei einer **Generationszeit von 20 Minuten** auf **68,7 Milliarden Zellen!**



Ziele erreicht? – „Fermenter und Prozessparameter“

- 5.1.01 Beschreiben Sie den Ablauf eines biotechnologischen Prozesses.
- 5.1.02 Definieren Sie die Begriffe Fermentation, Upstreaming und Downstreaming und geben Sie Beispiele dafür an.
- 5.1.03 Beschreiben Sie den Aufbau eines Fermenters und die konstruktiven Möglichkeiten zur Einbringung von Luft.
- 5.1.04 Charakterisieren Sie die Phasen der Wachstumskurve von Mikroorganismen.
- 5.1.05 Ordnen Sie die chargeweise und kontinuierliche Führung von biotechnologischen Verfahren folgenden Begriffen zu: Batchverfahren, Submerskultur, Turbidostat, Emerskultur und Chemostat.
- 5.1.06 Wie hoch liegt die Zellzahl bzw. Biomasse bei einer Ausgangszahl von 1 000 und einer Generationszeit von 40 Minuten nach zehn Stunden?
- 5.1.07 Welche Messwerte veranlassen den Produktionsleiter eines biotechnologischen Unternehmens zur Erhöhung der Drehzahl des Rührwerks eines Rührkesselreaktors?

5.2 Ausgewählte Beispiele – Fermentationen

Biotechnologische Produkte haben in der Weltwirtschaft große Bedeutung. Allen voran steht die traditionelle Bierproduktion. Das Werkzeug des Biotechnologen ist dabei die Bierhefe. Neben Hefen stehen Schimmelpilze und Bakterien im Mittelpunkt biotechnologischer Verfahren.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- einen Überblick über die weltweit **wichtigsten biotechnologischen Erzeugnisse** geben;
- die **alkoholische Gärung** anhand ausgewählter Beispiele erklären;
- Beispiele für die **Milchsäuregärung** geben;
- die **Citratfermentation** beschreiben;
- die Bedeutung der **biotechnologischen Herstellung von Antibiotika und Insulin in der Pharmazie** erklären.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die wirtschaftlich bedeutendsten biotechnologischen Produkte.

| Produkt | Weltproduktion Mio. EUR/Jahr | Weltproduktion t/Jahr |
|----------------------|------------------------------|-----------------------|
| Bier | 450 000 | 155 000 000 |
| Wein | 135 000 | 27 000 000 |
| Bioethanol | 9 100 | 35 000 000 |
| Antibiotika | 4 750 | 2 500 |
| Aminosäuren | 4 000 | 2 000 000 |
| Backhefe | 2 300 | 2 000 000 |
| Insulin | 1 000 | 8 |
| Futterhefe | 1 000 | 3 000 000 |
| Citronensäure | 800 | 1 000 000 |

Quelle: M. Neureiter: Skriptum „Biotechnologie“, FH Wr. Neustadt, 2010;
Zahlen für Wein: Vine-EXPO-Studie, Bordeaux (F), 2011

Die folgenden Beispiele von Fermentationen geben einen kleinen **Ausschnitt** aus der Vielfalt biotechnologischer Prozesse.



Biokybernetik des aeroben und des anaeroben Hefestoffwechsels siehe Kap. B, 3.1, **Stoffwechselwege** siehe Kap. B, 3.2, **Mikrobiologie** siehe Kap. B, 4.

Melasse ist das Nebenprodukt aus der Erzeugung von Kristallzucker (Saccharose). Es handelt sich dabei um eine sirupartige, hochviskose Masse. Da Melasse noch etwa 50 % Saccharose enthält, ist sie ein idealer Rohstoff für Fermentationen, im Besonderen die Hefefermentation.



Beim **Maischprozess** der Bioethanolproduktion wird Stärke zunächst mit Wasser erhitzt (verkleistert) und danach enzymatisch bis zur Glucose abgebaut.

Alkoholische Gärung – Hefeproduktion

Bei der Verwendung von Hefen in der Fermentation ist zunächst die grundlegende Frage der Zielsetzung zu klären.

Hefen in biotechnologischen Verfahren:

- **Ethanolproduktion** (z. B. Bier, Wein, Bioethanol): **anaerobe Fermentation**
- **Biomasseproduktion** (z. B. Backhefe, Futterhefe): **aerobe Fermentation**

Substrat für die Hefefermentation ist überwiegend **Glucose**, die über den **FDP-Weg** abgebaut wird. Die Glucose stammt entweder aus dem enzymatischen Abbau **stärkehaltiger Rohstoffe**, vor allem Getreide, oder aus **Melasse**. Disaccharide (Maltose, Saccharose) werden von der Hefe außen an der Zellmembran enzymatisch gespalten, die Monosaccharide (Glucose, Fructose) werden in den Zellstoffwechsel eingeschleust.

Beispiele für **biotechnologische Verfahren mit Hefen**:

| Fermentation, Mikroorganismus | Substrat, Upstreaming | Produkt, Downstreaming |
|---|--|---|
| Bierproduktion Anaerobe Fermentation, <i>Saccharomyces carlsbergensis</i> | Gerstenmalz, Schrotten (Mahlen), Maischprozess mit enzymatischem Abbau, Läutern, Würzekochen, Kühlen | Filtrieren, Abfüllen |
| Bioethanolproduktion Anaerobe Fermentation, <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | Getreide (z. B. Mais, Weizen), Mahlen, Maischprozess mit enzymatischem Abbau (Verzuckerung), Eiweißabtrennung (Gluten) | Destillation, Rektifikation |
| Backhefeproduktion Aerobe Fermentation, <i>Saccharomyces cerevisiae</i> | Melasse, pH-Einstellung, Nährstoffzusatz (z. B. Ammoniumsalze als Stickstoffquelle) | Zentrifugieren, Filtern, in Form pressen (z. B. Haushaltshefewürfel), Verpacken |

Bierproduktion – Brauereitechnologie

■ Fermentation

- ▶ **Untergärige Hefen** (*Saccharomyces carlsbergensis*): sinken während der Gärung im Gärkessel (Fermenter) ab, kühle Gärführung (5 bis 10 °C), Biertyp: Pils, Märzen, Lagerbier.
- ▶ **Obergärige Hefen** (*Saccharomyces cerevisiae*): steigen während der Gärung im Gärkessel (Fermenter) auf, warme Gärführung (15 bis 20 °C), Biertyp: Weißbier, Kölsch, Stout (Irland).
- **Malz** (Gerstenmalz, Weizenmalz, allgemein Getreidemalz): gekeimtes Getreide, zur Haltbarmachung gedarrt (d. h. getrocknet, Darrtemperatur je nach gewünschter Farbe), **hohe Enzymaktivität**.
- ▶ **Hemicellulasen**: Aufschluss der Zellwandbestandteile im Nährgewebe (Endosperm) des Getreidekorns.
- ▶ **Proteasen**: Abbau des Proteins; zu viel Protein im Bier bewirkt Kältetruh (Proteinausfällung) bei kühler Lagerung, zu wenig Protein hat geringe Schaumbildung zur Folge.
- ▶ **Amylasen**: Abbau der Stärke zu Dextrinen durch die α -Amylase und weiter zu Maltose durch die β -Amylase. Die Maltose ist die Zuckerquelle für die Hefegärung, die Dextrine sind für den Restextrakt und den Körper des Bieres verantwortlich.
- **Brauereitechnologie**: Der wichtigste Prozess ist die sogenannte **Sudhausarbeit**, die sich in folgende Schritte gliedert:
 - ▶ **Maischprozess**: In der Brauerei wird das gedarnte Malz zunächst zerkleinert (geschrötet, gemahlen) und danach mit Wasser bei etwa 60 bis 65 °C eingemaischt. Bei dieser Temperatur wird vor allem Maltose von der β -Amylase gebildet. Danach wird die Temperatur auf ca. 70 bis 75 °C angehoben, die ideale Temperatur für die α -Amylase und die Dextrinbildung. Mit der negativen Jodprobe (keine Blaufärbung zeigt an, dass die gesamte Stärke abgebaut wurde) endet der Maischprozess.
 - ▶ **Läutern**: Nach dem Maischen wird abgeläutert, vergleichbar mit einer Filtration. Die Spelzen, die äußersten Schalenteile des Gersten- bzw. Malzkorns, dienen dabei als natürliches Filterhilfsmittel.
 - ▶ **Würzekochen**: Die geläuterte Würze wird unter Zusatz von Hopfen gekocht. Dabei werden folgende Ziele verfolgt:
 - Extrahieren der Bitterstoffe des Hopfens
 - Inaktivieren der Enzyme
 - Ausfällen von Eiweißfraktionen
 - Einstellen der gewünschten Würzegrade, z. B. 12° für Lagerbiere (entsprechend der Dichte einer 12%igen Saccharoselösung)
 - Austreiben unerwünschter Aromastoffe
 - ▶ In einem **Zyklon-Sedimentationsverfahren** (Whirlpool) wird die gekochte Würze vom Trub getrennt, gekühlt und der Gärung (Fermentation) zugeleitet.

Milchsäuregärung

Die Milchsäuregärung erfolgt durch **Milchsäurebakterien** (*Lactobacteriaceae*). Es handelt sich dabei um unterschiedlich geformte Bakterien (Langstäbchen, Kurzstäbchen, kugelförmige Kokken). Sie sind **anaerob**, allenfalls sauerstofftolerant, und können Zucker aus nährstoffreichen, komplex zusammengesetzten Substraten in **Milchsäure** und auch in andere Produkte umsetzen. Man unterscheidet zwei Arten:

- **Homofermentative Milchsäurebakterien**: Das Produkt der Fermentation ist Milchsäure.
- **Heterofermentative Milchsäurebakterien**: Neben Milchsäure entstehen auch Essigsäure, Ethanol und Kohlenstoffdioxid.



Ein **Getreidekorn** besteht aus drei Hauptteilen: Schalen, Keimling und Nährgewebe (Endosperm). Beim Mälzen beginnt die **Keimung** nach **Anheben des Wassergehalts** während der Lagerung von ca. 13 bis 14 % auf 40 bis 45 %.



Traditionelles Sudhaus

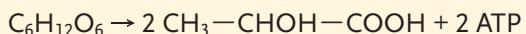


Modernes Sudhaus der Versuchsbrauerei der Brauunion Linz, OÖ

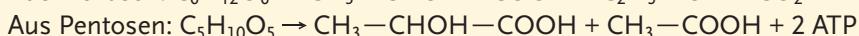


Whirlpool der Versuchsbrauerei der Brauunion Linz, OÖ, im Zentrum der Trubkegel, außen die klare Würze

Summenformel für die **homofermentative Milchsäuregärung**:



Summenformel für die **heterofermentative Milchsäuregärung**:



Die Glucose wird über den **FDP-Weg** abgebaut. **Pyruvat** wird mit $\text{NADH}+\text{H}^+$ zu **Lactat** reduziert.



Je nach Bakterienart und -stamm produzieren Milchsäurebakterien **rechtsdrehende L-Milchsäure** oder **linksdrehende D-Milchsäure**. Da die rechtsdrehende L-Milchsäure in den Zellen des Menschen rascher abgebaut werden kann, wird sie von vielen Konsumenten in Joghurts bevorzugt. Aber auch die linksdrehende D-Milchsäure kann im **Stoffwechsel** – nur etwas langsamer – umgesetzt werden.



Einige Arten von Milchsäurebakterien entwickeln sich besonders rasch bei Temperaturen zwischen 30 und 45 °C. Sie werden als **thermophil** bezeichnet, z. B. *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus acidophilus*.



Von den angeführten Milchsäurebakterien sind folgende **heterofermentativ**: *Leuconostoc mesenteroides*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus fermentum*.



Ein Biotechnologieunternehmen in Niederösterreich gehört mit chinesischen und US-amerikanischen Citronensäureherstellern zu den Weltmarktführern in diesem Bereich.

Beispiele für die homofermentative Milchsäuregärung

- **Fermentierte Milchprodukte** (Joghurts, Sauermilch): Substrat ist pasteurisierte Milch. Die darin enthaltene Lactose wird z. B. von *Lactobacillus bulgaricus*, *Lactobacillus casei*, *Lactobacillus acidophilus*, *Lactobacillus bifidus*, *Streptococcus thermophilus* und anderen in Milchsäure (Lactat) umgesetzt, entweder in Gäranks in der Molkerei, häufig aber auch in den Verpackungen (z. B. Joghurtbechern).
- **Milchsäure** für technische Zwecke, als Lebensmittelzusatzstoff, für die pharmazeutische Industrie oder für die Erzeugung von kompostierbaren Kunststoffen (Polylactat): Das Substrat enthält Lactose (z. B. aus Molke) oder Glucose; die Zucker werden z. B. durch *Lactobacillus rhamnosus*, *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus helveticus* und andere zu Milchsäure fermentiert.

Beispiel für den Downstreamingprozess von Lactat

- Als Neutralisationsmittel wird während der Fermentation Calciumcarbonat zugesetzt, wodurch die gebildete Milchsäure überwiegend als Calciumlactat vorliegt.
- Durch Erhitzung nach der Fermentation werden die Lactobacteriaceae inaktiviert und die Proteine ausgefällt.
- Der pH-Wert wird auf ca. 10 eingestellt, wobei schwer lösliches, überschüssiges Calciumcarbonat ausfällt, Calciumlactat hingegen in der Lösung bleibt.
- Nach der Filtration wird Schwefelsäure zugesetzt, die Calciumlactat in schwer lösliches Calciumsulfat überführt, die Milchsäure kann abgetrennt, filtriert (bei gewünschter hoher Reinheit mit Aktivkohle) und konzentriert werden.

Beispiele für die heterofermentative Milchsäuregärung

- **Sauerkraut**: Geschnittenes Kraut wird von Mischkulturen aus homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien, z. B. von *Lactobacillus plantarum*, *Leuconostoc mesenteroides* und anderen, in Milchsäure (Lactat) und Essigsäure (Acetat) umgesetzt.
- **Sauerteig**: Roggen- oder auch Weizenteig wird von Mischkulturen aus homo- und heterofermentativen Milchsäurebakterien, z. B. von *Lactobacillus delbrueckii*, *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus brevis*, *Lactobacillus fermentum* und anderen, in Milchsäure (Lactat) und Essigsäure (Acetat) umgesetzt.

Citratfermentation

Citrat wird mit dem **Schimmelpilz** *Aspergillus niger* erzeugt. Zuckerreiche Substrate, wie Melasse oder verzuckerte Maisstärke, werden bei pH-Werten <3 in Emers- oder Submersverfahren **aerob** fermentiert.

Glucose wird zunächst über den **FDP-Weg** abgebaut und Pyruvat zu **Acetyl-Coenzym A** oxidativ decarboxyliert. Acetyl-CoA wird in den Citratzyklus eingeschleust und an Oxalacetat zu Citrat gebunden. Im stark sauren pH-Bereich kann Citrat nicht weiter metabolisiert werden, da der Zwischenschritt über Aconitat zu Isocitrat **gehemmt** wird.

Die Nährböden dürfen keine **Eisen- und Manganionen** enthalten, da diese die Umwandlung des Citrats zu Aconitat begünstigen würden.

Der stark saure pH-Bereich bewirkt auch eine **Durchlässigkeit der Zellmembranen** für Citronensäure, die damit in das Substrat austreten kann.

Im **Downstreamingprozess** wird Citronensäure aus der Nährlösung mit Calciumcarbonat als Calciumcitrat gefällt. Nach Schwefelsäurezugabe fällt Calciumsulfat aus und Citronensäure kann abfiltriert und kristallisiert werden.

Citronensäure und Citrate werden vor allem bei der Herstellung von **Lebensmitteln und pharmazeutischen Präparaten** verwendet.

Antibiotika

Antibiotika sind Stoffe, die von **Mikroorganismen** (meist Schimmelpilzen, auch Bakterien, wie Streptomyces) gebildet werden, um sich gegen andere Mikroorganismen im Konkurrenzkampf einer vielfältigen, gemischten Population durchzusetzen. Diese Situation herrscht in natürlichen Biotopen, wie z. B. im Erdboden, vor.

Antibiotika sind meist komplexe aufgebaute organische Moleküle, die selektiv Mikroorganismen am **Wachstum hindern**, indem sie einzelne Stoffwechselvorgänge hemmen.

Penicilline werden von Schimmelpilzen, z. B. *Penicillium chrysogenum*, *Penicillium notatum*, gebildet. Sie wirken **gegen grampositive Bakterien** (z. B. Staphylococci), indem sie deren **Zellwandbildung** beeinträchtigen, was letztendlich zu ihrem Absterben führt.

Fermentiert werden Penicilline in **aeroben Submerskulturen**, die Substrate enthalten meist aufgeschlossenen Mais. Als pharmazeutisches Präparat muss im mehrstufigen Downstreamingprozess eine besonders hohe Reinheit erzielt werden.

Streptomycine werden z. B. von *Streptomyces griseus* gebildet. Es handelt sich dabei um komplexe aufgebaute Derivate von Glucosaminen (stickstoffhaltigen Monosacchariden). Streptomycine wirken **gegen gramnegative Bakterien**, wie z. B. gegen Enterobacteriaceae. Sie greifen in die **Proteinbiosynthese** ein und hemmen die Bindung der tRNA in den Ribosomen.

Insulin

Insulin ist ein **Hormon**, das in der Bauchspeicheldrüse gebildet wird und den **Zuckerstoffwechsel** reguliert. Es handelt sich dabei um ein **Peptid**, das aus einem A-Strang mit 21 Aminosäuren und einem B-Strang mit 30 Aminosäuren besteht. Drei Disulfidbrücken binden die beiden Peptidketten und zeichnen für die räumliche Struktur verantwortlich.

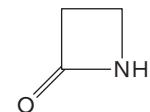
Insulinmangel ist die Ursache der Zuckerkrankheit, des Diabetes. Da bei bestimmten Formen des Diabetes Insulingaben, vor allem per Injektion, die einzige **Behandlungsmöglichkeit** darstellen und wegen der relativ hohen Häufigkeit der Erkrankung besteht ein großer Bedarf an **synthetischem Insulin**.



Streptomyces siehe Kap. B, 4.



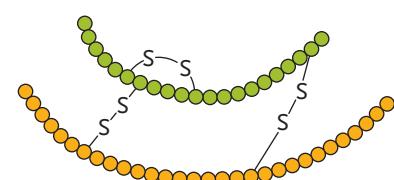
Für die Penicilline ist der **Beta lactamring** der charakteristische Bestandteil des komplex aufgebauten Moleküls.



Gramfärbung siehe Kap. B, 4.

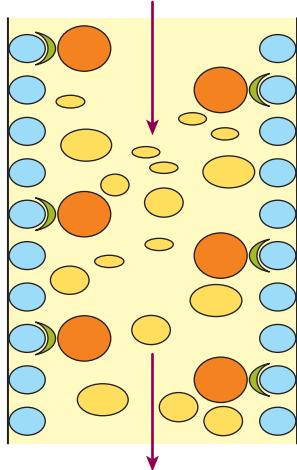


tRNA siehe Kap. B, 2.2.



Schematische Darstellung des Insulinmoleküls mit dem A-Strang (grün), dem B-Strang (orange) und den drei Disulfidbrücken

 **Genetischer Code, Proteinbiosynthese und Rekombinationsenzyme** siehe Kap. B, 2.1, 2.2 und 2.4.



Schematische Darstellung einer Affinitätschromatografie-Säule: Die orangen Insulinmoleküle werden an die blauen Gelmoleküle der Säulenpackung über die grünen Bindungsmoleküle gebunden, die gelben Nichtinsulinmoleküle werden ausgewaschen

Eluere: lateinisch für auswaschen

Hergestellt wird es durch **Fermentation** mit einem gentechnisch **modifiziertem Bakterium**, nämlich *Escherichia coli*, kurz *E. coli* genannt. *E. coli* ist ein Darmbakterium der Gruppe der Enterobacteriaceae. Aufgrund der gentechnischen Modifikation unter anderem mithilfe von Rekombinationsenzymen, wird es auch als **rekombinanter Insulin** bezeichnet.

Die Herstellung von rekombinantem Insulin wird in folgenden **Schritten** vorgenommen:

- Nach der Entschlüsselung des **genetischen Codes** für Insulin kann die entsprechende DNA-Basensequenz mit **Rekombinationsenzymen** nachgebildet werden.
- Mit einem **Vektor** (Genfahre) wird das Gen in die Zellen von *E. coli* eingebracht. Gleichzeitig wird ein **Antibiotika-Resistenzgen** in die Zellen transportiert.
- Ein komplex zusammengesetztes **Substrat** mit Zucker und Proteinhydrolysat als wichtigsten Nährstoffen sowie einem **Antibiotikum** wird mit dem transgenen *E. coli* beimpft. Das Antibiotikum bewirkt, dass sich nur die **transgenen** *E. coli* vermehren können.
- Fermentiert wird unter Bedingungen der maximalen Zellvermehrung. In den Zellen wird das **Insulin** durch **Proteinbiosynthese** gebildet.
- Die Zellen von *E. coli* werden aus dem Fermenter abgezogen und mit **Zentrifugen** abgetrennt. Danach werden die Zellen durch Ultraschall **aufgeschlossen**.
- Um das Insulin vor proteolytischem Abbau zu schützen, werden in den Zellen gebildete **Proteasen** durch geeignete Chemikalien **inaktiviert**.
- Nach einer Filtration wird das Filtrat durch eine **Affinitätschromatografie-Säule** geleitet. Dabei wird das Insulin spezifisch gebunden und konzentriert. Mit einem geeigneten Puffer wird das Insulin letztendlich aus der Säule ausgewaschen (eluert).



Ziele erreicht? – „Fermentationen“

- 5.2.01** Welche Ziele werden durch biotechnologische Fermentationen mit Hefen verfolgt?
- 5.2.02** Welche Gruppen von Milchsäurebakterien und davon abgeleitete Milchsäuregärungen kennen Sie?
- 5.2.03** Mit welchem Mikroorganismus wird Citronensäure fermentiert und wie ist das Substrat beschaffen?
- 5.2.04** In welcher Weise wirken die Antibiotika Penicillin und Streptomycin gegen Bakterien?
- 5.2.05** Beschreiben Sie den Prozess der Herstellung von rekombinantem Insulin.



C Naturwissenschaften, Umwelt und Gesellschaft

Wir stellen in diesem Kapitel die Einsetzbarkeit von Energiequellen, bestimmten Produktgruppen und Technologien vor und wiegen deren Vor- und Nachteile ab. Der Gebrauch und das Konsumverhalten werden dabei auch im kulturellen, ökonomischen und sozialpolitischen Zusammenhang gezeigt. Neben Grundbegriffen lernen Sie aktuelle Problemkreise und nachhaltige Entwicklungen kennen und werden zu einem verantwortungsvollen Umgang mit Konsumgütern und Energieträgern angeleitet.

- 1 Fossile und erneuerbare Energieträger** Seite 160
- 2 Halogenkohlenwasserstoffe** Seite 168
- 3 Kunststoffe** Seite 173
- 4 Suchtmittel und Gesellschaft** Seite 177
- 5 Lebensmittel** Seite 184
- 6 Strahlenbelastung und Nanotechnologie** Seite 189



1 Fossile und erneuerbare Energieträger

„Think global, act local“ ist zu einem in den verschiedensten Zusammenhängen strapazierten Schlagwort geworden. Die Internetgesellschaft benutzt diese Phrase ebenso wie internationale Konzerne, wenn sie ihre Geschäftspolitik beschreiben. Global erfolgreiche Systeme und Produkte sollen maßgeschneidert für Abnehmer in bestimmten Regionen oder für spezielle Zielgruppen angeboten werden. Ursprünglich wurde dieser Satz jedoch im Zusammenhang mit den Herausforderungen des Umweltschutzes und dem sparsamen Umgang mit Rohstoffen verwendet. Gemeint war, dass es für den Einzelnen oder eine überschaubare Gemeinschaft leichter ist, den eigenen Energie- und Rohstoffverbrauch zu reduzieren, als auf eine weltweite Änderung zu warten.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- angeben, welche Rohstoffe als **fossile Energieträger** genutzt werden und in welcher Form **erneuerbare Energieträger** technisch umgesetzt werden;
- die in der Physik verwendeten Begriffe **primäre und sekundäre Energiequellen** auf die Begriffe fossile und erneuerbare Energieträger übertragen;
- **Energieträger** nach ihren Vor- und Nachteilen **klassifizieren**;
- die **Biogaserzeugung** als Beispiel für eine Insellösung zur Energieversorgung darstellen;
- den Aufbau und die Funktion einer **Brennstoffzelle** erklären;
- die **Verfügbarkeit von Energieträgern** beurteilen und ihre Abhängigkeit von politischen und wirtschaftlichen Interessen nachvollziehen.



Primäre und sekundäre Energiequellen siehe NAWI I/II, Kap. E, 2.

Die Natur stellt uns primäre Energiequellen in Form von Erdöl, Erdgas, Kohle und Torf zur Verfügung. Während diese fossilen Rohstoffe in begrenztem Ausmaß zur Verfügung stehen, regenerieren sich Wasserkraft, Sonnenenergie, Windenergie, Geothermie und Biomasse selbst beziehungsweise erschöpft die Nutzung die Quelle nicht. Kernenergie zählt ebenfalls zu den primären Energien.

Sekundäre Energiequellen, also Strom aus Wärmekraftwerken, aufbereitete fossile Energieträger (Benzin, Heizöl, Koks, Briketts), Biogas, Biodiesel, Bioethanol und Wasserstoff, entstehen durch Umwandlung primärer Energie.

Erdöl und Erdgas

Wird eine Lagerstätte gefunden und erschlossen, bewirkt der geologische Druck der um- und aufliegenden Gesteinsschichten und der innere Druck durch gelöste Gase, dass die Quelle wie ein artesischer Brunnen von selbst sprudelt. Diese Förderung nennt man **Primär- oder Eruptivförderung**.

Nach einer Förderung von etwa 10 bis 15 % lässt der Lagerstättendruck nach und das Öl muss mit Pumpen zutage gefördert werden. Bei dieser **Sekundärförderung** wird die Ausbeute dadurch gesteigert, dass eingepresstes Wasser oder Erdgas den Lagerstättendruck wieder erhöht. Mit diesen Methoden erreicht man Förderquoten von 30 bis 40 %.

Eine nachfolgende **Tertiärförderung** kann die Quote auf etwa 60 % erhöhen. Handelt es sich um sehr zähflüssiges, bitumenartiges Erdöl in einem schlecht durchdringbaren Speichergestein, ist dies mit einem hohen technischen und energetischen Aufwand verbunden. Heißwasser oder Heißdampf wird eingepresst, um die



Die Offshore-Förderung ist eine sehr kostenintensive Nutzung von Ölfeldern. Hier ist eine möglichst hohe Förderquote wichtiger als an Land, wo geringere laufende Kosten anfallen.

Viskosität des zähflüssigen Erdöls zu senken, oder die Lagerstätte wird mit N₂ oder CO₂ geflutet. Auch das Einpressen von Leichtbenzin oder Flüssiggas verringert die Viskosität. Beim **Polymerfluten** dienen organische Polymere dazu, das Öl von den Feststoffen abzulösen. Dieses Lösen kann auch mit Tensiden erreicht werden. Bei der **MEOR-Methode** (microbial enhanced oil recovery) werden Mikroorganismen zusammen mit Nährstoffen in die Lagerstätte eingebracht. Dort erhöhen sie in situ durch ihre Stoffwechselprodukte den Lagerstättendruck oder die Durchlässigkeit des Speichergesteins.

Unkonventionelle Erdöl- und Erdgasförderung

Unter unkonventioneller Erdölförderung versteht man die Gewinnung von in Schiefern und Sandschichten meist in Form von Bitumen eingelagerten Vorkommen. Die bedeutendsten Lagerstätten befinden sich in Kanada und Venezuela.

Nach dem **Abbau im Tagebau** müssen die ölhaltigen Sande mit Dampf oder heißem Wasser behandelt werden. Anschließend wird das Bitumen in einer Zentrifuge vom Sand getrennt und verdünnt, damit es zu den Verarbeitungsanlagen gepumpt werden kann.

Am Ende des Transports wird das Lösungsmittel wieder vom Bitumen abgetrennt und recycelt. Nach der Umwandlung von Bitumen in Kohlenwasserstoffketten mit hohem Wasserstoffanteil und anschließender Entschwefelung erhält man synthetisches Rohöl mit geringem Schwefelgehalt, sogenanntes „sweet crude“, das in der Raffinerie weiterverarbeitet werden kann.

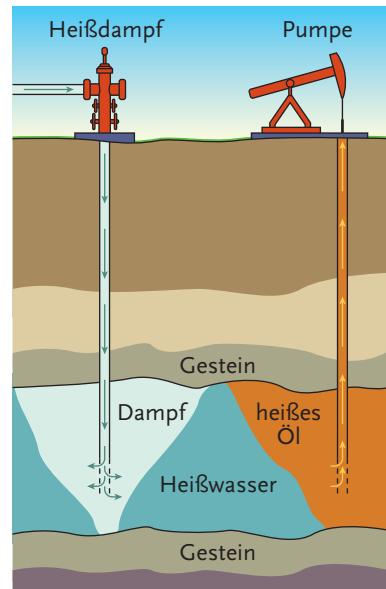
Der Tagebau hinterlässt neben Absetzbecken, in denen Wasser, Sand und nicht gelöstes Bitumen gelagert werden, eine verwüstete Landschaft, die rekultiviert werden muss. Berücksichtigt man neben dem technischen Aufwand bei der Produktion auch die Kosten für die Rekultivierung, geht etwa ein Drittel der im gewonnenen Rohöl enthaltenen Energiemenge verloren. Aufgrund des hohen Ölpreises und drohender Lieferengpässe wurde die Produktion in den vergangenen Jahren jedoch immer rentabler.

Methaneis bzw. **Methanhydrat** besteht aus Methan, das in erstarrtem Wasser eingelagert und dabei von Wassermolekülen vollständig umschlossen ist. Methanhydrat ist nur unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen stabil. Es bildet sich in großer Menge an den Kontinentalabhängen, an denen der Druck hoch und die Temperatur niedrig genug ist. Weitere Vorkommen finden sich in den Permafrostböden der Polargebiete. Man schätzt das natürliche Vorkommen auf zwölf Billionen Tonnen. Daraus schließt man, dass im Methaneis mehr als doppelt so viel Kohlenstoff gebunden ist wie in allen Erdöl-, Erdgas- und Kohlevorräten zusammen.

Der Abbau der Methanhydratfelder ist schwierig, da sich Methanhydrat in den höheren Wasserschichten bei geringerem Druck und höherer Temperatur zerstetzt und große Mengen gasförmigen Methans entweichen (Blow-out). Natürlichen Gashydraten wird auch eine den Untergrund zementierende Wirkung zugeschrieben, da sie die Porenräume des Gesteins ausfüllen und zusammenhängende Ablagerungen bilden.

Neben der Erdgasförderung ist die gewünschte Nutzung als Kohlenstoffdioxidspeicher ein weiterer Grund für intensive Forschungen. CO₂ soll als Hydrat am Meeresboden gelagert werden, während durch seine Einleitung gleichzeitig Methan freigesetzt wird.

In Krasnojarsk, Sibirien, ist die erste und einzige industriell-kommerzielle Anlage, mit der Methanhydrat abgebaut wird, in Betrieb. In Japan, dem norwegischen Spitzbergen, Kanada und Alaska wird intensiv geforscht.



Tertiäre Erdölförderung



Ölsand-Tagebau der Syncrude Canada Ltd. in Alberta



Methanhydrat bildet sich aus Wasser und Methangas bei einem Druck ab circa 20 bar

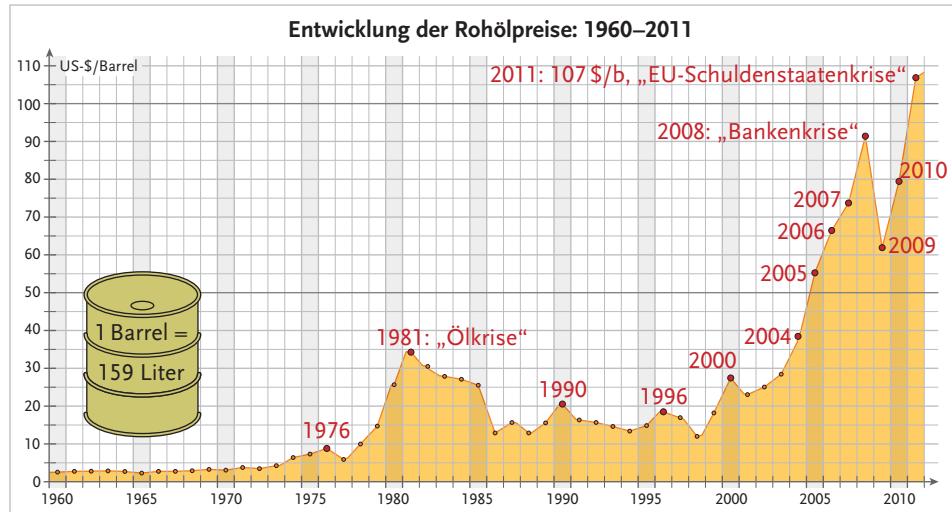


Weltweite Berühmtheit erlangte Methaneis durch den Roman „Der Schwarm“ von Frank Schätzing.

Die Verfügbarkeit und die Preisentwicklung von Erdöl und Erdölprodukten hängen stark von politischen und wirtschaftlichen Entwicklungen ab. Die Kartelle der Ölproduzenten versuchen, mit ihren individuellen Förderraten das Angebot auf dem Ölmarkt und damit den Preis zu steuern.



Diskutieren Sie fächerübergreifend, welche politischen und wirtschaftlichen Ereignisse und welche Naturkatastrophen 2011 großen Einfluss auf den Rohölpreis hatten. Holen Sie Informationen über die derzeitige Liefer- und Preissituation ein.



Kohle

Kohle als primärer Energieträger wird den fossilen Brennstoffen zugeordnet. Es gibt aber eine Kohlenart, die in der Gegenwart entsteht: Torf. **Torf** entsteht sehr langsam in Mooren, hauptsächlich aus Moosen. Zehn Zentimeter Torfmoos werden unter Luftabschluss und durch den auf ihm lastenden Wasser- und gegebenenfalls Schneedruck auf einen Millimeter Torf verdichtet.

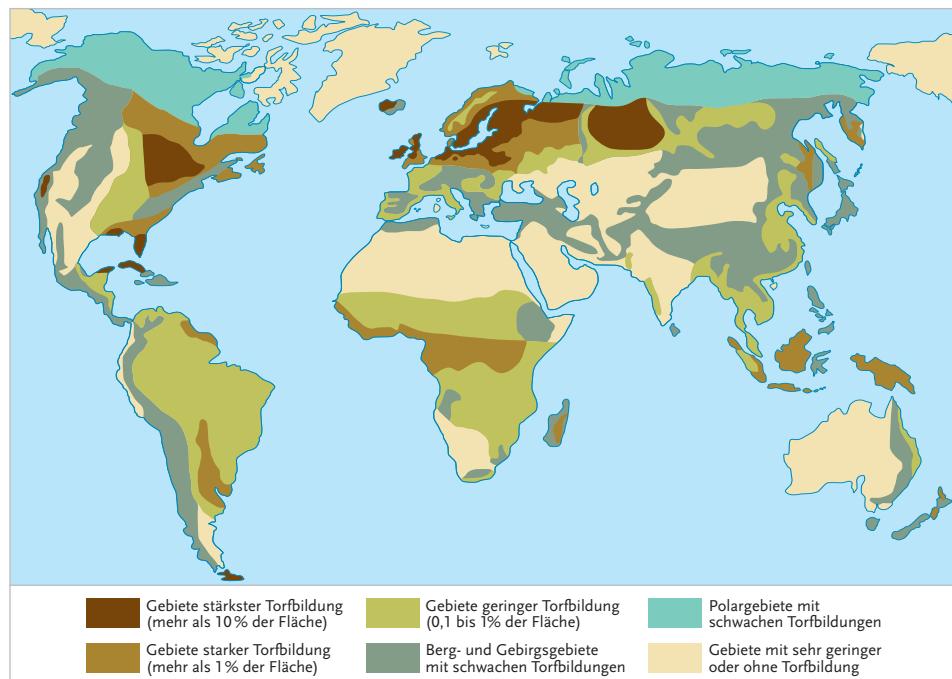


Torfmoos



Vergleichen Sie den Regenwald und Moorlandschaften. Stellen Sie neben der Fläche auch die Artenvielfalt dieser Ökosysteme dar.

Frisch gestochener Torf hat einen sehr hohen Wassergehalt und muss vor der Verbrennung ausreichend lange getrocknet werden, um einen mit Braunkohle vergleichbaren Heizwert zu erreichen. Nachteilig sind der starke Geruch und der hohe Aschegehalt. Interessanterweise ist es gerade der Torfrauch, der bei der Malzherstellung für viele schottische Whiskysorten erheblich zum Geschmack des Endproduktes beiträgt.



Moorlandschaften

Als Brennstoff in Haushalten oder Heizkraftwerken wird Torf heute in der EU in nennenswerten Mengen nur noch in Irland und Schottland, in Finnland und Schweden sowie im Baltikum verwendet, dort wiederum in jenen Regionen, in denen es ausgedehnte Moorlandschaften gibt.

In Österreich hat Torf als Brennstoff längst ausgedient. Moorlandschaften sind in Nationalparks integriert und neben Wanderern sind es Kurgäste, die Moore wegen der Wirkung von Torf als Heilerde zu schätzen wissen. Allerdings wird in österreichischen Baumärkten Importtorf als Blumenerde angeboten.

Dabei sollten Moore besonders geschützt werden! Bei der maschinellen Torffräseung gehen viele Quadratkilometer eines riesigen Süßwasser- und CO₂-Speichers verloren. Abgeerntete Flächen erholen sich nur langsam.

Bei **Stein- und Braunkohle** haben moderne Technologien und hohe Sicherheitsstandards die Förderung derart verteuert, dass die europäischen Industriestaaten, allen voran Deutschland, Kohlegruben schließen. Im Gegensatz dazu setzt beispielsweise China die Kohle intensiv als Energielieferanten ein. Der Umweltschutz spielt dort zudem eine untergeordnete Rolle, während in den Ländern, die um eine Hebung der Luftgütequalität bemüht sind, die Kohle als schmutziger Energieträger gilt.



Torfabbau in der Connemara, Irland



Frästorfgewinnung



Gesamtwertung des Vergleiches der fossilen Energieträger

Treibstoffe aus Kohle – Kohlevergasung, Kohleverflüssigung

Bereits 1913 wurde in Deutschland das **Bergiusverfahren** patentiert. Bei dieser **direkten Kohlehydrierung (Kohleverflüssigung)** reagiert in Steinkohlenteer fein verteilt Steinkohle bei beispielsweise 500 °C und 300 bar mit Wasserstoff. Das entstandene Gemisch aus vorwiegend flüssigen Kohlenwasserstoffen wird destilliert und als Kraftstoff (Benzin, Diesel) und Heizöl verwendet.

Die **indirekte Kohlehydrierung (Kohlevergasung)** des **Fischer-Tropsch-Verfahrens** (patentiert 1925) setzt als Ausgangsstoffe Braunkohle, Steinkohle, Koks und Teeröle ein. Mit Sauerstoff und Wasserdampf werden als Zwischenprodukte die Synthesegase CO und H₂ hergestellt. Als Endprodukt kann entweder Methanol erzeugt werden oder kurzkettige Kohlenwasserstoffe (Benzin, Diesel).

In Deutschland wurden die Kohleverflüssigung und die Kohlevergasung im Zweiten Weltkrieg großtechnisch eingesetzt. Sie sollten von Erdölimporten unabhängig machen. Gegenwärtig produziert nur Südafrika Benzin nach dem Fischer-Tropsch-Verfahren, Anlagen in den USA und China sind geplant.

Beide Verfahren erfordern hohen Energieeinsatz und sind trotz derzeit hoher Rohölpreise keine wirtschaftliche Alternative. Auch erscheint die Kette „Strom erzeugen, um damit Benzin zu erzeugen, um daraus wieder Antriebsenergie zu erzeugen“ aus



Diskutieren Sie, ob das Bild der Katze, die sich selbst beißt, auf das Thema „Benzin aus Kohle“ zutrifft.



energie- und umweltpolitischer Sicht fragwürdig. Der mit dem Energieaufwand verbundene CO₂-Ausstoß bei der Herstellung von Benzin aus Kohle ist deutlich höher und somit klimaschädlicher als der des Erdölproduktes!



Der Begriff „Bio“ weist hier nicht auf eine Herkunft aus ökologischer Landwirtschaft oder Nachhaltigkeit hin, sondern auf den **pflanzlichen oder tierischen Ursprung** im Gegensatz zum fossilen Erdgas.



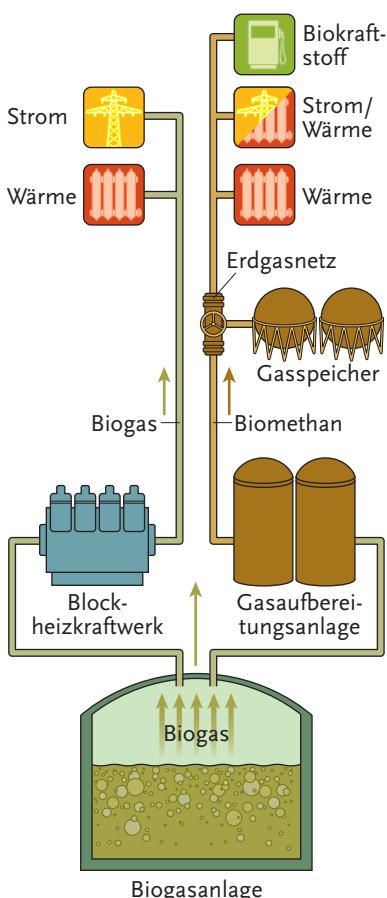
Eine Biogasanlage kann nur dann als CO₂-neutral bezeichnet werden, wenn sie mit Gülle und biogenen Abfällen betrieben wird.

Biogas

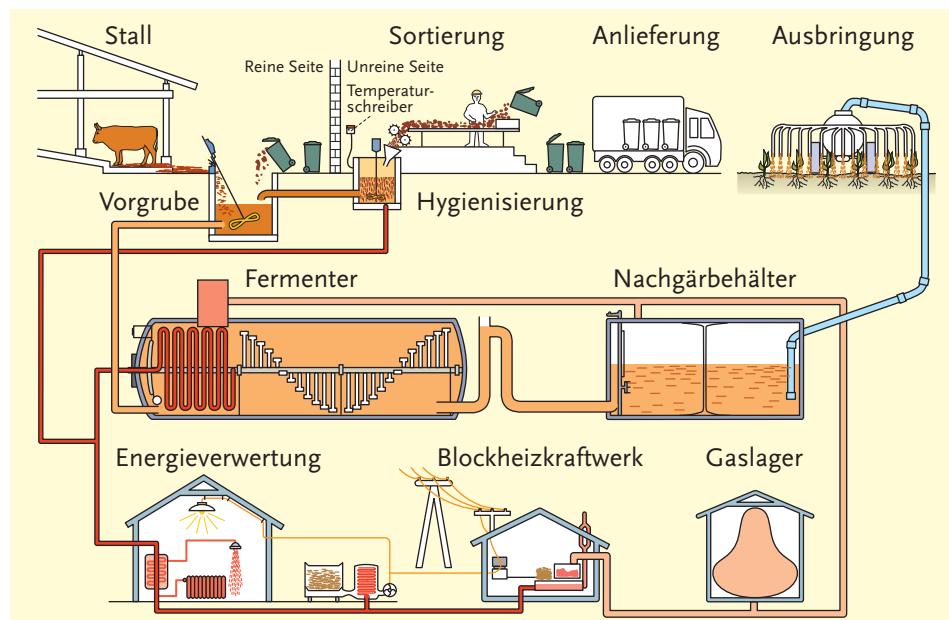
Der Begriff Biogas ist in Österreich eng mit dem Begriff Ökostrom verknüpft. Mehr als 300 landwirtschaftliche Biogasanlagen und rund 100 Klärgasanlagen sind neben 15 Deponiegasanlagen in Betrieb. Mit dem daraus produzierten Strom wird rund 1 % des jährlichen Bedarfs gedeckt.

In **Biogasanlagen** können sowohl Abfälle und Reststoffe wie Bioabfall, Speisereste und Klärschlamm als auch Wirtschaftsdünger (Gülle, Mist) und nicht genutzte Pflanzen und Pflanzenteile, aber auch gezielt angebaute Energiepflanzen (schnellwachsende Hölzer, Gräser, Mais, Getreide) vergoren werden. Bis auf Energiepflanzen handelt es sich dabei, abgesehen von Transport- und sonstigen Nebenkosten, um kostengünstige Ausgangsstoffe.

Ein Großteil der genannten Rohstoffe, insbesondere Wirtschaftsdünger, Pflanzenreste und Energiepflanzen, fällt in der Landwirtschaft an. Als Kosubstrate werden regional unterschiedlich u. a. Speisereste aus Großküchen und der Gastronomie oder Grünschnitt öffentlicher Anlagen verwendet. Für den **Landwirt** stellt die Biogasnutzung einen zweiten Wirtschaftszweig dar, er wird zum **Energiewirt**. Primäres Ziel ist die Erzeugung von Strom und Wärme für den eigenen Betrieb, Überschuss wird als Ökostrom an die Energieversorger geliefert.



Nutzung von Biogas. Kläranlagen und Deponien nutzen die erzeugte Energie ebenfalls für den Betrieb der eigenen Anlagen und speisen elektrische Energie ins öffentliche Stromnetz ein.



Schema einer landwirtschaftlichen Biogasanlage

In der Vor- und Sammelgrube wird das organische Material homogenisiert. Der Fermenter ist ebenfalls mit einem Rührwerk ausgestattet. Hier und im Nachgärbehälter findet bei Temperaturen von 35 bis 55 °C innerhalb von rund 30 Tagen die Umwandlung in etwa 60 % Methan, Kohlenstoffdioxid und Wasserdampf statt. Ebenfalls entstandener unerwünschter Schwefelwasserstoff (Dihydrogenulfid, H₂S) wird durch Mikroorganismen bei gezielter Luftzufuhr an der Substratoberfläche im Fermenter zu festem Schwefel umgewandelt, der mit dem Restsubstrat ausgebracht wird. Diese Biogasgülle wird als natürlicher Dünger wieder dem Nährstoffkreislauf über Boden und Pflanzen zugeführt.

Der **Gärprozess** selbst besteht aus mehreren Stufen: Anaerobe Bakterien bauen die hochmolekularen organischen Stoffe wie Cellulose, Lignin und Proteine durch Hydrolyse zu niedermolekularen organischen Verbindungen ab. Diese werden durch Säurebakterien zu Alkoholen, organischen Säuren, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff abgebaut (Acidogenese). Durch Essigsäurebakterien erfolgt der weitere Abbau zu Essigsäure und Wasserstoff (Acetogenese). In der letzten Phase (Methanogenese) erzeugen Methanbakterien aus Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Essigsäure die Endprodukte Methan und Wasser.

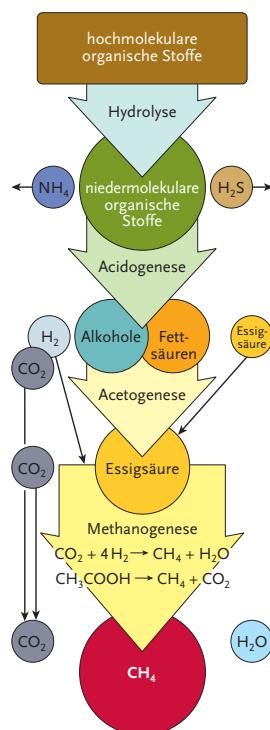
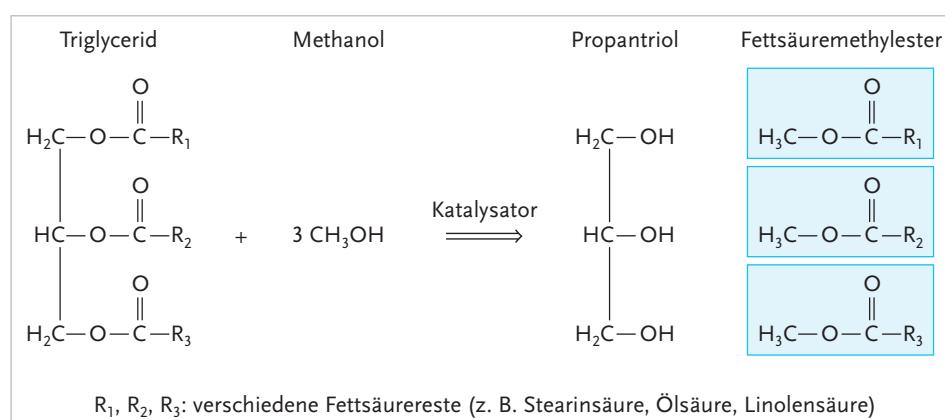
Biodiesel und Bioethanol

Essbare Rohstoffe oder Futtermittel zur Energieerzeugung zu nutzen ist vor allem angesichts der Welternährungssituation nicht unumstritten. Neben dem Flächen- und Energiebedarf bei Anbau und Ernte stellt der Verarbeitungsprozess eine positive Ökobilanz infrage.

Als Rohstoffe für die **Biodieselproduktion** eignen sich pflanzliche und grundsätzlich auch tierische Fette. In Europa wird vor allem Rapsöl eingesetzt, während in Nordamerika Sojaöl und in Südostasien Palmöl verwendet wird. Für die Produktion von Palmöl werden im Regenwald Plantagen angelegt. Die Abholzung des Regenwaldes, für Monokulturen notwendiger Pestizideinsatz und die niedrigen Löhne und Sozialstandards für die Arbeiter machen den Palmöleinsatz bedenklich – wirtschaftlich aber konkurrenzfähig. Raps und Soja werden ebenfalls in Monokulturen mit entsprechendem Düngemittel- und Pestizideinsatz produziert. Gentechnisch veränderte Sorten sollen den Ertrag erhöhen.

Für den Einsatz von Biodiesel sprechen die biologische Abbaubarkeit, der geschlossene CO₂-Kreislauf, die Unabhängigkeit von Mineralölimporten und die Sicherung von Arbeitsplätzen in der Landwirtschaft und der Verarbeitung. Zahlreiche Projekte greifen diese Vorteile auf, gesetzliche Rahmenbedingungen und Förderungen unterstützen die Betreiber dabei. Da herkömmliche Dieselmotoren nicht mit reinem Rapsöl betrieben werden können, wurde eine Beimischung von bis zu 5 % europaweit vereinbart. Zusätzlich zur Beimischung werden kommunale und betriebliche Fuhrparkumstellungen auf pure Biokraftstoffe bzw. über 40 % Biokraftstoffzusatz forciert.

Bei der Umesterung wird das Pflanzenöl als Triester von Fettsäuren katalytisch aufgespalten und Glycerol (Glycerin, Propantriol) durch Methanol ersetzt:



Landwirtschaftliche Biogasanlage in Pucking, Oberösterreich



Hubert von Goisern stürmte mit „Brenna tuats guat“ die Hitparaden:

*Jeder woass, dass a
geld nit auf da wiesen wachst,
und essen kann ma's a nit,
aber brenna tat's guat,
aber hoazen toan ma woazen
und de ruabn und den kukuruz,
wann ma lang so weiterhoazen
brennt da huat ...“*



Rapsfeld



RME ist **Rapsölmethylester** und wird meist als „Biodiesel“ bezeichnet. **FAME** (**Fettsäremethylester**) steht allgemein für Methyl-ester auf Basis von Pflanzen- und Tierölen, **PME** für **Palmölmethylester**, **AME** für **Altölmethylester** und **FME** für **Tierfettmethylester**.

Im Jahr 2010 waren in Österreich 14 Anlagen zur Produktion von Biodiesel in Betrieb.

Die Argumentation pro und kontra **Bioethanol** ähnelt der über Biodiesel. Verstärkt wird hier darauf hingewiesen, dass die Ausgangsstoffe Weizen, Gerste, Mais, Zuckerrüben und Zuckerrohr in vielen Ländern Grundnahrungsmittel sind.

! Die dem „E“ angefügte Zahl gibt an, wie viel Volumenprozent Ethanol dem Benzin beigemischt wurden.

 Alkoholische Gärung siehe Kap. B, 5.2.

Ethanol eignet sich grundsätzlich auch rein zum Betrieb von Ottomotoren und wird dem Superbenzin beigemischt. Derzeit ist in Österreich als „Biosprit“ für Benzinmotoren die Sorte E5 erhältlich. In Deutschland war die Einführung von E10 umstritten, da zahlreiche Automobilhersteller keinen einwandfreien Betrieb ihrer Modelle garantieren wollten. Hergestellt wird Bioethanol durch die klassische Hefevergärung oder durch Vergärung mit speziellen Bakterien. Zur großindustriellen Produktion von Bioethanol stand im Jahr 2010 in Österreich eine einzige Anlage im niederösterreichischen Pischelsdorf zur Verfügung.

Wasserstoff – Brennstoffzelle

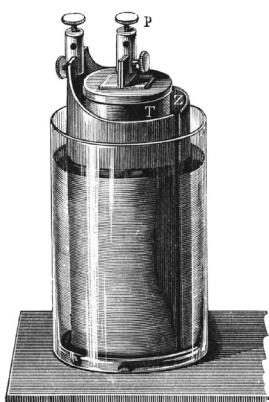
Wasserstoff erscheint auf den ersten Blick als Treibstoff sehr attraktiv, da er aus verschiedenen Primärenergiequellen gewonnen werden kann und Brennstoffzellenfahrzeuge emissionsfrei betrieben werden können. Das Problem liegt bei der Erzeugung des „Ökowasserstoffs“, denn diese soll nachhaltig erfolgen. Das Ziel ist eine effiziente Erzeugung aus erneuerbaren, regional verfügbaren Energiequellen. Aber nicht nur das **Problem der Erzeugung**, sondern auch der **Speicherung** und **Verteilung** ist bisher nicht so gelöst, dass eine nennenswerte Fahrzeugflotte im Alltagsgebrauch im Einsatz ist.

Der brennbare Wasserstoff hat einer Technologie seinen Namen gegeben, bei der durch Oxidation entstandene chemische Energie direkt in elektrische Energie umgewandelt wird. Mit der von **William Grove** entwickelten historischen Brennstoffzelle haben moderne Zellen äußerlich nur mehr wenig Ähnlichkeit.

In einer **PEMFC** (polymer electrolyte membrane fuel cell) trennt eine Polymerfolie die beiden Reaktionsräume. Sie ist durchlässig für die wandernden Protonen, die zum Ladungsausgleich führen.

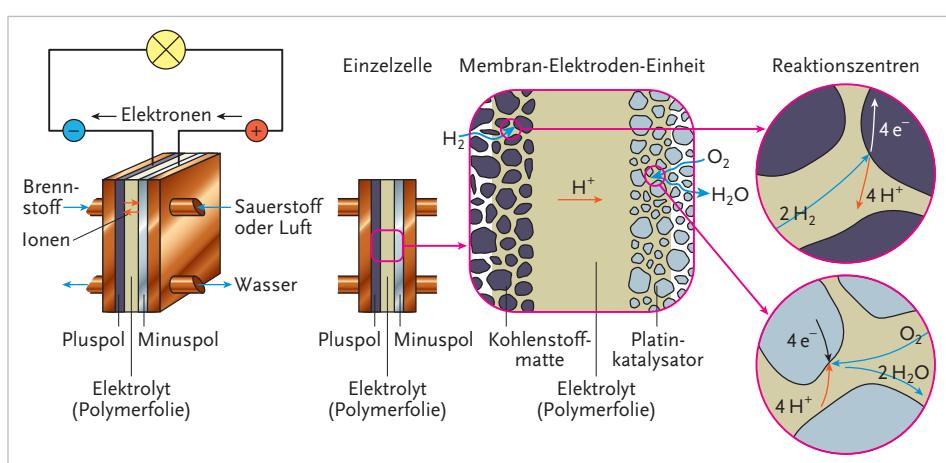
Die ablaufenden elektrochemischen Reaktionen sind
 an der negativen Elektrode $2 \text{H}_2 + 4 \text{OH}^- \rightarrow 4 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^-$
 an der positiven Elektrode $\text{O}_2 + 2 \text{H}_2\text{O} + 4 \text{e}^- \rightarrow 4 \text{OH}^-$

$$\underline{2 \text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O}}$$



Grovesches Element (Holzschnitt 1897). Grove schaltete bereits 1839 mit Sauerstoff und Wasserstoff umspülte Platinelektroden in Schwefelsäure in Reihe.

! Die Gesamtreaktion entspricht der Knallgasreaktion und liefert eine Spannung von 1,2 Volt. Der Wirkungsgrad liegt bei etwa 55 bis 60 %.



Aufbau und Funktion einer PEMFC

Derzeit werden **Brennstoffzellen** in überschaubarer Stückzahl in drei Hauptanwendungsbereichen – meist zur Erprobung – eingesetzt:

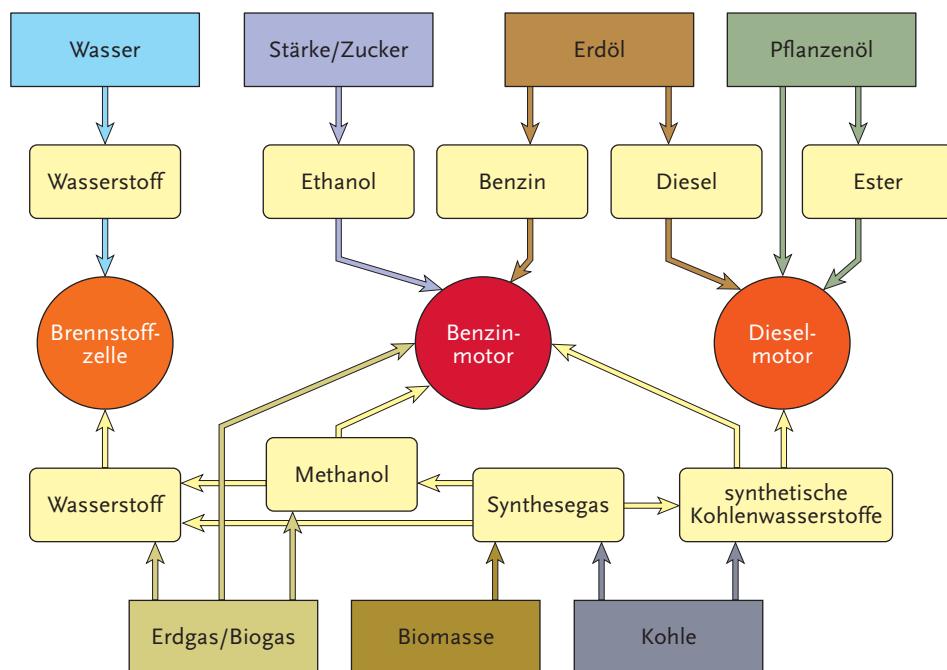
- **Portable Anwendungen** zur Stromversorgung elektronischer Kleingeräte (Laptops, Smartphones, MP3-Player)
- **Mobile Anwendungen** für den Antrieb von Kraftfahrzeugen und Booten und für die Bordstromversorgung von Satelliten und Booten
- **Stationäre Anwendungen** als Energieversorgung für einzelne Häuser

Als naheliegende Wasserstoffquelle bietet sich Wasser an, elektrolytisch in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Wasser als Rohstoff wäre dazu ausreichend vorhanden, aber Elektrolysen laufen nur unter Stromzufuhr ab! Die Frage bleibt daher offen, woher die Energie dafür stammen könnte.

Wasserstoff wird gegenwärtig vor allem aus fossilen Energieträgern gewonnen, an erster Stelle steht dabei das Reformieren von Erdgas.

Auch Methanol steht als Wasserstoffquelle zur Verfügung. Hier treten aber der Einsatz von Methanol als Verbrennungskraftstoff, der Einsatz in einer mit Methanol gespeisten Brennstoffzelle (DMFC, **direct methanol fuel cell**) und das Reformingverfahren zur Erzeugung von Wasserstoff aus Methanol in Konkurrenz.

Übersicht über die Möglichkeiten zur Herstellung von Treibstoffen:



Beispiele für Brennstoffzellen in portablen Anwendungen



Als „Wasserstoffauto“ bewerben einzelne Automobilhersteller Fahrzeuge, die Wasserstoff als Treibstoff in einem Verbrennungsmotor verwenden. Allerdings gibt es noch kein flächendeckendes Wasserstofftankstellennetz.



Welcher Pfad in nebenstehender Abbildung erscheint Ihnen aus **ökologischer**, welcher aus **ethischer** und welcher aus **wirtschaftlicher Sicht** sinnvoll?



Ziele erreicht? – „Fossile und erneuerbare Energieträger“

- 1.01** Welche Rohstoffe werden den primären und welche den sekundären Energiequellen zugeordnet?
- 1.02** Beschreiben Sie, welche Verfahren zur Erhöhung der Förderquote bei der Sekundärforderung eingesetzt werden.
- 1.03** Begründen Sie, warum bei manchen Erdöllagerstätten eine Tertiärförderung nicht angewendet wird.
- 1.04** Beschreiben Sie, welche Auswirkungen auf die Umwelt die Gewinnung von Erdöl aus Ölsanden hat.

- 1.05** Mit welchen drohenden Gefahren muss man bei der Förderung von Methanhydrat rechnen?
- 1.06** Fragen Sie in Ihrem Familien- und Bekanntenkreis nach, welche Energie spaßnahmen in Österreich 1973 verordnet wurden.
- 1.07** Welche baulichen Maßnahmen sind zur Errichtung einer landwirtschaftlichen Biogasanlage für den Eigenbedarf nötig und woher stammt die in den Fermenter eingebrachte Biomasse?
- 1.08** Erklären Sie die Begriffe Acidogenese, Acetogenese und Methanogenese im Zusammenhang mit der Biogasherstellung.
- 1.09** Wofür stehen die Abkürzungen RME, AME, E5 und PEMFC?
- 1.10** Geben Sie die Reaktionsgleichungen für die Herstellung von Fettsäuremethylestern und Bioethanol an.
- 1.11** Welche Importe wurden in Brasilien durch den verstärkten Einsatz von Zuckerrohr für die Bioethanolerzeugung nötig?
- 1.12** Recherchieren Sie, welche Automobilhersteller „Wasserstoffautos“ oder „Brennstoffzellenautos“ anbieten, und vergleichen Sie die Anschaffungs- und Betriebskosten mit denen herkömmlicher Modelle.

2 Halogenkohlenwasserstoffe



Die Tatsache, dass in einem Zoo mit Nordseesprotten gefütterte Pinguine sich kaum mehr vermehrten und lieber gleichgeschlechtliche Paare bildeten, darf nicht zur Anekdote verkommen! Die Ursachen waren der hohe Gehalt an Halogenverbindungen (besonders PCB) in ihrer Nahrung und ein damit verbundener Rückgang der Spermienzahl und ein gestörter Sexualhormonhaushalt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Anwendungsgebiete, Vor- und Nachteile** der Halogenverbindungen nennen;
- den **Nutzen** und die **Folgen** des Einsatzes von Halogenverbindungen vergleichen;
- den **langfristigen Einfluss** von Halogenverbindungen auf Lebewesen und Umwelt erkennen und beurteilen;
- erklären, welche **Ersatzstoffe** infrage kommen.

Organische Halogenverbindungen, besser bekannt als **Halogenkohlenwasserstoffe**, kommen als Lösungs- und Extraktionsmittel, als Narkosemittel, als Pestizide und als Monomere bei der Kunststoffherstellung zum Einsatz. Die Verwendung als Treibgase und Schäummittel, als Kälte- und Feuerlöschmittel wurde verboten oder stark eingeschränkt. Ihre physikalischen und chemischen Eigenschaften machen sie neben einer ausgereiften Herstellungstechnik und einem vergleichsweise niedrigen Preis für diese unterschiedlichen Anwendungsgebiete geeignet.

Halogengerbindungen werden seit etwa 1930 hergestellt und sind in großtechnischen Prozessen sowohl als Zwischenprodukte bei Synthesen als auch als maßgeschneiderte Endstoffe im Einsatz. Die ökologische Langzeitwirkung dieser vergleichsweise jungen Produktgruppe ist Gegenstand zahlreicher Studien.

Die Moleküle sind sehr stabil und reagieren weder als Treibgas mit dem Füllgut in Druckbehältern noch als Treibmittel mit den zu schäumenden Kunststoffen.

Sie können nur schlecht abgebaut werden, sind somit langlebig und haben überdurchschnittlich lange Verweilzeiten in der Atmosphäre, in Wasser und Boden.

Als schwach polare Moleküle sind sie lipophil und werden daher als Lösungs- und Reinigungsmittel für Stoffe, die sich in Wasser nicht lösen, eingesetzt. Als Extraktionsmittel werden sie bei der Herstellung pflanzlicher Öle und Fette verwendet. Sie lösen hervorragend Fette, lösen sich aber ebenso gut in Fetten! Über tierische und pflanzliche Fette reichern sie sich in der Nahrungskette an.

Sie sind schwer bis gar nicht entflammbar und müssen durch Verbrennung bei höheren Temperaturen in Sondermüllverbrennungsanlagen umweltschonend entsorgt werden.

Die Toxizität bestimmter Halogenverbindungen macht sie gezielt als Pestizide gegen Unkräuter, Insekten und Pilze einsetzbar. Vergleichsweise geringe Mengen kumulieren in der Nahrungskette und erhöhen das Gefahrenpotenzial.

Halogengerbindungen haben ein hohes Potenzial, das Ozonmolekül zu zerstören. Internationale Abkommen, wie das **Protokoll von Montreal (1987)**, sollen langfristig die Reduzierung und schließlich die vollständige Abschaffung der Emission von Chemikalien, die das Ozon in der Stratosphäre zerstören, sicherstellen.

Halogenverbindungen als Kältemittel

Kältemittel transportieren Enthalpie (das heißt Wärmeenergie) vom Kühlgut zur Umgebung. Ihre große spezifische Verdampfungsenthalpie macht Halogenverbindungen für den Einsatz in Kühl- und Gefrierschränken sowie in Klimaanlagen geeignet.

Gekennzeichnet werden anorganische und organische Kältemittel nach DIN 8960 mit „R“ für die englische Bezeichnung „refrigerant“ und einer Zahlen- und Buchstabenkombination. Bekannte Handelsnamen sind **Frigen** und **Freon**.

| | |
|----------|--|
| R 22 | Chlordifluormethan, Frigen 22 |
| R 123 | 2,2-Dichlor-1,1,1-trifluorethan |
| R 1234YF | 2,3,3,3-Tetrafluorpropen |
| R 134 A | 1,1,1,2-Tetrafluorethan |
| R 401A | 53,0 % Chlordifluormethan, 13,0 % 1,1-Difluorethan, 34,0 % 2-Chlor-1,1,1,2-tetrafluorethan |
| R 402A | 38 % Chlordifluormethan, 2 % Propan, 60 % Pentafluorethan |
| R 404A | 44 % Pentafluorethan, 4 % 1,1,1,2-Tetrafluorethan, 52 % 1,1,1-Trifluorethan |



Ordnen Sie nebenstehende Argumente in solche, die für den Einsatz, und solche, die gegen den Einsatz sprechen.



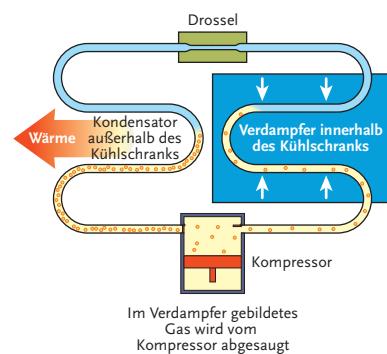
Mit welchen Fachbegriffen werden Schädlingsbekämpfungsmittel je nach Einsatzgebiet bezeichnet?



Pestizide siehe Kap. A, 3.



Ozonloch siehe NAWI I/II, Kap. E, 5.1.



Funktionsweise eines Kühlschranks: Im Inneren des Kühlschranks entnimmt das Kältemittel die notwendige Verdampfungswärme und strömt als Gas zum außenliegenden Kompressor. Dort wird es verdichtet und erwärmt sich dabei. Beim Durchlauf durch den Kondensator (schwarze Kühlschläuche an der Geräterückseite) wird die Wärme an die Umgebung abgegeben und das Kühlmittel kondensiert. Die Drossel dient der Druckabsenkung vor dem Einströmen in das Innere des Gerätes.



Benennung der Kältemittel



Mit dem Kühlschrankmodell „Greenfreeze“ kam 1991 erstmals ein Modell auf den Markt, das in zweifacher Hinsicht „ozonkillerfrei“ beworben werden konnte. Recherchieren Sie, welche Neuerungen dabei eingesetzt wurden und wie die marktführenden Hausgerätehersteller darauf reagierten.

In Österreich sind seit 1. Jänner 2010 der Verkauf und die Verwendung von R 22, R 401A, R 402A und R 123 verboten. Zur Instandhaltung und Wartung bereits existierender Kälte- und Klimaanlagen ist die Verwendung von wiederaufbereitetem R 22 und R 402A noch bis zum 31. Dezember 2014 erlaubt.

Als Alternativen bieten sich Propan, Butan, Pentan, Ammoniak und Kohlenstoffdioxid sowie die chlorfreien Kältemittel R 134A, R 1234YF oder R 404A an. Zu beachten ist, dass die ersten drei Substanzen feuergefährlich, Ammoniak und R 1234YF ätzend und giftig sind. R 134A zerstört Ozon zwar nicht, hat aber ein hohes Treibhausgaspotenzial!

Für Kühlschränke ist der Ersatz der halogenhaltigen Kältemittel technisch längst umgesetzt. Gewerbliche Kühlaggregate und veraltete Autoklimaanlagen enthalten nach wie vor „Ozonkiller“ – Halogenverbindungen.

Halogenverbindungen als Treibgase und Schäummittel

Der Einsatz als Treibgas in Spraydosen und als Treibmittel für Schaumstoffe setzt voraus, dass die verwendeten Verarbeitungshilfsmittel keine chemische Reaktion mit dem Inhalt des Behälters oder dem zu verschäumenden Stoff eingehen. Einige der bekanntesten **Treibgase** sind **FCKW** (Trichlorfluormethan, Dichlordinflor-methan), **Kohlenwasserstoffe** (Propan, Butan), **Dimethylether**, **Kohlenstoffdioxid**, **Stickstoff** und **Luft**. CO₂, N₂ und Luft werden auch in der Lebensmittelindustrie als Treib- und Schäummittel eingesetzt, um die Cremigkeit zu erhöhen.

Ozonschädliche FCKW-Treibmittel werden in Österreich in Sprühdosen seit Jahrzehnten nicht mehr verwendet. Auch als Schäummittel für Kunststoffe wurden sie vorwiegend durch gasförmige Alkane ersetzt. Aufgrund der **Langlebigkeit der Halogenverbindungen** werden die früher eingesetzten Halogenkohlenwasserstoffe aber noch Jahrzehntelang in der Stratosphäre ihre die Ozonschicht zerstörende Wirkung entfalten.



Welches Gefahrensymbol und welcher Sicherheitshinweis müssen auf einer Spraydose angebracht werden?

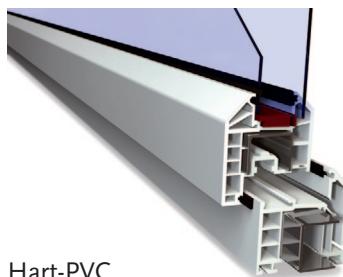


Halon 1301, Bromtrifluormethan, ist für die Verwendung in automatischen Löschanlagen in der Luftfahrt zugelassen

Feuerlöschmittel

Seit dem Jahr 2000 dürfen in Europa die als **Halone bezeichneten bromhaltigen Kohlenwasserstoffe** nur mehr für sogenannte kritische Anwendungen verwendet werden. Gemeint sind damit Feuerlöscher für Frachträume in Flugzeugen oder auf Flügen mitgeführte Handfeuerlöscher. Sowohl in der zivilen Luftfahrt (z. B. Airbus, Boeing), wie auch in der militärischen werden Halone als Lösungsmittel für Triebwerksschächte und Triebwerke eingesetzt.

Begründet wird dies damit, dass die Halone als chemisch wirkende Lösungsmittel mit bedeutend weniger Lösungsmittelvolumen auskommen als Inertgase und CO₂, die die Flamme ersticken. Dem Vorteil der Gewichtersparnis steht jedoch die im Vergleich zu CO₂ zum Teil überaus starke **Wirkung als Treibhausgas** und eine wahrscheinliche Zersetzung zu giftigen Folgeprodukten gegenüber.



Hart-PVC

Halogenhaltige Kunststoffe

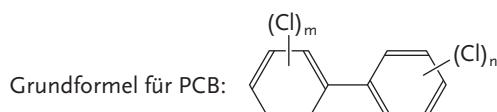
Polyvinylchlorid PVC

Vinylchlorid ist der unsystematische Name für Chlorethen H₂C=CHCl. Der durch Polymerisation daraus hergestellte Kunststoff Polyvinylchlorid (PVC) steht mit einem Produktionsvolumen von weltweit über 30 Millionen Jahrestonnen hinter Polyethylen (PE) und Polypropylen (PP) an dritter Stelle der Massenkunststoffe.

Das Monomer ist giftig und verursacht bei längerem Kontakt Haut- und Gelenksbeschwerden. Um die Vinylchloridbelastung gering zu halten, sind umfangreiche betriebstechnische und arbeitshygienische Maßnahmen notwendig. Beim **Verbrennen von PVC** bei zu niedrigen Temperaturen bilden sich neben Hydrogenchlorid (HCl) auch **hochgiftige Dioxine**. Aus diesem Grund wird PVC entweder stofflich recycelt oder in geeigneten Verbrennungsanlagen entsorgt.

Der harte Thermoplast PVC kommt als Hart-PVC für Platten, Rohre und Profile zum Einsatz. Um ihn als Weich-PVC für Bodenbeläge, Kabelummantelungen, Schläuche, Folien, Kinderspielzeug, Schuhsohlen und Kunstleder geeignet zu machen, müssen sogenannte **äußere Weichmacher** zugesetzt werden. Dabei wird der Weichmacher nicht kovalent in das Polymer eingebunden, sondern tritt nur über seine polaren Gruppen mit dem Polymer in Wechselwirkung und erhöht so die Kettenbeweglichkeit. Dafür werden neben Phthalaten (Phthalsäureester) auch polychlorierte Biphenyle (PCB) eingesetzt. Beide Weichmacherarten gelten als **entwicklungs- und reproduktionshemmend**. Sie stören den Hormonhaushalt und verringern die Anzahl der Spermien.

Äußere Weichmacher sind im Kunststoff nicht fest gebunden und können verdampfen, ausgewaschen oder abgerieben werden. Die **Verwendung** dieser Substanzen für Babyartikel und Kinderspielzeug ist **in der EU verboten** – allerdings wird die Mehrzahl des in der EU erhältlichen Spielzeugs importiert. In Österreich sind Phthalate und PCB in Lebensmittelverpackungen nicht zugelassen.



Weichmacher werden unter anderem auch in Dispersionen und Lacken, Dichtmassen, Klebstoffen, Kosmetika und Textilien verwendet.

PCB gelangen aus ausdampfenden PVC-Einrichtungsartikeln oder durch hohe Konzentrationen im Autoinnenraum (Neuwagengeruch) über die Atmung, über die Nahrung oder durch direkten Kontakt in den Körper.

Polytetrafluorethen PTFE

Die herausragenden Eigenschaften dieses Kunststoffes sind seine ausgezeichnete Chemikalienbeständigkeit, der sehr geringe Reibungskoeffizient und die extrem niedrige Oberflächenspannung. PTFE wird daher im Chemieanlagenbau, für Dichtungen und Beschichtungen verwendet. Die Schmelze ist hochviskos und depolymerisiert teilweise. Daher werden Beschichtungen so hergestellt, dass PTFE-Pulver aufgetragen und mithilfe einer Flamme gesintert wird (Plasmaspray-Verfahren).

Kritisch gesehen werden müssen bei PTFE sowohl die bei der Herstellung benötigten als auch die bei der Entsorgung (Verbrennung) entstehenden Fluorverbindungen. Neben deren kanzerogenen und toxischen Wirkung muss vor allem der **bioakkumulative Effekt in der Nahrungskette** beachtet werden!



Weich-PVC

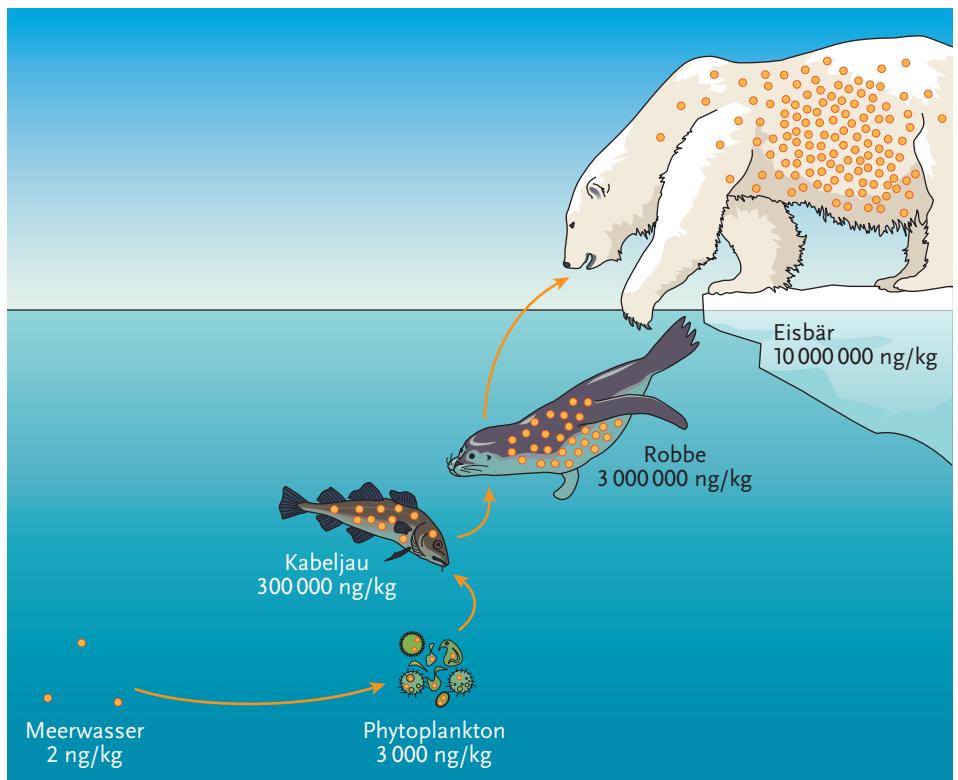


 **Getränkeflaschen** aus Kunststoff bestehen meist aus **PET (Polyethylenterephthalat)**. Für die Produktion von PET-Flaschen sind keine Phthalate oder PCB als Weichmacher erforderlich.



PTFE ist unter dem **Handelsnamen Teflon** vor allem als Beschichtungsmaterial für Bratpfannen bekannt

 Beim Überhitzen von Teflonbeschichtungen kann es zur Depolymerisation kommen!



Bioakkumulativer Effekt: Anreicherung von Schadstoffen in der arktischen Nahrungskette



Ziele erreicht? – „Halogenkohlenwasserstoffe“

- 2.01** Ordnen Sie den Eigenschaften der organischen Halogenverbindungen geeignete Einsatzgebiete zu.
- 2.02** Welchen Nachteil hat im Gegensatz zu halogenierten Kohlenwasserstoffen das natürliche Kältemittel Wasser?
- 2.03** Begründen Sie, warum bei Babyspielzeug besonderer Wert auf weichmacherfreie Produkte gelegt werden muss.
- 2.04** Zeichnen Sie eine Nahrungskette für den Thunfisch, die den bioakkumulativen Effekt von Schadstoffen zeigt.
- 2.05** Nennen Sie Produkte, die Weichmacher enthalten.
- 2.06** Recherchieren und begründen Sie den Einsatz von PTFE beim Manhattan-Projekt.
- 2.07** Recherchieren Sie das Funktionsprinzip von Gore-Tex-Kleidung.

3 Kunststoffe

„Kunst kommt von Können.“ So können auch die Kunststoffe sehr viel! Sie lassen sich je nach gewünschten Gebrauchseigenschaften modifizieren, sind in allen Farben und Formen erhältlich. Sie können wie traditionelle Werkstoffe verarbeitet werden und ersetzen diese auch in vielen Anwendungen – und das oft zu einem niedrigeren Preis. Ideal angepasst an unsere schnelllebige Konsumgesellschaft. Doch halt: Wird unsere Lebensweise nicht auch als „Wegwerfgesellschaft“ bezeichnet? Und können und sollen gerade die Kunststoffe weggeworfen werden?



Kunststoffe sortenrein der Entsorgung zuführen



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Anwendungsbereiche, Vor- und Nachteile** der Kunststoffe nennen;
- beispielhaft **Kunststoffe trennen** und sortenrein **der Entsorgung** zuführen;
- ein zeitlich und örtlich begrenztes **Konzept zur Vermeidung von Kunststoffabfällen** erstellen und anwenden.

Anwendungsbereiche

Kunststoffe finden sowohl in der Technik als auch in allen Wirtschaftszweigen und im täglichen Leben Verwendung. Durch die zahlreichen Möglichkeiten, den chemischen Aufbau zu verändern, verschiedene Additive zuzusetzen und die Verarbeitungsbedingungen zu wählen, lassen sich die Eigenschaften der Kunststoffe in weiten Grenzen verändern. Es sind wie bei keiner anderen Werkstoffgruppe die unterschiedlichsten Eigenschaftskombinationen erreichbar. Dazu kommen eine unerrechbar hohe Fertigungsgeschwindigkeit und eine weitgehend freie Gestaltung der Formen.

So können Kunststoffe sein:

- Fest und hart oder gummiartig weich bis klebrig
- 50-mal leichter als Wasser oder doppelt so schwer
- Elektrisch sehr gut isolierend oder elektrisch leitend gemacht
- Sowohl wärme- als auch kältedämmend
- Völlig glasklar durchsichtig oder völlig undurchsichtig
- Löslich in Wasser bzw. organischen Lösungsmitteln oder von keiner Chemikalie angreifbar
- Der Witterung ausgesetzt, über viele Jahrzehnte haltbar und gebrauchsfähig oder binnen weniger Wochen zerfallend
- Einfärbbar oder mit dekorativen Oberflächen versehen
- Als Thermoplaste über die Schmelze umformbar
- Allgemein haben Kunststoffe eine geringe Wärmebeständigkeit und sind zum Teil brennbar

Massenkunststoffe

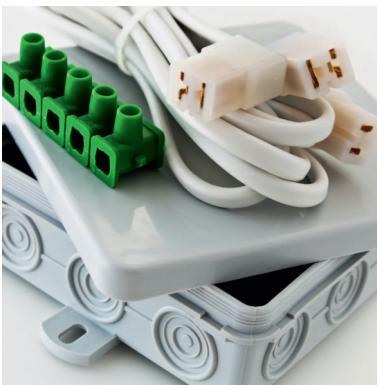
Mehr als die Hälfte der Kunststofferzeugung entfällt auf die vier **Thermoplaste Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyvinylchlorid (PVC) und Polystyrol (PS)**. Die daraus hergestellten Produkte sind überwiegend für den einmaligen Gebrauch bestimmt (z. B. Tragetaschen, Flaschen, Verpackungsfolien) oder werden mechanisch und thermisch nur vergleichsweise wenig beansprucht (z. B. Rohre, Bodenbeläge, Schaumstoffe).



Welche dieser Eigenschaften treffen auch auf Metalle, Glas und Keramik zu?



Massenkunststoffe



Technische Kunststoffe



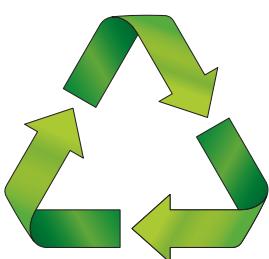
Spezialkunststoffe



Die aus gemischten Kunststoffabfällen herstellbaren Produkte genügen geringen Ansprüchen und sind meist in dunklen Farben erhältlich.



Komposter aus recyceltem Kunststoff



Allgemeines Recyclingsymbol

Technische Kunststoffe

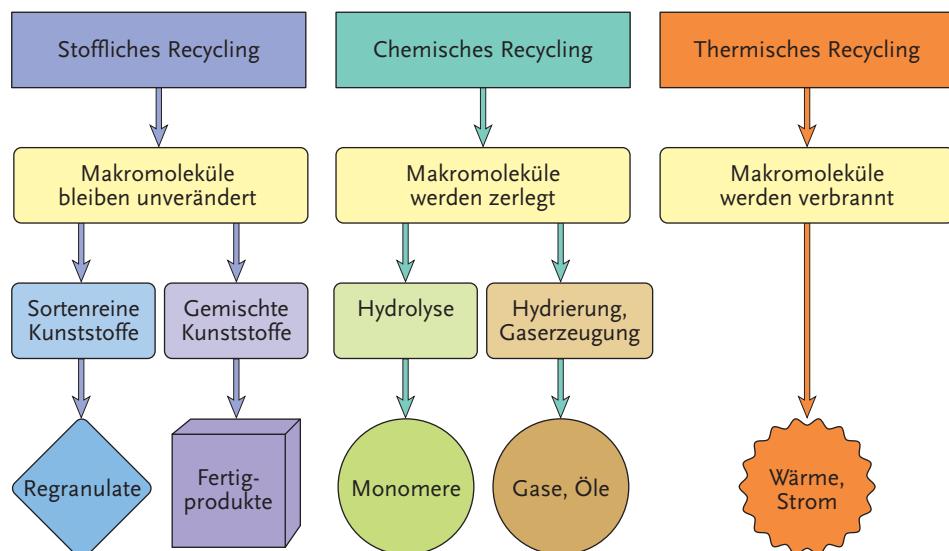
Wenn Kunststoffe als belastbare oder Kraft übertragende Teile verwendet werden, stellt man an sie besonders hohe Anforderungen: möglichst geringe Verformung bei lang andauernder Belastung auch bei höheren Temperaturen, gute Schlagzähigkeit, günstiges Gleit- und Abriebverhalten, kleine Wärmeausdehnung, geringe Schwindung. Zu den technischen Kunststoffen mit der geforderten guten Maßgenauigkeit und Maßhaltigkeit zählt man **Polyamide (PA)**, **Polyoximethylen (POM)**, **Polyphenylenoxid (PPO)**, **Polycarbonat (PC)**, **Polyethylenterephthalat (PETP)**, **Polybutylenterephthalat (PBTP)** und die **Duromeren**.

Spezialkunststoffe

Herausragende Eigenschaften machen bestimmte Kunststoffe zu Spezialisten. Bei **Polymethylmethacrylat (PMMA)** sind es die hervorragende Lichtdurchlässigkeit, Farblosigkeit und Lichtbeständigkeit, die den Einsatz in der Beleuchtungstechnik rechtfertigen. Hohe Temperatur- und Chemikalienbeständigkeit sind die Voraussetzung für die Auskleidung von Rohren und Ventilen, die für chemische Verfahren verwendet werden. Diesen Ansprüchen wird **Polytetrafluorethylen (PTFE)** gerecht, das auch über ausgezeichnete Gleit- und Reibegenschaften verfügt (antiadhäsive Beschaffenheit). Als hochtemperaturbeständige Kunststoffe werden **Polyimide (PI)** oder **Polyethersulfon (PES)** eingesetzt.

Recycling, Entsorgung, Abfallwirtschaft

Kunststoffe sind sowohl für stoffliches, chemisches als auch für thermisches Recycling geeignet:



Sortenreine, saubere **Regranulate** fallen in der Produktion in Form von Angüssen, Randbeschnitten und Stanzabfall an. Gebrauchte Kunststoffe aus dem Produktionskreislauf können sortenrein nur sehr aufwendig gesammelt werden. Die Kennzeichnung mit dem Kurzzeichen der Kunststoffsorte oder mit **Recyclingnummern** soll dem Konsumenten das Sortieren erleichtern.



07 des Recyclingcodes umfasst mit „O“ (OTHER) unter 01 bis 06 nicht erfasste Kunststoffe. Von 80 bis 100 sind die Nummern des Recyclingcodes für Verbundwerkstoffe reserviert: Mit 80 bis 85 gekennzeichnete Produkte enthalten Kunststoffe in Kombination mit Papier, solche mit 90 bis 92 sind Kunststoff-Metall-Verbundwerkstoffe.

Recycling von PET

In Österreich gelangen jährlich rund 40 000 t PET-Flaschen in den Handel, rund zwei Drittel davon werden recycelt. Zunächst werden die Kunststoffflaschen in einer Mühle zerkleinert, anschließend gewaschen und getrocknet. Die sogenannten Flakes werden mit Extrudern zu Granulat oder Fasern weiterverarbeitet. Einige österreichische Firmen bieten bereits Granulat aus wiederverwertetem PET an, das für Lebensmittelverpackungen zugelassen ist. Auch ein Bottle-to-Bottle-System wird umgesetzt. Der Großteil der in Europa gesammelten PET-Flaschen wird jedoch als Sekundärrohstoff nach China exportiert und dort zu Fasern verarbeitet. Die daraus hergestellten Textilien werden wieder nach Europa gebracht und hierzulande als Importware verkauft. Geringe Transport- und Produktionskosten und niedrige Umwelt- und Sozialstandards in China machen diesen Umweg rentabel und gebrauchtes PET zu einem Wirtschaftsfaktor.

Biokunststoffe

Im Hinblick auf Abfallvermeidung und die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen erscheinen **biologisch abbaubare Kunststoffe** sehr interessant. Nicht alle als Biokunststoffe bezeichneten und im Handel befindlichen Produkte erfüllen aber diese beiden Ansprüche. So gibt es sehr wohl auch biologisch abbaubare Kunststoffe auf Mineralölbasis und sogenannte **Wood-Plastic-Compounds (WPC)**, bei denen Holzmehl als biogener, nachwachsender Rohstoff mit herkömmlichen Kunststoffen wie PE, PP oder PVC vermischt und durch Extrusion verarbeitet wird.

Beim Produkt „**thermoplastische Stärke**“ handelt es sich um aus Kartoffeln, Mais oder Weizen hergestellte Stärke, die mit biologisch abbaubaren Polyestern, Polyesteramiden oder Polyvinylalkohol kombiniert wird. Letztere sind Wasser abweisend, während die Stärke selbst ein wenig wasserlöslich ist. Durch die Kombination erhält man einen wasserfesten Stärkekunststoff, der thermoplastisch z. B. zu Tragetaschen, Verpackungsfolien, Bechern und Blumentöpfen verarbeitet wird.

Polymilchsäure (Polylactid, PLA) entsteht durch Polymerisation von Lactid, einem zyklischen Diester der beiden Isomeren der Milchsäure. Aus PLA werden vor allem Verpackungsfolien hergestellt, auch Getränkebecher und Verpackungsschalen für Obst, Gemüse und Fleisch, hier dominiert jedoch nach wie vor PS.

Polyhydroxybuttersäure (PHB) ist ein Polyester und ähnelt in seinen Eigenschaften PP. Die Herstellung erfolgt mithilfe von Bakterien hauptsächlich aus Zucker und Stärke. Allerdings konkurriert die PHB-Herstellung aus Zucker mit der Nahrungsmittelindustrie und der Erzeugung von Biokraftstoffen!

Kunststoffdeponien

Weltweit gesehen landet gebrauchter Kunststoff mehrheitlich auf Deponien, auf angelegten und auf wilden – und in den Weltmeeren! Allerdings darf man sich hier keine großflächigen im Meer treibenden Müllteppiche vorstellen. Aus den Flüssen eingespülter oder von Schiffen auf offener See abgeladener Müll wird durch die Strömung relativ schnell in kleine Fetzen zerrissen und zerrieben. Durch diese



Recherchieren Sie, mit welchen Recyclingcodes Zeitungspapier, Aluminium, Baumwolle und grünes Glas versehen sind.



Fasern aus recyceltem PET gelangen als **Fleece** in den Handel und werden für Decken, Pullover oder Füllstoffe in Jacken verwendet



Recherchieren Sie unter www.pet2pet.at den Kreislauf von PET-Flaschen.



Unter **Biopolymeren** versteht man biogene Polymere, also von einer lebenden Zelle erzeugte Makromoleküle wie Cellulose, Fette oder Proteine.



Celluloseacetat siehe Kap. A, 8.1.



Lactid siehe Kap. A, 6.



Verpackung für Süßigkeiten aus Polymilchsäure (PLA)



Diskutieren Sie fächerübergreifend, warum in welchen Regionen der Weltmeere Müllstrudel anzutreffen sind.



Mülldeponie als Arbeitsplatz und „Lebensraum“?

feine Verteilung und Pulverisierung wird der Kunststoffabfall jedoch leicht von den Meeresbewohnern als vermeintliche Nahrung aufgenommen. So reichern sich aber nicht nur die **Plastikpartikel**, sondern, was noch viel problematischer ist, die **Kunststoffadditive in der Nahrungskette** an.

Da der Restmüll der Industrieländer und der Großstädte aller Kontinente neben Kunststoffen weitere verwertbare Komponenten enthält, ist er in den letzten Jahren mehr und mehr zur Lebensgrundlage der „**Müllmenschen**“ nicht nur in den Entwicklungsländern geworden. Erwachsene, vor allem aber auch Kinder leben von und in dem Müll, den sie sammeln, sortieren und verkaufen. Fehlende Hygiene, verschmutztes Wasser, die Belastung durch giftige Schwermetalle und ungeschützter Umgang mit ätzenden oder gesundheitsschädlichen Chemikalienresten kennzeichnen die Lebensbedingungen. Auf den Müllhalden setzen Schwellbrände toxische Gase frei. Elektrogeräte werden per Hand zerlegt, um an die Metalle im Inneren zu gelangen. Die Gesetze der EU verbieten den Müllexport, gestatten aber die Ausfuhr von vermeintlich wiederverwertbaren Secondhandwaren.



Ziele erreicht? – „Kunststoffe“

 Kunststoffanalytik siehe Kap. A, 8.4.



Verpackungsflocken aus PS



Verpackungsflocken aus Stärke

- 3.01 Nennen Sie Beispiele für Massen-, technische und Spezialkunststoffe und ihre Anwendungsgebiete.
- 3.02 Begründen Sie, warum Fertigprodukte aus regranulierten gemischten Kunststoffen geringen mechanischen Ansprüchen genügen und meist in dunklen Farben gehalten sind.
- 3.03 Sortieren Sie mitgebrachte Kunststoffteile mithilfe der Recyclingcodes.
- 3.04 Analysieren Sie mithilfe der Schwimmprobe, welche mitgebrachte Kunststoffverpackungen aus PE oder PP hergestellt wurden. Stellen Sie mit der Ritzprobe fest, bei welchen Teilen es sich um PP, LDPE oder HDPE handelt.
- 3.05 Untersuchen Sie mithilfe der Beilsteinprobe, ob sich unter mitgebrachten Kunststoffabfällen auch Teile aus PVC befinden.
- 3.06 Stellen Sie anhand der Kennzeichnung fest, ob sich unter von Ihnen gesammelten Verpackungsfolien für Süßwaren und Obst auch solche aus PLA befinden.
- 3.07 Schlagen Sie eine einfache Untersuchung vor, wie Verpackungsflocken aus PS von solchen aus thermoplastischer Stärke unterschieden werden können.
- 3.08 Argumentieren Sie, welche Vorteile für Getränkeverpackungen aus Kunststoff sprechen und welche Vorteile Glasflaschen aufweisen. Berücksichtigen Sie dabei besonders das Pfandsystem bei Mehrwegflaschen.
- 3.09 Recherchieren Sie, welche Getränke in einem Lebensmittelmarkt Ihrer Wahl in Kunststoffflaschen und welche in Glasflaschen erhältlich sind. Finden Sie dabei für ein und dasselbe Produkt beide Verpackungsarten?
- 3.10 Erheben Sie, wie viele der Pausengetränke in Einweg-PET-Flaschen abgefüllt sind, und schlagen Sie praktikable Alternativen vor.
- 3.11 Recherchieren Sie über den Zeitraum einer Woche, wie viele Kunststofftragetaschen bei Einkäufen Ihrer Mitschüler/innen und deren Familien angefallen sind. Erstellen Sie eine Statistik, wie viele dieser Tragetaschen gratis waren und wie viele von vornherein nur für den einmaligen Gebrauch (Obstsackerl) bestimmt waren. Schlagen Sie Strategien zur Reduktion des Kunststoffverbrauches in diesem Bereich vor.

- 3.12** Stellen Sie durch eine Umfrage fest, wie oft Tragetaschen aus Papier und Textilien verwendet werden. Sammeln Sie Argumente pro und kontra Kunststofftragetaschen. Recherchieren Sie, in welchen Ländern Kunststofftragetaschen verboten sind.
- 3.13** Erstellen Sie ein praktikables Konzept zur Vermeidung von Kunststoffabfällen in Ihrer Klasse, wobei Sie den Schwerpunkt beispielsweise auf Verpackungen legen.
- 3.14** Recherchieren Sie, ob Sie und Ihre Mitschüler/innen Produkte aus recycelten Kunststoffen oder Kunststoffmehrwegverpackungen verwenden.
- 3.15** Im Verpackungssektor wurde 1978 der Slogan „Jute statt Plastik!“ propagiert. Recherchieren Sie, warum diese pflanzliche Faser in diesem Bereich nicht mehr verwendet wird.
- 3.16** Recherchieren Sie unter www.ara.at unter „Sammlung und Verwertung in Zahlen“ wie viel an Leichtverpackungen, Papier, Glas und Metall in Ihrem Bundesland pro Kopf gesammelt wird.

4 Suchtmittel und Gesellschaft

„Eifersucht ist eine Leidenschaft, die mit Eifer sucht, was Leiden schafft!“ Ein netter Spruch, ein banaler Reim? Wie treffend hier der Volksmund das Thema Sucht auf den Punkt bringt, ist erstaunlich: Das ejfrige Suchen, etwas immer wieder zu tun, von dem man weiß, dass es einem nicht guttut, dass es einen leiden lässt. Und die Erinnerung daran, dass man selber schon ... aber nur ein „bissel“ und „war dann eh schnell wieder vorbei“, lässt manche sogar schmunzeln. Was, wenn es nicht vorbeigeht und krankhaft wird?



Die **Weltgesundheitsorganisation** (World Health Organization, WHO) definiert **Gesundheit** als „einen Zustand vollständigen körperlichen, geistigen und sozialen Wohlbefindens und daher weit mehr als die bloße Abwesenheit von Krankheit oder Gebrechen“.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den **Begriff Sucht** definieren und zwischen stoffgebundenen und stoffungebundenen Süchten unterscheiden;
- die **Wirkungsweise von Alkohol und Nicotin** nennen;
- das **Gefahrenpotenzial von Alkohol und Nicotin** einschätzen;
- den **Umgang mit Alkohol** in verschiedenen Gesellschaftsformen beschreiben und vergleichen;
- aktuelle Berichte über das **Suchtverhalten Jugendlicher** analysieren und aus fachlicher Sicht bewerten.

Den Begriff „Sucht“ auf körperliche, substanzgebundene Abhängigkeit, etwa von Alkohol oder Nicotin, einzuschränken, ist ebenso unzutreffend, wie Suchtverhalten mit schlechten Gewohnheit oder problematischen Verhaltensweisen gleichzusetzen.



Diskutieren Sie auch fächerübergreifend folgende **Suchtmerkmale**:

Einengung des Verhaltensraums:

Der größte Teil des Tageszeitbudgets wird für eine bestimmte Tätigkeit genutzt.

Kontrollverlust: Unfähigkeit, Umfang und Dauer des Verhaltens zu bestimmen.

Sucht hat Krankheitscharakter. Dabei wird das zugrunde liegende Problemverhalten zu einem eigendynamischen, zwanghaften Verhalten.

Körperliche Abhängigkeit kann durch medizinische Behandlung in relativ kurzer Zeit bewältigt werden. **Psychische Abhängigkeit** entwickelt sich sowohl bei den substanzgebundenen als auch bei den stoffungebundenen Verhaltenssüchten. Sie ist im Gegensatz zur körperlichen Abhängigkeit schwieriger zu überwinden und anhaltender.

Abstinenzunfähigkeit: Es wird subjektiv als unmöglich erlebt, kürzere oder längere Zeit bestimmte Stoffe nicht zu konsumieren oder eine bestimmte Tätigkeit nicht auszuführen.

Auftreten von Entzugserscheinungen bei gewollter oder erzwungener Abstinenz.

Toleranzentwicklung: Zur Erreichung angestrebter Gefühlslagen oder Bewusstseinszustände muss die Dosis gesteigert werden.

Negative soziale Konsequenzen: Soziale Beziehungen werden vernachlässigt oder gestört, Verringerung der Arbeitsleistung, Verheimlichung oder Bagatellisierung der Abhängigkeit.

 Siehe auch Kap. A, 11
Pharmazeutika – Drogen –
Doping.

 Herstellung siehe Kap. A, 1.4
und B, 4.2.1.

 Frauen haben einen geringeren Körperwasseranteil als Männer, so dass die Blutalkoholkonzentration schneller ansteigt.

 Enzyme siehe Kap. B, 3.1.

Sucht und Suchtverhalten



Mehrfachabhängigkeit ist ein schwieriges medizinisches Problem, da der Entzug wesentlich komplizierter verläuft.

Gefahrenpotenzial psychoaktiver Substanzen:

- Lebensgefahr (z. B. durch Überdosierung)
- Gefahr von Organschäden
- Gefahr der Abhängigkeit
- Gefahr des Eintretens anderer psychischer Wirkungen (z. B. Freisetzung von Aggressivität, Psychosen)
- Gefahr für Dritte (z. B. Rauchen während der Schwangerschaft, Alkohol im Straßenverkehr)

Alkohol – Wirkung und Folgen

Aufnahme und Abbau

Überwiegend gelangt Alkohol über die Schleimhäute des Dünndarms in den Blutkreislauf, nur ein kleiner Teil über den Magen. Wie viel Alkohol vom Körper aufgenommen wird, hängt von der Alkoholmenge, der Trinkgeschwindigkeit, dem Körpergewicht und dem Geschlecht ab.

Berechnung der Blutalkoholkonzentration (BAK) nach Widmark:

$$\text{BAK in \%} = \frac{m \text{ (Ethanol in g)}}{m \text{ (Körpergewicht in kg)} \cdot x}$$

Reduktionsfaktor x: $x_{\text{Männer}} = 0,70$ $x_{\text{Frauen}} = x_{\text{Jugendliche}} = 0,60$

Eine 0,5 L-Flasche Bier mit 5 Vol.-% enthält rund 20 g Alkohol:

$$V = 500 \text{ mL} \cdot 0,05 = 25 \text{ mL} \quad \rho = 0,8 \text{ kg/L} \quad m = \rho \cdot V = \frac{800 \text{ g}}{\text{L}} \cdot 0,025 \text{ L} = 20 \text{ g}$$

$$\text{Ein } 80 \text{ kg schwerer Mann hat somit eine BAK von } \frac{20 \text{ g}}{80 \text{ kg} \cdot 0,7} = \frac{20 \text{ g}}{56 \text{ kg}} \approx 0,36 \text{ \%}$$

Der dreistufige Abbau erfolgt bis zu 95 % in der Leber und dort hauptsächlich durch das Enzym Alkoholdehydrogenase, ADH. Ethanol wird mit ADH in Ethanal umgewandelt, das für den Körper wenig verträglich ist und die sogenannten Katersymptome (Kopfschmerzen, Unwohlsein) hervorruft. Im zweiten Schritt wird Ethanal enzymatisch mit Aldehyddehydrogenase (ALDH) in Essigsäure umgewandelt, die der Körper im dritten Schritt mit einer Reihe von Enzymen zu Kohlenstoffdioxid

und Wasser aufspaltet. Die **Abbaugeschwindigkeit** beträgt konstant zwischen 0,1 und 0,2 Promille pro Stunde und ist nicht durch Nahrungsmittel, Kaffee oder Medikamente beeinflussbar. Etwa 5 % des aufgenommenen Alkohols werden nicht verstoffwechselt, sondern über Urin, Atem und Schweiß direkt ausgeschieden.

Wirkung

Alkohol verteilt sich über die Blutbahn im ganzen Körper und erreicht schon nach wenigen Minuten das Gehirn. Dort wird eine Reihe von Transmittersystemen beeinflusst, unter anderem wird Dopamin freigesetzt. Dieser **Neurotransmitter** spielt für das Belohnungssystem im Gehirn eine wichtige Rolle. Gleichzeitig wird die hemmende Wirkung des Neurotransmitters GABA verstärkt. Dadurch wird Angst gelindert und der Körper wird beruhigt. Die Gefäße werden erweitert, dadurch wird die periphere Durchblutung verbessert. Man hat das Gefühl, dass Alkohol wärmt, tatsächlich strahlt der Körper mehr Wärme ab – was in Einzelfällen zum Erfrieren führen kann.

Die individuell gespürte Wirkung von Alkohol hängt in erster Linie von der Menge ab, aber auch von der körperlichen und seelischen Verfassung sowie der Gewöhnung. Bei identischer Blutalkoholkonzentration kann der Rauschzustand daher variieren. In geringen Mengen hat Alkohol typischerweise eine enthemmende Wirkung. Die Stimmung verbessert sich und die Kontaktfreudigkeit nimmt meist zu. Größere Mengen Alkohol führen jedoch zu massiven Wahrnehmungs- und Aufmerksamkeitsstörungen. Die Koordinationsfähigkeit und Sprache werden zunehmend beeinträchtigt. Schließlich stellen sich Müdigkeit und Benommenheit ein, die bei großen Mengen Alkohol in Bewusstlosigkeit mündet.

| Akute Risiken bei übermäßigem Alkoholkonsum | | |
|--|---|--|
| Risikobereitschaft | Sexualverhalten | Aggression |
| Das räumliche Sehen und die Orientierung verschlechtern sich, die Reaktionsfähigkeit wird erheblich gestört. Die Leichtsinnigkeit steigt, während das Urteilsvermögen herabgesetzt wird. Neben Stürzen kommt es besonders im Straßenverkehr zu meist schwerwiegenden, häufig auch zu tödlichen Unfällen. | Die Neigung zu leichtsinnigen Verhaltensweisen erleichtert sexuelle Kontakte, die hinterher bereut werden. Häufig wird beim Sex unter Alkoholeinfluss auf die Verhütung vergessen. Ungewollte Schwangerschaften und die Ansteckung mit sexuell übertragbaren Krankheiten können die Folge sein. | Aufgrund der enthemmenden Wirkung neigen manche Menschen unter dem Einfluss von Alkohol zu aggressivem Verhalten und Gewalt. Alkoholisierte Personen sind jedoch nicht nur Täter, sondern werden auch leicht Opfer von Gewalt, da sie sich unter Alkoholeinfluss nur schlecht wehren können. |

Langzeitfolgen

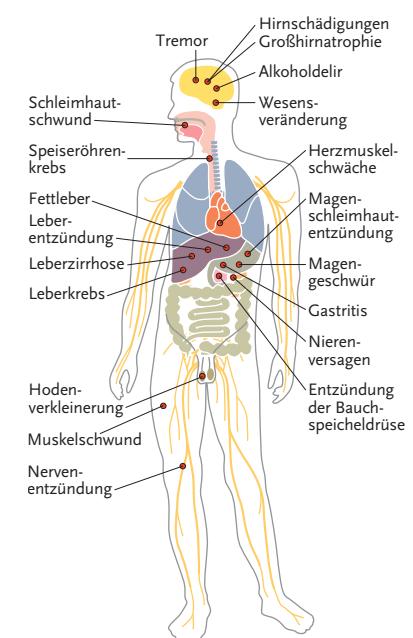
Bei regelmäßIGem Alkoholkonsum sind körperliche Schäden die Regel. Da Alkohol den Körperzellen Wasser entzieht, können alle Organe irreversibel geschädigt werden.

Durch Störungen im Nervensystem kann der Tastsinn an den Händen beeinträchtigt werden. Meist durch das Absterben von Zellen des Kleinhirns bedingt, können Lähmungen der Beine und Gangunsicherheit auftreten. Gedächtnisleistungen und die Fähigkeit zur Konzentration lassen nach. Es kann zu wahnhaften und psychosomatischen Zuständen kommen, beispielsweise zu Eifersuchtswahn oder Verfolgungswahn.

Neurotransmitter sind körpereigene biochemische Botenstoffe, die Informationen von einer Nervenzelle zur anderen über die Kontaktstelle der Nervenzellen, die Synapse, weitergeben.



Die extreme Form des Rauschtrinkens wird umgangssprachlich auch als **Komasaufen** bezeichnet. Damit wird aber auch eine drohende Gefahr des exzessiven Alkoholmissbrauchs bereits genannt: Ab einer Blutalkoholkonzentration von etwa 3 Promille droht Bewusstlosigkeit! Der Körper unterkühlt sehr schnell und Schutzreflexe werden ausgeschaltet. Schließlich kann sich ein lebensgefährlicher Atemstillstand einstellen, wenn nicht umgehend Notfallmaßnahmen eingeleitet werden.



Gesundheitliche Folgen von regelmäßIGem Alkoholmissbrauch



Recherchieren Sie die Quelle [1], die ethischen Prinzipien zum Umgang mit Alkohol aus der **Europäischen Charta Alkohol**, der beide gekennzeichneten Zitate entnommen wurden.



Die **Prohibition** in den USA verbot die Herstellung, den Verkauf und den Konsum von Alkohol in den Jahren 1919 bis 1933.



Der Umgang mit Alkohol wird in Österreich im **Jugendschutzgesetz** und in der **Straßenverkehrsordnung** geregelt. Während die StVO bundesweit einheitlich gilt, gibt es für Jugendliche in den einzelnen Bundesländern unterschiedliche Regelungen.



Informieren Sie sich über die Gesetze, die für Ihre Altersgruppe in den unterschiedlichen Bundesländern gelten.

Bei Ausbildung einer Fettleber und anschließender nicht rückbildungsfähiger Zirrhose wird die Leber hart und kann den Körper nicht mehr entgiften. Als Folge zunehmender Vergiftung sterben weitere Hirnzellen ab und das Blut, das schwerer durch die Leber kommt, wird z. B. über die Speiseröhre umgeleitet. Diese Gefäße sind empfindlich und können platzen – durch plötzlich auftretende Blutungen in der Speiseröhre kann der Tod eintreten. Das Krebsrisiko ist drastisch erhöht.

Als Krankheit bedarf Alkoholismus stets einer ärztlichen Behandlung!

Alle alkoholgefährdeten oder alkoholgeschädigten Menschen und ihre Familienangehörigen haben ein Recht auf Zugang zu Therapie und Betreuung [1]. Alle Menschen, die keinen Alkohol trinken möchten oder die aus gesundheitlichen oder anderen Gründen keinen Alkohol trinken dürfen, haben ein Recht darauf, keinem Druck zum Alkoholkonsum ausgesetzt und in ihrem abstinenteren Verhalten bestärkt zu werden [1].

Alkohol in verschiedenen Gesellschaftsformen

Alkohol dient in verschiedenen Kulturräumen seit Jahrtausenden als Nahrungs-, Genuss-, Sucht-, Rausch- und Arzneimittel und erlangte auch als sakrals Mittel Bedeutung. Seine Funktionen und seine Bedeutung variierten in verschiedenen Zeiten und unterschiedlichen Bevölkerungsschichten.

Man kann vier Umgangsformen finden:

- **Abstinenzkulturen:** Alkoholkonsum ist untersagt. Dies trifft gegenwärtig auf einige streng islamische Länder zu.
- **Ambivalenzkulturen:** Zeitlich und regional beschränkt wird Alkoholkonsum toleriert. Starke gesellschaftliche Gruppen versuchen, den Zugang zum Alkohol möglichst einzuschränken.
- **Permissivkulturen:** Der Alkoholgenuss ist erlaubt, Trunkenheit und exzessive Formen des Alkoholkonsums werden aber abgelehnt.
- **Permissiv-funktionsgestörte Kulturen:** Nicht nur das Alkoholtrinken, sondern auch der Exzess wird gebilligt.

Skandinavische Länder zeigen infolge der europäischen Einigung einen Übergang von einer Ambivalenzkultur zu einer Permissivkultur.

Österreich liegt wie andere mitteleuropäische Länder zwischen den permissiven und den permissiv-funktionsgestörten Kulturen: Als ein nicht wegzudenkender Bestandteil vieler gesellschaftlicher Anlässe und Gebräuche wird Alkoholgenuss kaum beschränkt. Bei bestimmten Gelegenheiten wird auch Trunkenheit von großen Bevölkerungsteilen akzeptiert. Erstaunlich ist, dass, wer sich nach geringem Alkoholkonsum auffällig verhält, eher geächtet wird als jemand, der sich nach exzessivem Alkoholgenuss noch kontrolliert zeigt und zu benehmen weiß. So wird in vielen Fällen Alkoholmissbrauch an den Verhaltensweisen und nicht am tatsächlichen Konsum oder an seinen gesundheitlichen Auswirkungen gemessen!

Nicotin – Wirkung und Folgen

Die ursprünglich aus Amerika stammende Tabakpflanze wurde im 16. Jahrhundert vom Franzosen **Jean Nicot** als angebliche Heilpflanze nach Europa gebracht. Nach ihm wurde der Hauptwirkstoff Nicotin benannt, ein starkes Nervengift, das die Pflanze zur Abwehr von Schädlingen produziert.

Die einjährigen Pflanzen werden hauptsächlich in China (allerdings nicht für den Export), in Indien, Brasilien und den USA in Monokulturen mit hohem Einsatz von Fungiziden und Pestiziden angebaut. In Europa ist der Tabakanbau rückläufig, in Österreich wurde der kommerzielle Anbau 2006 eingestellt.



In Form von Zigaretten konsumiert wird Tabak ab der Mitte des 19. Jahrhunderts. Zuvor waren die Zigarre und die Pfeife, Schnupftabak und Kautabak üblich.

Nicotin ist als Alkaloid basisch wirkend, bei Raumtemperatur flüssig und sehr giftig. Die LD_{50} (oral, Ratte) beträgt 50 mg/kg. Der Nicotingehalt, der pro Zigarette inhaliert wird, muss auf der Packung angegeben werden und liegt bei einer starken Zigarette im Bereich von etwa 0,9 mg.

Über den alkalischen Rauch löst sich Nicotin bereits im Mund im Speichel auf und gelangt von dort und über die Lungenbläschen ins Blut. In weniger als zehn Sekunden erreicht es das Gehirn. Dort setzt es zahlreiche Neurotransmitter wie Dopamin, Serotonin und Noradrenalin mit unterschiedlichen Wirkungen auf das psychische und körperliche Befinden frei. Zu den **Nicotineffekten** gehören Beruhigung, aber auch Stimulierung sowie eine Steigerung der Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistung, Stimmungsaufhellung, Angst-, Stress-, Schmerz- und Appetithemmung. Zusätzlich wird der Herzrhythmus beschleunigt, der Blutdruck erhöht und die Gefäße werden verengt. Die Wirkung von Nicotin hält nur wenige Minuten an. Der **Abbau** erfolgt in der **Leber**, die **Ausscheidung** über den **Urin**.

Nicotin zählt zu den stärksten Sucht erzeugenden und erhaltenden Substanzen. Nicotinabhängigkeit erfüllt die Kriterien der Substanzabhängigkeit wie zwanghaften Konsum, wiederkehrendes zwanghaftes Verlangen, Toleranzentwicklung, Entzugserscheinungen und Gebrauch trotz erkannter Gesundheitsschädlichkeit.

Sie war lange Zeit gesellschaftlich akzeptiert, weil Abhängige keinen konsumbedingten Persönlichkeitszerfall oder negative soziale Auffälligkeiten zeigen. Schwindel, Übelkeit, Harndrang, Magenbeschwerden sind die akuten Risiken, als Langzeitfolgen gelten erhöhtes Krebsrisiko, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Komplikationen in der Schwangerschaft. Die Fruchtbarkeit von rauchenden Frauen und vermutlich auch die Qualität der Spermien von rauchenden Männern sind herabgesetzt.

Da Nicotin nicht isoliert konsumiert wird, muss in weiterer Folge das **Tabakrauchen** als **Suchtverhalten** und schwerwiegendes Gesundheitsrisiko betrachtet werden.

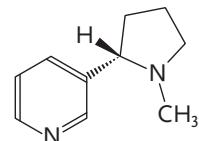
Nicotin erzeugt eine körperliche Abhängigkeit, das Tabakrauchen macht jedoch in hohem Maße auch psychisch abhängig!

1964 erschien in den USA der „Terry Report“, der die Schädlichkeit des Tabakrauchens, besonders das erhöhte Lungenkrebsrisiko, dokumentierte. Zigarettenhersteller versuchten durch eine Reduktion des Teergehaltes in Zigaretten und die verstärkte Vermarktung der Filterzigaretten die Kritik am Rauchen zu entschärfen. Den kausalen Zusammenhang zwischen Rauchen und der Entstehung von Krebs sowie die Sucht erzeugende Wirkung von Nicotin bestritten sie weiterhin. 1996 veröffentlichte die Weltgesundheitsorganisation (WHO) einen ersten Weltbericht über die Epidemie des Rauchens, der wiederum eindringlich auf die Gefahren aufmerksam machte.

Ausgehend von Amerika, entwickelte sich ein verstärktes Problembewusstsein, der Nicotinkonsum in bestimmten Bevölkerungsgruppen und besonders in den letzten Jahren im öffentlichen Bereich ging zurück. Die **Europäische Union** beschloss 2003 eine **Richtlinie**, die ein **weitgehendes Werbeverbot für Tabak** sowohl in allen Printmedien als auch im Internet vorsieht.

Neben Tabak enthält eine Zigarette auch Rückstände aus der Produktion (Herbizide, Pestizide), Verarbeitungshilfsmittel (Feuchtigkeitshalter), Zusatzstoffe, die das Einatmen erleichtern, den Geschmack verändern (Zucker, Honig, Kakao u. a. m.)

Aus getrocknetem Rohtabak wird durch Fermentieren gebrauchsreifer Tabak hergestellt. Bei diesem natürlichen Gärungsprozess wird einige Monate lang bei etwa 50 °C der Nicotingehalt vermindert und blatt eigene Eiweißverbindungen werden abgebaut.



Nicotinformel



! Ein geringer Nicotingehalt einer Zigarette wird vom Raucher durch verstärktes Inhalieren kompensiert.

! Diskutieren Sie, wo und wie in Österreich Nichtraucher verstärkt geschützt werden.

! Gebildete Schichten wenden sich vom Rauchen ab. Mittlerweile rauchen statistisch gesehen eher Personen mit niedrigerem Intelligenzquotienten.



Zigaretten zu essen kann wegen des Nicotingehalts tödlich sein! Achten Sie daher besonders auf den Schutz von Kleinkinder!



Es gilt als erwiesen, dass die krebsauslösende und -fördernde Wirkung des Rauchens vor allem von den Inhaltsstoffen des Teers ausgeht.



Als **COPD** bezeichnet man eine umgangssprachlich „Rauherhusten“ genannte Lungenerkrankung (englisch: chronic obstructive pulmonary disease).



oder die Reizwirkung mildern sollen. Die Ungiftigkeit jedes Zusatzstoffes als Nahrungsmittel muss geprüft werden, nicht jedoch seine Wirkung, wenn er bei etwa 900 Grad verbrennt oder sich zersetzt!

Der Rauch, der durch das Ziehen an der Zigarette entsteht, ist ein Gemisch aus Tausenden unterschiedlichen Stoffen, die beim Verbrennen, Verglimmen und Verglühen entstehen.

Die Gesamtmenge der darin enthaltenen mikroskopisch kleinen Partikel (ohne deren Wasseranteil und ohne Nicotin) wird als Kondensat oder **Teer** bezeichnet und muss auf der Zigarettenpackung ersichtlich sein.

Der klebrige Teer enthält u. a. Schwermetalle, Methanol und verschiedene Aromaten. Er setzt sich beim Rauchen in den Atemwegen und der Lunge fest, geht in den Blutkreislauf über und lagert sich in zahlreichen Organen ab.

Außer dem Kondensat enthält der Rauch auch gasförmige Schadstoffe wie beispielsweise Kohlenstoffmonooxid, Formaldehyd, Blausäure, Aceton und Ammoniak. Der Gehalt an Kohlenstoffmonooxid im Rauch einer Zigarette muss ebenfalls auf der Packung ersichtlich sein. CO ist ein Atemgift und führt zu Sauerstoffmangel im Blut, da es in den roten Blutkörperchen jene Stellen besetzt, die für den Sauerstoff vorgesehen sind. Das hat zur Folge, dass sämtliche Gewebe und Organe ungenügend mit dem lebenswichtigen Sauerstoff versorgt werden.

Die im Tabakrauch enthaltenen Reizgase lähmen die Flimmerhärchen, mit denen die Atemwege zur Selbstreinigung ausgestattet sind. Um sich dennoch gegen die Schmutzpartikel zur Wehr zu setzen, bildet der Körper Schleim. Beim gewohnheitsmäßigen Rauchen kann der zähe Schleim im späteren Stadium oftmals nur mühsam abgehustet werden und ist ein Nährboden für Bakterien und Viren.

Im Zigarettenrauch ist auch der **α -Strahler ^{210}Po** enthalten. Diese **radioaktive Belastung** erhöht sowohl bei Rauchern als auch bei Passivrauchern die **Krebsgefahr!**

Der lange Zeit als Genussmittel angesehene Tabak wird heute in der Gesellschaft vorwiegend als Suchtmittel betrachtet. Auch die **Gefahren des Passivrauchens** wurden erkannt.

Präventionsmaßnahmen sollen den Tabakkonsum verhindern, Rauchende zum Ausstieg motivieren, Kindern und Jugendlichen das Aufwachsen in einer rauchfreien Umgebung ermöglichen und Nichtrauchende vor dem Passivrauchen schützen.



Ziele erreicht? – „Suchtmittel und Gesellschaft“

- 4.01** Ordnen Sie folgende Begriffe unter „stoffgebundene“ und „stoffungebundene“ Süchte ein: Arbeitssucht, Alkoholabhängigkeit, Internetsucht, Sexsucht, Drogenabhängigkeit, Essstörungen, Medikamentenabhängigkeit, Spielsucht.
- 4.02** Begründen Sie, warum es sich bei der Kaufsucht um eine stoffungebundene Abhängigkeit handelt, obwohl dabei „Stoff“ (Waren aller Art) und „Konsum“ kennzeichnend sind.
- 4.03** Beschreiben Sie mithilfe der Suchtmerkmale den Tagesablauf eines Schülers/einer Schülerin, der/die seine/ihre Spielsucht im Internet auslebt.



Alkohol und Nicotin sind in Österreich **legale Drogen**. Die Herstellung, der Vertrieb und der Verkauf von alkoholischen Getränken und Tabakwaren ist ein bedeutender österreichischer Wirtschaftszweig. Beide Produkte sind öffentlich käuflich erhältlich und werden somit besteuert. Ab welchem Alter ihr Erwerb und Konsum erlaubt sind, ist gesetzlich geregelt.



Illegal Drogen, psychotrope Substanzen und deren Vorläuferstoffe fallen unter das Bundesgesetz über Suchtgifte. Es regelt den Verkehr und den Umgang mit Suchtmitteln und enthält die entsprechenden Strafbestimmungen.



Informieren Sie sich über Angebote der Suchtprävention und Ansprechpartner sowohl im schulischen als auch im außerschulischen Bereich.



Diskutieren Sie auch fächerübergreifend Maßnahmen, Ideen und Fragen zur Suchtprävention.



Wohlstandsbauch?



Diskutierten Sie, ob ausschließlich Überernährung im Sinne von „zu große Portionen essen“ zu Übergewicht führt.

5 Lebensmittel

Lebensmittel sind die Mittel zum Leben! Während sie in den industrialisierten Staaten der nördlichen Hemisphäre im Überschuss vorhanden sind, herrschen in vielen Ländern der südlichen Hemisphäre Nahrungsmangel und Hungersnot. Um Ackerland für die Produktion von Lebensmitteln zu sichern, wurden und werden Kriege geführt. Der Einsatz von Weizen, Mais und Zuckerrohr zur Produktion von Treibstoffen – Vom Acker in den Tank – führt zu einem zusätzlichen Konfliktpotenzial. Ein vielfältiges und weit über die Grundversorgung der Bevölkerung hinausgehendes Lebensmittelangebot verleitet zu falscher und einseitiger Ernährung. Die Folgen sind Übergewicht und davon verursachte Civilisationskrankheiten. In den wohlhabenden Ländern genießen die Menschen außerdem das Privileg, Lebensmittel nach der Erzeugungsart (z. B. Bio-Lebensmittel), nach bestimmten Diätformen (fettreduziert) oder auch gezielt nach der Herkunft auswählen zu können.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den Begriff **Lebensmittel** von verwandten Begriffen und Stoffklassen abgrenzen und zwischen **Makronährstoffen** und **essenziellen Nährstoffen** unterscheiden;
- bestimmte **Ernährungsformen** bewerten und die in einem bestimmten Lebensmittel enthaltenen **Nährstoffe und Zusatzstoffe** anhand der **Lebensmittelkennzeichnung** identifizieren und den **Nährwert** und die Auswirkung auf die Gesundheit beurteilen;
- beispielhaft einen **Speiseplan** in ernährungsphysiologischer Hinsicht analysieren und ein **Konzept zur ausgewogenen Ernährung** erstellen;
- den Begriff **Lebensmittelkontamination** erklären und Kontaminanten nach ihrer Herkunft gliedern;
- das **Gefährdungspotenzial von Kontaminanten** analysieren und Maßnahmen zur **Vermeidung von Kontaminationen** vorschlagen.



Eine umfassende Definition der Lebensmittel ist in der EU-Verordnung Nr. 178/2002 „Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts (General Food Law)“ festgelegt.



Proteine siehe Kap. B, 1.1, Kohlenhydrate siehe Kap. B, 1.2, und Fette siehe Kap. B, 1.3.

| Energieinhalt | kJ/g | kcal/g |
|---------------|------|--------|
| Proteine | 17 | 4 |
| Kohlenhydrate | 17 | 4 |
| Fett | 37 | 9 |

Unter **Lebensmittel** versteht man Stoffe, die vom Menschen durch Essen oder Trinken zu Ernährungs- oder Genusszwecken aufgenommen werden.

Lebensmittel dienen somit primär der **Versorgung mit Makronährstoffen und essenziellen Nährstoffen**. Nicht dazugezählt werden: Pflanzen und Tiere vor dem Ernten oder Schlachten, Futtermittel, Arzneimittel, Tabakwaren, Betäubungsmittel, psychotrope Substanzen, kosmetische Mittel sowie Rückstände und Kontaminanten.

Die Energieversorgung wird über die **Makronährstoffe** Fett, Kohlenhydrate und Proteine gedeckt.

Im Gegensatz zu den Makronährstoffen werden **essenzielle Nährstoffe** nur in geringen Mengen benötigt (Mikronährstoffe). Sie sind am Aufbau von Zell- und Gewebestrukturen beteiligt. Da sie im Körper selbst nicht synthetisiert werden können, müssen sie mit der Nahrung zugeführt werden.

Essenzielle Nährstoffe sind für die Funktion des Stoffwechsels und damit für die Gesunderhaltung unseres Körpers unbedingt erforderlich. Zu den Mikronährstoffen zählen essenzielle Aminosäuren, essenzielle mehrfach ungesättigte Fettsäuren, Vitamine, Mineralstoffe und Spurenelemente.

Bei gesunder Ernährung wird dem Körper täglich durchschnittlich nur so viel Energie zugeführt, wie er wirklich benötigt. Eiweiß, Kohlenhydrate, Fett, essenzielle Nährstoffe und **Ballaststoffe** müssen in einem **ausgewogenen Verhältnis** zueinander stehen. Außerdem muss auf eine ausreichende Flüssigkeitszufuhr geachtet werden.

Vollwertkost ist aus medizinischer Sicht eine besonders ausgewogene Ernährungsweise. Sie nutzt vor allem Obst, Gemüse, Hülsenfrüchte, Vollkornprodukte und Milch. Auf tierische Produkte wird weitgehend verzichtet, ebenso auf raffinierten Zucker, künstliche Zusatzstoffe und industriell behandelte Erzeugnisse.

Rohkost ist Nahrung, die vor dem Verzehr nicht erhitzt, also weder gebacken, gebraten, gekocht noch pasteurisiert wird. Vitamine, Enzyme und Mineralstoffe bleiben in der Nahrung vollständig erhalten, sind aber mitunter nur schwer resorbierbar (z. B. wird Betakarotin – Provitamin A – aus gekochtem Gemüse wesentlich besser resorbiert).

Die in Österreich überwiegend übliche **Mischkost** greift sowohl auf tierische als auch auf pflanzliche Produkte zurück.

In den westlichen Industrieländern werden **vegetarische Ernährungsformen** immer beliebter. **Veganer** essen ausschließlich pflanzliche Kost. Sie lehnen jegliche vom Tier stammenden Stoffe oder Produkte, auch Honig, als Nahrung ab. Bei der **ovo-laktovegetabilen Ernährungsform** werden Pflanzenkost, Milchprodukte und Eier gegessen, während bei der **laktovegetabilen Ernährung** Pflanzenkost nur durch Milch und Milchprodukte ergänzt wird.

Fast Food ist ein fester Bestandteil unserer Esskultur geworden. Nicht nur Burger oder Pommes frites gelten als Fast Food, auch Wurstsemmlen und Pizzen gehören dazu. Neben der raschen Zubereitung ist die Art, wie gegessen wird, typisch: schnell, oft im Stehen oder Gehen – oder vor dem Computer. Berufstätige während der kurzen Mittagspause, aber auch Kinder und Jugendliche schätzen neben dem Geschmack und der raschen Sättigung vor allem die unkomplizierte Form der Nahrungsaufnahme. Fast Food wird wegen seiner Inhaltsstoffe – es enthält meist viel Fett und Salz, wenige Ballaststoffe – unter anderem für Übergewicht und gleichzeitig für ernährungsbedingte Mängelscheinungen verantwortlich gemacht.

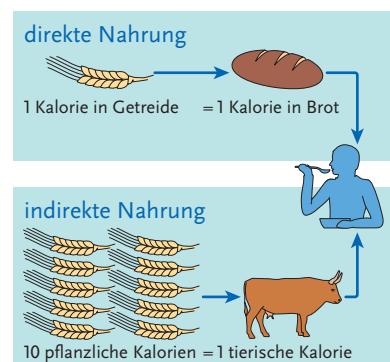
Als Gegenbewegung wurde 1989 eine weltweit aktive Non-Profit-Organisation gegründet. Die Anhänger von **Slow Food** sehen ihre Aufgabe darin, einerseits die Esskultur zu pflegen und andererseits als mündige Konsumenten verantwortungsvolle Landwirtschaft und Fischerei, artgerechte Viehzucht, die Aufrechterhaltung des traditionellen Lebensmittelhandwerks und die Bewahrung der regionalen Geschmacksvielfalt zu fördern.

Durch Importe, besondere Anbautechniken, Lagerung und künstliches Nachreifen sind viele Obst- und Gemüsesorten das ganze Jahr über verfügbar.

Saisonprodukte werden zum natürlichen Reifezeitpunkt geerntet und weisen daher nicht nur ein optimales Aroma, sondern auch einen Höchstgehalt an Vitaminen auf.

„Aus biologischer (organisch-biologischer, biologisch-dynamischer oder ökologischer) Landwirtschaft“ ist die Bezeichnung für österreichische **Bioprodukte**. Biologischer Landbau verzichtet auf den Einsatz von Kunstdünger, dessen Erzeugung sehr energieintensiv ist. Durch das Nützen von natürlichen Selbstregulierungsmechanismen (z. B. Fruchtfolge) wird für ein ökologisches Gleichgewicht auf den Feldern und für die Tiergesundheit gesorgt. Besonderer Wert wird auf die Ernährung des Bodens und möglichst geschlossene Kreisläufe gelegt. Bei der artgerechten Haltung der Tiere werden tierfreundliche Haltungssysteme verwendet (z. B. muss Auslauf möglich sein). Das Futter muss aus biologischer Landwirtschaft stammen.

Ballaststoffe sind weitgehend unverdauliche Nahrungsbestandteile, die vorwiegend in pflanzlichen Lebensmitteln vorkommen (siehe Kap. B, 2.3).



Vergleich pflanzlicher und tierischer Nahrungsmittel (1 kcal entspricht rund 4,2 kJ)



Besonders gesundheitsbewusste Menschen werden auch als LOHAS bezeichnet. LOHAS steht für „lifestyle of health and sustainability“, also für einen Lebensstil, der besonderen Wert auf Gesundheit und Nachhaltigkeit legt.



EU-Bio-Zeichen und AMA-Bio-Zeichen



Bezeichnungen wie „naturnah“, „umweltschonend“ oder „alternativ“ weisen nicht auf eine biologische Produktion hin.



Recherchieren Sie, ob das Überschreiten des Mindesthaltbarkeitsdatums unbedingt den Verderb eines Lebensmittels bedeutet.



Grundnahrungsmittel stellen die Grundversorgung mit Kohlenhydraten, Eiweiß und Fett sicher, nicht jedoch zwangsläufig eine ausreichende Versorgung mit essenziellen Nährstoffen.



Recherchieren Sie unter www.BMG.gv.at, welche auf der Ernährungspyramide aufbauenden Leitlinien für Schulbuffets entwickelt wurden.



Zöliakie ist eine Erkrankung des Dünndarms als Folge einer Unverträglichkeit gegenüber Gluten, einem Protein in den Getreidearten Weizen, Roggen, Gerste und Hafer.



Essenzielle Nährstoffe: essenzielle Aminosäuren (Tagesbedarf, biologische Wertigkeit).

Lebensmittel sind kostbar. Lebensmittel im Abfall verursachen nicht nur hohe Kosten, sie sind auch ein ökologisches und ethisches Problem.

Als **Grundnahrungsmittel** werden die Nahrungsmittel bezeichnet, die in einer bestimmten Kultur mengenmäßig den Hauptbestandteil der Ernährung der Bevölkerung ausmachen. Welche Nahrungsmittel regional konsumiert werden, hängt stark von den klimatischen und wirtschaftlichen Faktoren sowie von kulturellen Einflüssen ab. Als echte Grundnahrungsmittel für den überwiegenden Teil der Weltbevölkerung dienen Weizen, Reis, Kartoffeln, Yams, Hülsenfrüchte wie Linsen und Bohnen, Früchte wie Datteln und Feigen bzw. daraus hergestellte Produkte wie Brei und Brot. Ebenfalls dazugezählt werden Fisch, Fleisch, Milch und Eier, die neben Hülsenfrüchten zu den wichtigsten Eiweißquellen zählen.

Um sowohl mit Makro- als auch mit Mikronährstoffen umfassend und ausreichend versorgt zu werden, empfiehlt das österreichische Gesundheitsministerium, den täglichen Speiseplan in Anlehnung an die Ernährungspyramide zu gestalten.

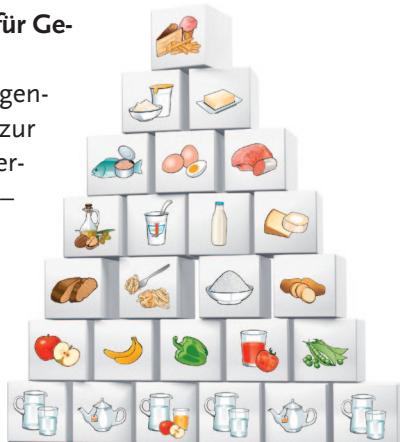
Ernährungspyramide des Bundesministeriums für Gesundheit:

Sie bietet einen Überblick über optimale Mengenverhältnisse, lässt aber genügend Freiraum zur individuellen Gestaltung des Speiseplans. Sie verdeutlicht auch, dass – abhängig von der Menge – grundsätzlich jedes Lebensmittel ein Bestandteil einer gesunden Ernährung sein kann.

Um dem Konsumenten bereits beim Einkauf umfassende Informationen über Nährwert und Nährstoffgehalt geben zu können, müssen einheitliche und verbraucherfreundliche Informationen auf allen Lebensmittelverpackungen zu finden sein. Die **EU-Verbraucherinformationsverordnung** legt seit **2011** die Mindestschriftgröße, die Herkunftsbezeichnung, Energie- und Nährwertangaben sowie die Deklaration von Imitaten und Allergenen fest.

Die **Nährwertkennzeichnung** muss (verpflichtend ab Ende 2016) umfassen: Brennwert, Fett, gesättigte Fettsäuren, Kohlenhydrate, Zucker, Eiweiß und Salz. Der Begriff Salz beschränkt sich dabei nicht auf Natriumchlorid, sondern umfasst neben dem Speisesalz auch alle weiteren Verbindungen des Natriums, wie Nitrate, Phosphate oder Glutamate. Natrium wird demnach in „Salzäquivalenten“ angegeben (Natrium mal 2,5).

Als **Allergen** muss glutenhaltiges Getreide ebenso wie, Krebstiere, Weichtiere, Eier, Milch, Fische und daraus gewonnene Erzeugnisse, Erdnüsse, Sojabohnen und eine Vielzahl von Schalenfrüchten (Nüsse), Sellerie, Senf, Sesam, Lupinen, Schwefeldioxid und Sulfite ($>10 \text{ mg/kg}$ oder $>10 \text{ mg/L}$) angeführt sein.



Bei einer ausgewogenen Ernährung wird der Tagesbedarf an den acht **essenziellen Aminosäuren** gedeckt. Je nach Aminosäure werden von Valin, Leucin, Isoleucin, Methionin, Threonin, Phenylalanin, Tryptophan und Lysin zwischen 0,7 und 1,1 g benötigt. Sie sind zusammen mit zwölf weiteren **proteinogenen Aminosäuren**, die der Körper im Stoffwechsel bilden kann, für den Aufbau des Körpereiweißes unbedingt erforderlich. In Lebensabschnitten mit starkem Körperwachstum, in der Kindheit und in der Jugend, besteht erhöhter Bedarf an der Aufnahme einer weiteren Aminosäure, nämlich von **Histidin**. Diese wird auch als **semiessenzielle Aminosäure** bezeichnet. Bei gewissen vegetarischen Ernährungsformen muss auf die Kombination von Lebensmitteln geachtet werden, damit Nahrungsproteine ausreichend in körpereigene Proteine umgesetzt werden können.

Essenzielle Fettsäuren weisen zumindest zwei Doppelbindungen auf und sind hauptsächlich in Pflanzenölen und Fischen (Fischölen) zu finden. Sie sind wichtige Bausteine für Membranlipide aller Säugetierzellen.

Vitamine sind organische Verbindungen, die in geringen Mengen, im Mikrogramm- bis Milligrammbereich, mit der Nahrung aufgenommen werden müssen. Sie spielen im Zellstoffwechsel eine wichtige Rolle. Einige von ihnen, insbesondere die wasserlöslichen, sind Bestandteile bzw. Vorstufen von Coenzymen. Eine Unterversorgung verursacht Mangelerscheinungen (Hypovitaminosen). Bei Übersorgung können bei fettlöslichen Vitaminen, besonders Vitamin A und D, Vergiftungen auftreten (Hypervitaminosen). Ein Überschuss an wasserlöslichen Vitaminen wird mit dem Harn ausgeschieden.

Mineralstoffe und Spurenelemente werden mit der Nahrung in Form von anorganischen Verbindungen (z. B. Salzen, Ionen) oder zusammengesetzten Proteinen (z. B. Metallproteinen) aufgenommen. Sie wirken als Elektrolyte (Na, K, Cl), Bau- und Strukturstoffe (Ca, Mg, P) oder als Reglerstoffe (Fe, Zn, Cu, Mn, F, Se, Cr, Mo, I). Einige der angeführten Spurenelemente können in höherer Dosis giftig wirken. Dies trifft vor allem auf Kupfer und Fluor, aber auch auf weitere Spurenelemente, wie Selen, Chrom und Molybdän, zu.

Unter den anorganischen Verbindungen im Stoffwechsel nimmt **Wasser** mengenmäßig den ersten Platz ein. Der **Tagesbedarf eines Erwachsenen** beträgt **zwei bis drei Liter**.

Wasser gehört zu jenen Warengruppen, die im Zusammenhang mit Lebensmitteln im **Lebensmittelsicherheits- und Verbraucherschutzgesetz** rechtlich geregelt sind. Diese Regelungen betreffen auch diätetische Lebensmittel, die den besonderen Ernährungsbedarf von bestimmten Zielgruppen, wie an Verdauungsstörungen erkrankten Personen, Schwangeren, Säuglingen oder Kleinkindern, decken. Nahrungsergänzungsmittel, Lebensmittelzusatz- und Verarbeitungshilfsstoffe werden ebenfalls erfasst. Wenn Gebrauchsgegenstände wie Verpackungen und Maschinen mit Lebensmitteln oder mit der Haut oder der Schleimhaut des Menschen in Kontakt kommen (Kleidung, Zahnbürsten), dürfen sie ebenfalls keine gesundheitsgefährdenden Stoffe abgeben.

Besonders die **Lebensmittelzusatzstoffe** stehen im Zusammenhang mit der Gesundheit der Verbraucher/innen im Brennpunkt kritischer Betrachtung. Sie werden als Farbstoffe, Konservierungs- und Antioxidationsmittel, als Emulgatoren, Verdickungs- und Geliermittel eingesetzt. Stabilisatoren, Geschmacksverstärker und Säuerungsmittel zählen neben den Säureregulatoren und den Trennmitteln ebenfalls dazu. Auch Backtriebmittel, Süßstoffe, modifizierte Stärke, Schmelzsalze, Mehlbehandlungs-, Festigungs- und Feuchthaltemittel sind wie die Schutz- und Treibgase in Zusatzstoffklassen erfasst.

Bei der **Zulassung von Lebensmittelzusatzstoffen** prüft die **Europäische Lebensmittelsicherheits-Agentur (European Food Safety Agency – EFSA)** einerseits die toxikologische Unbedenklichkeit und andererseits die technologische Wirkung.

Zusatzstoffe, die den strengen Anforderungen der EFSA entsprechen, erhalten eine **E-Nummer**, die **Europäische Registrierungsnummer**.

Auf Lebensmittelverpackungen muss die Zusatzstoffklasse, gefolgt von der spezifischen Bezeichnung oder der E-Nummer, ersichtlich sein: Antioxidationsmittel Alpha-Tocopherol oder Antioxidationsmittel E 307.



Bei **Unterversorgung mit essenziellen Fettsäuren** kommt es zu Hautveränderungen. Bei Versuchstieren traten auch Fruchtbarkeitsstörungen auf.



Essenzielle Nährstoffe: Vitamine, Mineralstoffe, Spurenelemente (Einteilung, Beispiele, Tagesbedarf, Vorkommen, Funktion).



Von **Spuren- oder Mikroelementen** spricht man ab einer Konzentration von unter 50 mg je Kilogramm Körpergewicht.



Trinkwasser ist eine Zutat bei der Lebensmittelverarbeitung.



Lebensmittel und Lebensmittelzusatzstoffe: gesetzliche Grundlagen, Zusatzstoffklassen, Beispiele.

Die von vielen Konsumenten in Unkenntnis gefürchteten **E-Nummern** stellen ein **Sicherheitszertifikat für Zusatzstoffe** dar.



E-Nummern-Listen sind über das Internet verfügbar und bei Umweltschutzorganisationen, Konsumentenschutzverbänden und bei der Arbeiterkammer erhältlich.

Unbehandelte Lebensmittel, wie z. B. Obst, Gemüse, Frischfleisch oder pasteurisierte Milch, dürfen außer Schutzgasen keine Zusatzstoffe enthalten. Für Biolebensmittel sowie Säuglings- und Kleinkindernahrung gelten besondere Beschränkungen der Zusatzstoffverwendung.

Völlig unbedenkliche Zusatzstoffe werden „*quantum satis*“ verwendet, das heißt „so wenig wie möglich, so viel wie erforderlich“, z. B. Citronensäure (E 330).

Es dürfen nur zugelassene Zusatzstoffe in bestimmten Lebensmitteln in bestimmten Mengen verwendet werden.

Nicht nur in Hinblick auf die **Zusammensetzung** von Lebensmitteln gelten strenge Regelungen zum Schutze des Konsumenten, sondern auch für die **Produktion, Lagerung, Verarbeitung und Zubereitung**.

Lebensmittelhygiene: Maßnahmen und Vorkehrungen, die notwendig sind, um Gefahren unter Kontrolle zu bringen und zu gewährleisten, dass ein Lebensmittel unter Berücksichtigung seines Verwendungszweckes für den menschlichen Verzehr tauglich ist.

Als Gefahren für die Gesundheit des Verbrauchers, die unabsichtlich in ein Lebensmittel gelangt sind, gelten **physikalische** (z. B. Fremdkörper, wie Glas, Steine), **chemische** (z. B. giftige Verbindungen aus der Umwelt oder aus Organismen) und **biologische Gefahren** (z. B. pathogene Bakterien, Viren).



In der Alltagssprache wird Hygiene oft mit Sauberkeit gleichgesetzt.



EU-Verordnung Nr. 852/2004 über Lebensmittelhygiene.



Rückstände sind unerwünschte Stoffe, die im Zuge der Verarbeitung in ein Lebensmittel gelangen und in kontrollierten Restmengen vorhanden sind.

Kontamination: Vorhandensein einer Gefahr in einem Lebensmittel oder das Herreinbringen einer Gefahr.

Kontaminanten: verunreinigende Stoffe, die nach der Herkunft in Umweltkontaminanten, Kontaminanten aus Organismen und Kontaminanten aus Verarbeitungsprozessen unterschieden werden.

Unerwünschte Stoffe aus der Umwelt stammen vor allem aus industriellen und gewerblichen Emissionen sowie aus der Landwirtschaft. Aus der Gruppe der **Umweltkontaminanten** stehen vier Stoffklassen besonders im Brennpunkt kritischer Betrachtung: Schwermetalle, Dioxine, Benzo(a)pyren und Nitrat.

Beispiele für Gesundheitsschädigungen:

| | |
|----------------------|---|
| Blei | Nervensystem, Blutbildung; jahrzehntelange Speicherung in Knochen und Zähnen |
| Cadmium | Knochen, Störung des Ca-Stoffwechsels |
| Quecksilber | Nervensystem, generell Proteinschädigung |
| Dioxine | kanzerogen, Wachstumsschädigung |
| Benzo(a)pyren | kanzerogen, Gendefekte |
| Nitrat | Reduktion zu Nitrit, Bildung von kanzerogenen Nitrosaminen, bei Säuglingen Methämoglobinbildung und Ersticken |

Das Hauptaugenmerk bei den **Kontaminanten aus Organismen** richtet sich auf Gifte aus Schimmelpilzen, die **Mykotoxine**. Vergiftungen mit Pilzen, die mit Speisepilzen verwechselt werden, erregen zwar durch spektakuläre Medienberichte oft große Aufmerksamkeit, sind aber quantitativ von geringer Bedeutung. Werden Lebensmittel aus Pflanzen gewonnen, die Giftstoffe zur Fressabwehr bilden, müssen die daraus resultierenden Kontaminanten berücksichtigt werden.



Schimmelpilze bilden Mykotoxine

Toxische Stoffe entstehen auch unter gewissen Reaktionsbedingungen bei der Herstellung von Lebensmitteln. Nitrosamine werden beim Erhitzen von eiweißhaltigen Lebensmitteln, die Nitrit (reduziertes Nitrat) enthalten, gebildet. Sie zeigen eine stark kanzerogene Wirkung. Ein weiterer **Kontaminant aus Verarbeitungsprozessen** ist Acrylamid. Es entsteht beim Erhitzen von Lebensmitteln als Nebenprodukt der nicht enzymatischen Bräunungsreaktion (Maillardreaktion) von reduzierenden Zuckern (z. B. Glucose) mit der Aminosäure Asparagin, besonders bei Temperaturen über 140 °C. Acrylamid gilt als höchst kanzerogen und mutagen. Daher wurden für einzelne Lebensmittel wie Pommes frites, Kartoffelchips oder Kekse von der EU-Kommission Anfang 2011 Richtwerte veröffentlicht.

Mit Bakterien wie Salmonellen oder Listerien kontaminierte Lebensmittel können bei Personen mit stark geschwächter Immunabwehr sogar tödlich verlaufende Erkrankungen verursachen. Die Einhaltung der Grenzwerte für **biologische Kontaminanten** wird als Teilbereich der Lebensmittelsicherheit von der Österreichischen Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit (AGES) sowie vom **Bundesamt für Ernährungssicherheit** überprüft.



Amine, Amide siehe Kap. A, 7.2.



Im Gegensatz zu Grenz- oder Höchstwerten sind **Richtwerte** rechtlich nicht verbindlich, sondern eine Orientierungshilfe für die Beurteilung von Lebensmitteln.



Ziele erreicht? – „Lebensmittel“

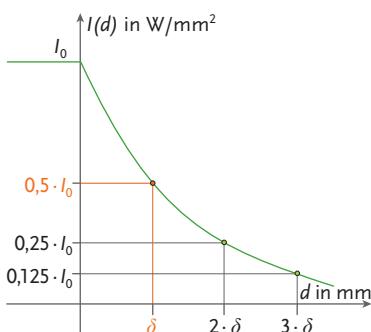
- 5.01** Wodurch unterscheiden sich Lebensmittel und Grundnahrungsmittel?
- 5.02** Welche Nährstoffe zählt man zu den Makro- und welche zu den Mikronährstoffen?
- 5.03** Welche Angaben muss die Nährwertkennzeichnung verpflichtend ab Ende 2016 umfassen?
- 5.04** Erheben Sie die in einem bestimmten Lebensmittel enthaltenen Nährstoffe und Zusatzstoffe anhand der Lebensmittelkennzeichnung.
- 5.05** Führen Sie über einen begrenzten Zeitraum ein Ernährungstagebuch und analysieren Sie, ob die ermittelten Mengen und Zutaten eine ausgewogene Ernährung sicherstellen.
- 5.06** Erstellen Sie beispielhaft einen Wochenspeiseplan, in dem Sie die Verfügbarkeit saisonaler und regionaler Produkte berücksichtigen.
- 5.07** Wozu braucht der menschliche Körper essenzielle Aminosäuren und essenzielle Fettsäuren?
- 5.08** Wie kann es zu einer Hypovitaminose kommen? Wie kann man sie verhindern?
- 5.09** Worauf ist bei den Spurenelementen Fluor, Kupfer und Selen zu achten?
- 5.10** Wozu dienen Lebensmittelzusatzstoffe?
- 5.11** Welche Information erhält man aus einer E-Nummer?
- 5.12** Wie werden Kontaminanten von Rückständen abgegrenzt und nach ihrer Herkunft unterschieden?

6 Strahlenbelastung und Nanotechnologie

Die Bilder von den Kraftwerksmitarbeitern, die nur spärlich mit Schutzkleidung ausgerüstet in Fukushima nach der Katastrophe 2011 ihrer Arbeit nachgehen mussten, sind um die Welt gegangen. Im Alltag stellt sich die Frage nach sicheren Atomkraftwerken genau so wie nach sicherem Umgang mit radioaktiver, ionisierender und elektromagnetischer Strahlung im Gesundheitswesen und in der Industrie. Die Sicherheit beim Umgang mit Stoffen der Nanotechnologie ist ein aktuelles Thema.



Siehe Kap. D, 5.3.4 Radioaktivität.



Die Intensität als Funktion der Absorberdicke d .

$$I(3 \cdot \delta) = I_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^3 = \frac{I_0}{8}$$



Intensität = Energie durch das Produkt aus Fläche und Zeit.

Halbwertsdicke bei der Absorption und Halbwertszeit beim Zerfall entsprechen einander.



Halbwertszeit τ , $N(\tau) = \frac{N_0}{2}$

Halbwertsdicke δ , $I(\delta) = \frac{I_0}{2}$

| Material | Halbwertsdicke δ in cm |
|----------|-------------------------------|
| Luft | 12 000 |
| Wasser | 14 |
| Beton | 9 |
| Blei | 1,4 |

Halbwertsdicken ausgewählter Materialien für γ -Strahlung mit einer Energie von 2 MeV

| Strahlung | Q in Sv/Gy |
|--|--------------|
| α -Strahlen, Rückstoßkerne | 20 |
| Schnelle Neutronen, Protonen | 10 |
| Langsame Neutronen | 5 |
| Röntgen-, β - und γ -Strahlen | 1 |

Qualitätsfaktor Q für verschiedene Strahlenarten



Ein Coulomb ist nicht nur im atomaren Bereich eine sehr große Ladung.

$$1 e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} C$$

Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Ionisation** und **Absorption** beschreiben, zwischen natürlicher und künstlicher **Strahlenbelastung** unterscheiden und die Größenordnung von **Nanopartikeln** angeben;
- das **Absorptionsgesetz** für β - und γ -Strahlen anwenden;
- die **Strahlendosimetrie** verstehen.

Trifft energiereiche Strahlung auf Materie, so wird sie durch **Energieabgabe** an den Absorber geschwächt. Durch ausreichend dicke Absorberschichten dringt keine Strahlung durch; genauer: Die Strahlungsintensität sinkt unter die Nachweisbarkeitsgrenze. Für β - und γ -Strahlen gilt ein **Absorptionsgesetz**.

Absorptionsgesetz für Beta- und Gammastrahlen

Die Intensität $I(d)$ in der Absorbertiefe d nimmt exponentiell mit der Eindringtiefe ab. Es gilt $I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$.

- I_0 ist die Intensität vor dem Eindringen in den Absorber.
- μ ist der absorberabhängige **Schwächungs-** oder **Absorptionskoeffizient**.
- Die **Halbwertsdicke** δ ergibt sich als $\frac{\ln(2)}{\mu}$.

Beispiel 6.01: Absorption in einem Aluminiumblech

Für Betastrahlen mit einer Maximalenergie von 3 MeV beträgt die Halbwertsdicke in Aluminium rund 0,503 mm.

Wir berechnen, nach welcher Dicke nur mehr ein Promille der Anfangsintensität vorhanden ist.

$$I(d) = I_0 \cdot 2^{-\frac{d}{\delta}} \quad 0,001 = 2^{-\frac{d}{\delta}} \quad d = \delta \cdot \frac{\ln(1000)}{\ln(2)} \approx 0,5 \text{ cm} \approx 10 \cdot \delta$$

Folgende Wechselwirkungen treten auf, wenn **energieriche** Strahlung auf Materie trifft:

- **Ionisation** des Absorbermaterials bei α -, β - und γ -Strahlung; bei γ -Strahlung ist das der **Fotoeffekt**,
- **Streuung** der auftreffenden Strahlung bei β - und γ -Strahlung (**Comptoneffekt** bei γ -Strahlung) und
- **Paarbildung** bei γ -Strahlung.

Weil Ionisation durch α -, β - und γ -Strahlung hervorgerufen wird, misst man die Ladung ΔQ von erzeugten Ionen eines Vorzeichens in der Masse Δm durchstrahlter trockener Luft (bei 0 °C und 1 013 mbar).

Strahlungsmessung – Strahlendosimetrie

- Die **Ionendosis** J ist die pro Kilogramm trockener Luft bei 0 °C und 1 013 mbar erzeugte Ladung.

$$J = \frac{\Delta Q}{\Delta m} \quad \text{Einheit der Ionendosis } [J] = \left[\frac{\Delta Q}{\Delta m} \right] = \left[\frac{1 \text{ C}}{1 \text{ kg}} \right] = 1 \frac{\text{ C}}{\text{ kg}}$$

- Die **Energiedosis** D ist die pro Kilogramm durchstrahlter Materie abgegebene Energie.

$$D = \frac{\Delta E}{\Delta m} \quad \text{Einheit der Energiedosis } [D] = 1 \frac{\text{ J}}{\text{ kg}} = 1 \text{ Gray (1 Gy)}$$

- Die **Äquivalenzdosis** D_Q ist die mit einem Qualitätsfaktor Q multiplizierte Energiedosis, die die biologische Strahlenwirkung besser charakterisiert.

$$D_Q = Q \cdot D \quad \text{Einheit der Äquivalenzdosis } [D_Q] = 1 \frac{\text{ J}}{\text{ kg}} = 1 \text{ Sievert (1 Sv)}$$

Eine Energiedosis von 1 Gray ist ein sehr großer Energieübertrag von einem Joule pro Kilogramm, wie das folgende Beispiel zeigt.

Beispiel 6.02: Energiedosis und letale Dosis

Die $LD_{50|30}$ -Werte (50 % Letalität nach 30 Tagen, nach Daten der IAEA) sind für Menschen mit 3 Gy bis 4,5 Gy und für Rhesusaffen mit 5,5 Gy angegeben.

Strahlenbelastung

Die ortsabhängige Strahlenbelastung eines Menschen setzt sich aus

- **natürlicher** und
- **künstlicher Strahlenbelastung** zusammen.

Bei der **natürlichen Strahlenbelastung** unterscheidet man:

- **kosmische Strahlung** oder **Höhenstrahlung**, die von der Atmosphäre teilweise absorbiert wird;
- **terrestrische Strahlung** (natürliche radioaktive Nuklide wie U-238, Th-232, Radon, K-40 und C-14);
- **innere Strahlung**, wenn sich über die Haut, Atmung und Nahrung aufgenommene Radionuklide in verschiedenen Organen ablagern (Inkorporation).

Beispiel 6.03: Natürliche Strahlenbelastung in Westeuropa

Für Westeuropa wird für die natürliche Strahlenbelastung ein Mittelwert von 1,1 mSv pro Jahr angenommen. Der Beitrag der kosmischen und der terrestrischen Strahlung wird mit jeweils rund 300 μ Sv pro Jahr beziffert.

Zur **künstlichen Strahlenbelastung** tragen vor allem

- radioaktive Strahlungsquellen in technischen und medizinischen Geräten,
- Röntgenstrahlung und
- Atomwaffen und Atomkraftwerke bei.

Beispiel 6.04: Künstliche Strahlenbelastung in Westeuropa

Die künstliche Strahlenbelastung beträgt in Westeuropa durchschnittlich 2 mSv pro Jahr und ist damit fast doppelt so hoch wie die natürliche Strahlenbelastung.

Die Wirkungen von Strahlen sind sehr genau erforscht. Bei der Untersuchung von Auswirkungen der Nanotechnologie steht man hingegen noch am Anfang.

Nanotechnologie

Als Nanotechnologie bzw. Nanotechnik werden die Forschung und Anwendung in der Cluster-, Oberflächen- und Halbleiterphysik und in der Oberflächenchemie sowie in Teilbereichen des Maschinenbaus und der Lebensmitteltechnologie (Nano-food) bezeichnet.

Den Nanoforschungsgebieten gemeinsam ist die gleiche Größenordnung vom Einzelatom bis zu einer Objektgröße von 100 Nanometern. Diese Größenordnung bezeichnet einen Bereich, in dem die **Oberflächeneigenschaften** gegenüber den **Volumeneigenschaften** der Materialien eine immer größere Rolle spielen und zunehmend **quantenphysikalische Effekte** berücksichtigt werden müssen.

Der Begriff „Nanotechnologie“ wurde 1974 erstmals gebraucht. Als Begründer der Nanotechnologie gilt **Richard Phillips Feynman**. Er hielt im Jahr 1959 einen Vortrag mit dem Titel „There's Plenty of Room at the Bottom“, frei übersetzt: Ganz unten ist eine Menge Platz.



Ein Joule pro Kilogramm ist ein für den menschlichen Organismus kaum zu bewältigender Energieübertrag.



Die IAEA ist die **Internationale Atomenergieorganisation**. Sie ist eine autonome wissenschaftlich-technische Organisation der Vereinten Nationen mit Sitz in Wien.



VIKTOR FRANZ HESS, 1883 BIS 1964, ÖSTERREICHISCHER PHYSIKER; ENTDECKTE 1913 DIE HÖHENSTRÄHLUNG UND ERHIELT 1936 DEN NOBELPREIS FÜR PHYSIK

Terra: lateinisch für Erde.

Nanos: griechisch für Zwerg.



Nano = SI-Vorsilbe für ein Milliardstel = 10^{-9} .



RICHARD PHILLIPS FEYNMAN, 1918 BIS 1988, US-AMERIKANISCHER PHYSIKER; NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1965 FÜR ARBEITEN ÜBER DIE QUANTENELEKTRODYNAMIK



Lotuseffekt: Selbstreinigende Oberflächen.



Der Lotuseffekt

Ein **Enzym** ist ein Eiweißmolekül, das eine oder mehrere biochemische Reaktionen katalysieren kann.

Ribosomen sind makromolekulare Komplexe aus Eiweißmolekülen und Ribonukleinsäuren (RNA).



Der Schutz vor ultravioletter Strahlung in Sonnencremes beruht auf Nanopartikeln aus Titandioxid.



In der Medizin wird an Nanopartikeln als Wirkstofftransporter oder -depot, beispielsweise in der Krebstherapie, geforscht.



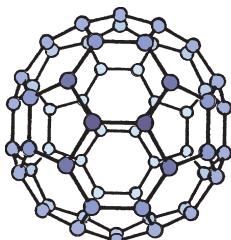
Die Größenordnung von Transistoren eines handelsüblichen Mikroprozessors liegt mit einer Breite von rund 30 nm im Bereich der Nanotechnologie.



Fullerene und Carbon-Nanotubes sind ebenfalls der Nanotechnologie zuzurechnen.



Fullerene siehe NAWI I/II, Kap. D, 1.2 (Kohlenstoff).



Nanomaterialien, die auf chemischem Wege oder mit mechanischen Methoden hergestellt werden, sind teilweise kommerziell verfügbar und werden in handelsüblichen Produkten eingesetzt.

Verfügbare Nanomaterialien sind Pigmente und andere Zusatzstoffe (Additive) für Lacke und Kunststoffe, wie beispielsweise hochdisperse Kieselsäuren oder Ruß. Weil Schmutzpartikel auf Nanoelementen nicht anhaften, werden Schmutz abweisende Kleidungsstücke produziert.

Nanotechnologie und Natur

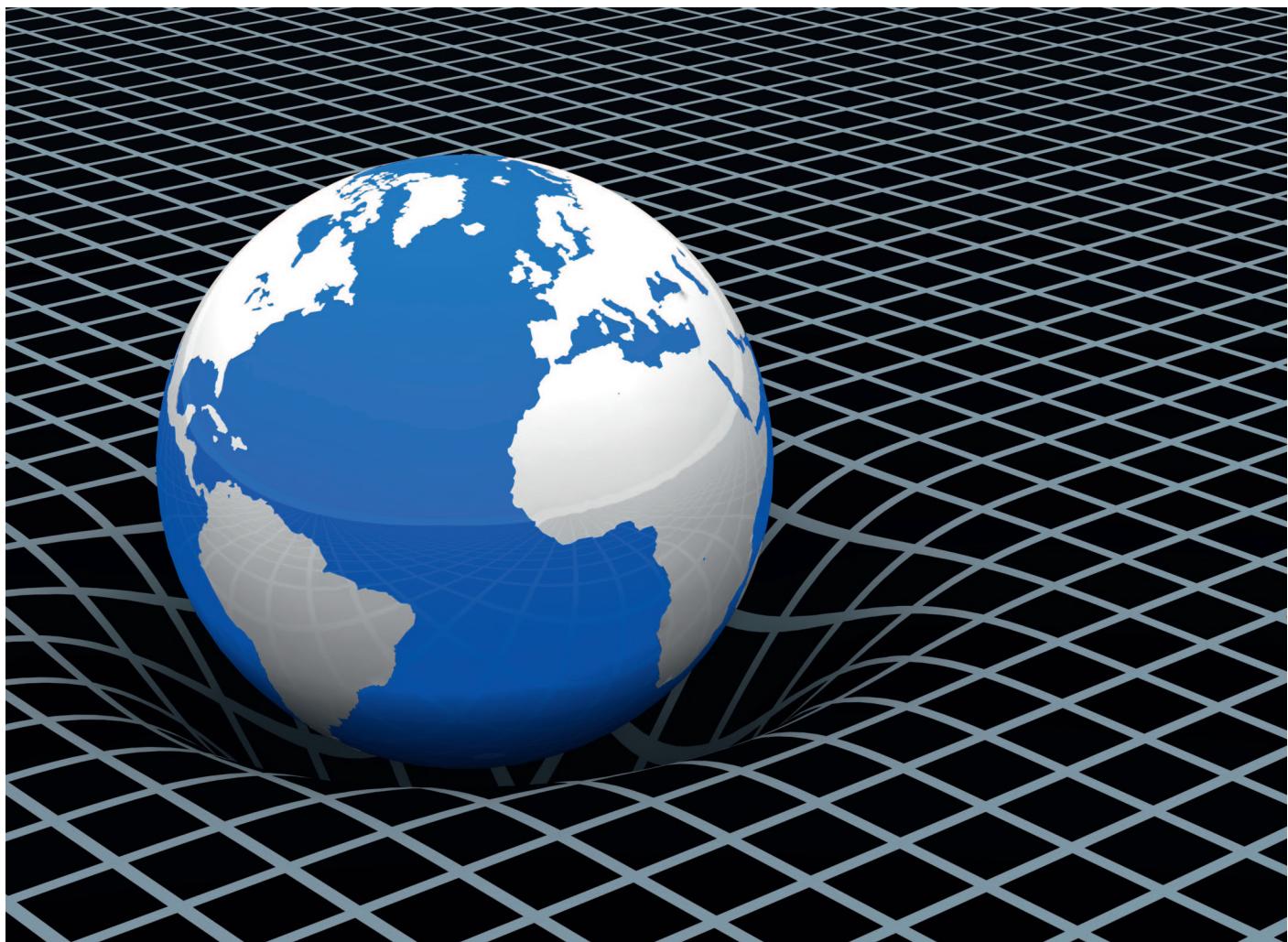
- Die feinen Nanostrukturen auf den Blättern der **Lotosblume** bewirken das Abperlen von Wasser. Das Haften von Schmutzpartikeln wird minimiert.
- Haare im Nanometerbereich an Fliegenbeinen sorgen dafür, dass **Fliegen** an Decken und Wänden laufen können.
- Im Kalk von **Muschelschalen** und **menschlichen Knochen** sind organische und anorganische Stoffe im Nanobereich so eng aneinandergereiht, dass die Stabilität und Widerstandsfähigkeit maximiert werden.
- **Enzyme**, **Ribosomen** und **Geißelantriebe** von Bakterien sind natürliche Nanomaschinen.
- Bei jeder Verbrennung werden viele Nanopartikel frei.

Auch kritische Meldungen zur Nanotechnologie gibt es immer wieder in den Medien. Es wurde ein Vergleich mit der Gesundheitsgefährdung durch Asbest angestellt. Die Sorge, dass die gültigen Sicherheitsstandards mit der rasanten Entwicklung nicht Schritt halten können, wird oft geäußert.



Ziele erreicht? – „Strahlenbelastung und Nanotechnologie“

- 6.01** Geben Sie das **Absorptionsgesetz** für β - und γ -Strahlen für die Basen zwei und die eulersche Zahl der Exponentialfunktion an.
(Hinweis: $I(d) = I_0 \cdot a^{-k \cdot d}$, mit a = Basis; zwei Spezialfälle: $a = 2$; $a = e$)
- 6.02** Schreiben Sie die Definitionsgleichungen für die **Ionen-**, die **Energie-** und die **Äquivalenzdosis** an.
- 6.03** Geben Sie die Größenordnung von **Nanopartikeln** an.
- 6.04** Beschreiben Sie drei Beiträge zur **natürlichen Strahlenbelastung** und zwei Beiträge zur **künstlichen Strahlenbelastung**.
- 6.05** Berechnen Sie die **Halbwertsdicke** eines Absorbermaterials mit Schwächungskoeffizient μ . Ermitteln Sie den numerischen Wert für einen Schwächungskoeffizienten von $14/\text{cm}$.
- 6.06** Die **Halbwertsdicke** eines Absorbermaterials beträgt 1 mm. Berechnen Sie, nach welcher Dicke nur mehr a) 10 %, b) 1 %, c) ein Promille und d) 0,01 % der Anfangsintensität einer Strahlung vorhanden sind. Überprüfen Sie Ihre Berechnungen durch den $I(d)$ -Graphen.
- 6.07** Recherchieren Sie zum **Qualitätsfaktor** und die biologische Strahlungswirkung. Klären Sie dabei die Begriffe a) Submersionsdosis, b) Fall-out, c) Inhalationsdosis, d) Ingestionsdosis, e) somatische Strahlenschäden – akut und latent – und f) Dosimeter. Informieren Sie sich über Schutzzvorschriften für strahlenexponierte Personen.
- 6.08** Recherchieren Sie über **Fullerene** und versuchen Sie eine qualitative und quantitative Beschreibung.



D Physikalische Phänomene und Methoden

Im Kompetenzbereich D spannt sich der Bogen physikalischer Themen von einer komplexeren Beschreibung der **klassischen Mechanik** über die Beschreibung von **Wellenphänomenen** (insbesondere im Bereich der Optik und Akustik), die **Thermodynamik** sowie **Elektrodynamik** bis zur **modernen Physik**. In letzterem Bereich haben die Relativitätstheorie von Albert Einstein und die Quantenmechanik vor etwa hundert Jahren unser physikalisches Weltbild revolutioniert. Diese Theorien fordern uns und unser Denken – oft bis an die Grenze unseres Vorstellungsvermögens. Hier bewahrheitet sich die Metapher, dass unser Verständnis deswegen so weit reicht, weil wir „Zwerge auf den Schultern von Riesen sind“, wie es der geniale Isaac Newton formuliert hat.

- 1 Mechanik** Seite 194
- 2 Schwingungen und Wellen** Seite 201
- 3 Thermodynamik** Seite 270
- 4 Elektrodynamik** Seite 299
- 5 Moderne Physik** Seite 321



ISAAC NEWTON, 1642 BIS 1727,
ENGLISCHER PHYSIKER;
BEGRÜNDER DER KLASSISCHEN
MECHANIK UND DER KLASSI-
SCHEN GRAVITATIONSTHEORIE



Gottfried Wilhelm Leibniz hat die Differentialrechnung aus dem Tangentenproblem, das seit der Antike bekannt war, abgeleitet.

Tangentenproblem: Wie erhält man für eine gegebene Funktion die Tangentensteigungen?

Die **Differentialrechnung** ist eine fundamentale Disziplin der höheren Mathematik.



Zur newtonischen Schreibweise von Ableitungen:

$$v = \frac{ds}{dt} = \dot{s} \text{ und } k = \frac{df}{dx} = f'$$



Newton vermeidet „0/0“, wie unser Beispiel für $s(t) = t^2$ zeigt.

$$\begin{aligned} v &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{s(t + \Delta t) - s(t)}{\Delta t} \\ v &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(t + \Delta t)^2 - t^2}{\Delta t} \\ v &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{t^2 + 2 \cdot t \cdot \Delta t + (\Delta t)^2 - t^2}{\Delta t} \\ v &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta t \cdot (2 \cdot t + \Delta t)}{\Delta t} = 2t \end{aligned}$$

1 Mechanik

Die Mechanik nimmt in der gesamten klassischen Physik eine Sonderstellung ein. Sie wurde von **Sir Isaac Newton** mithilfe der von ihm entwickelten Differentialrechnung als erste physikalische Theorie in eine bis heute – für kleine Geschwindigkeiten im Vergleich zur Vakuumlichtgeschwindigkeit – gültige Form gebracht. 1687 erschien sein epochales Werk „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“, übersetzt: „Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie“. Der Titel vermittelt bereits die Bedeutung der Mathematik in den Abhandlungen Newtons.

1.1 Bewegungsgleichungen für Translationen

In NAWI I/II haben wir die drei newtonischen Axiome kennen- und anwenden gelernt. Das zweite Axiom, das dynamische Grundgesetz, in der Formulierung $F = m \cdot a$ für Translationen ist der Ausgangspunkt unserer Überlegungen für dieses Kapitel.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- das **dynamische Grundgesetz für Translationen** mit Differentialquotienten angeben;
- **Differentialgleichungen für Translationen** lösen;
- **Bewegungsgleichungen für Translationen** selbst aufstellen, auflösen und interpretieren.

Isaac Newton hat die **Differentialrechnung** aus dem Geschwindigkeitsproblem entwickelt. Er fragte sich, wie man für eine gegebene Weg-Zeit-Funktion die (Momentan-)Geschwindigkeit v für jeden Zeitpunkt t berechnen kann. Wir wiederholen dazu die Definition der mittleren Geschwindigkeit (v -quer) als Differenzenquotient aus Wegänderung und benötigter Zeit.

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad \text{bzw. vektoriell} \quad \vec{\bar{v}} = \frac{\vec{\Delta s}}{\Delta t}.$$

Wenn die Zeitintervalle Δt immer kleiner gewählt werden können, erhält man einen immer genaueren Wert für die (Momentan-)Geschwindigkeit v .

Newton definierte den Differentialquotienten $\frac{ds}{dt}$ (ds nach dt) als Grenzwert (Limes) des Differenzenquotienten $\frac{\Delta s}{\Delta t}$ für Δt gegen null, $\frac{ds}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}$.

Wir zeigen am Beispiel der gleichmäßigen Beschleunigung, wie Newton mit seiner epochalen Neuerung das Dividieren von null durch null vermeidet. Für die Weg-Zeit-Funktion $s(t) = t^2$ mit $s_0 = s(0 \text{ s}) = 0 \text{ m}$ berechnen wir in der Randspalte die Momentangeschwindigkeit v zur Zeit t .

Geschwindigkeitsfunktion

Die **Geschwindigkeitsfunktion** v ist die erste Ableitungsfunktion des Weges s nach der Zeit t , $v = \frac{ds}{dt}$. Newtonsche Schreibweise: $v = \dot{s}$.

Beispiel 1.1.01: Geschwindigkeitsfunktion

Ein Körper bewege sich gemäß der Weg-Zeit-Funktion s mit $s(t) = t^2 + 2t + 4$ in Meter für t aus dem Intervall $[0 \text{ s}; 5 \text{ s}]$. Wir vernachlässigen vorerst die Einheiten in $s(t)$ und berechnen die **Geschwindigkeitsfunktion** v mit

$$v(t) = \frac{ds}{dt} = \frac{d}{dt}(t^2 + 2t + 4) = 2t + 2. v$$
 nimmt linear mit t zu mit $v(0 \text{ s}) = 2 \text{ m/s}$.

Die mittlere Beschleunigung \bar{a} ist als Differenzenquotient aus Geschwindigkeitsänderung und benötigter Zeit definiert.

$$\bar{a} = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad \text{vektoriell} \quad \vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$

Wenn die Zeitintervalle Δt beliebig klein gewählt werden können, erhält man schließlich den genauen Wert für die (Momentan-)Beschleunigung $a = \frac{dv}{dt}$.

Ersetzen wir die Geschwindigkeit v durch den Differentialquotienten ds/dt , erhalten wir für die Beschleunigung die zweite Ableitung von s nach t , $a = \frac{d^2s}{dt^2}$.

Beschleunigungsfunktion

Die **Beschleunigungsfunktion** a ist die erste Ableitungsfunktion der Geschwindigkeitsfunktion v nach der Zeit t bzw. die zweite Ableitungsfunktion des Weges s nach der Zeit t ,

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2}. \text{ Newtonsche Schreibweise: } a = \dot{v} = \ddot{s}.$$

Beispiel 1.1.02: Beschleunigungsfunktion

Wir vertiefen Beispiel 1.1.01, indem wir die **Beschleunigungsfunktion** a berechnen. Zuerst schreiben wir die Weg-Zeit- und die Geschwindigkeit-Zeit-Funktion noch mit Einheiten an. $s(t) = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot t^2 + 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t + 4 \text{ m}$ und $v(t) = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot t + 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(2t + 2) = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Die Weg-Zeit-Funktion s beschreibt eine gleichmäßig beschleunigte Bewegung.

Das **dynamische Grundgesetz** können wir als

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \frac{d^2\vec{s}}{dt^2}$$

schreiben. Wenn die Masse m konstant ist, was in der klassischen Physik unter dem Begriff Massenerhaltung als fundamental angenommen wird, können wir schreiben:

$$\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

Wenn die Masse m nicht konstant ist, z. B. nimmt die Masse einer Rakete durch Verbrennen von Treibstoff ab, müssen wir die Produktregel für das Differenzieren anwenden und erhalten

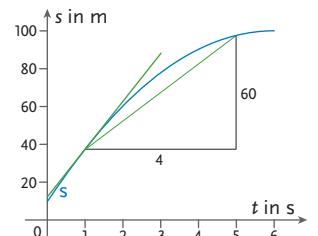
$$\vec{F} = \frac{d(m \cdot \vec{v})}{dt} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} + \vec{v} \cdot \frac{dm}{dt}.$$

Isaac Newton hat in seinen 1687 erschienenen Principia die Gestalt $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ für das dynamische Grundgesetz verwendet. Man kann behaupten, dass dieser Gigant der Physik bereits die Veränderlichkeit der Masse, die wir in der Relativitätstheorie und der Atom- und Kernphysik behandeln werden, vorhergesehen hat.

| Sekante | Tangente |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| Wegänderung Δs | Differenzielle Wegänderung ds |
| Benötigte Zeit Δt | Differenzielle Zeitänderung dt |
| $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$ | $v = \frac{ds}{dt}$ |

Gegenüberstellung von Differenzenquotient und Differentialquotient

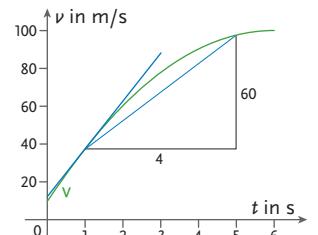
Eine gekrümmte **Wegfunktion** s :



Die **mittlere Geschwindigkeit** im Intervall $[1 \text{ s}; 5 \text{ s}]$ ist mit $\frac{60}{4} \text{ m/s} = 15 \text{ m/s}$ kleiner als die **Momentangeschwindigkeit** zum Zeitpunkt 1 s , die 25 m/s beträgt.

Anschaulich erhalten wir die **Momentangeschwindigkeit** v für $t = 1 \text{ s}$, indem wir den zweiten Messpunkt (im Diagramm $(5 \text{ s}|100 \text{ m})$) längs des Funktionsgraphen gegen den Punkt $(1 \text{ s}|40 \text{ m})$ verschieben. Dann wird aus der Sekantensteigung (Durchschnittsgeschwindigkeit) die Tangentensteigung (Momentangeschwindigkeit).

Eine gekrümmte **Geschwindigkeitsfunktion** v :



Die **mittlere Beschleunigung** im Intervall $[1 \text{ s}; 5 \text{ s}]$ ist mit $\frac{60}{4} \text{ m/s}^2 = 15 \text{ m/s}^2$ kleiner als die **Momentanbeschleunigung** zum Zeitpunkt 1 s , die 25 m/s^2 beträgt.



Bei der Kernspaltung und der Kernfusion ist die Gesamtmasse beispielsweise nicht konstant.



Impuls $\vec{p} = m \cdot \vec{v}$



Produktregel des Differenzierens:

$$\frac{d}{dt}(f \cdot g) = \frac{df}{dt} \cdot g + f \cdot \frac{dg}{dt}$$

Tritt in einer Gleichung eine oder mehrere Ableitungen einer zu bestimmenden Funktion f auf, so nennt man diese Gleichung eine **Differentialgleichung**.

Implizite Differentialgleichung erster Ordnung für die zu bestimmende Funktion f in Abhängigkeit von der Zeit t : $F(t, df/dt) = 0$.

Implizite Differentialgleichung zweiter Ordnung für die zu bestimmende Funktion f in Abhängigkeit von der Zeit t :
 $F(t, df/dt, d^2f/dt^2) = 0$.



Beim Integrieren einer Funktion f mit $y = f(t)$ kommt eine additive Integrationskonstante C hinzu, weil die Ableitung einer Konstanten C null ist.

$$\frac{d}{dt}(F + C) = \frac{dF}{dt} + \frac{dC}{dt} = f$$

$$\int f(t) \cdot dt = F(t) + C$$

Anders formuliert: Zwei verschiedene Stammfunktionen F_1 und F_2 einer Funktion f unterscheiden sich nur in einer Konstanten:
 $F_1 = F_2 + C$.

Beispiel 1.1.03: Kraftfunktion

Eine Kugel der Masse $m = 1 \text{ kg}$ bewegt sich entlang einer Geraden gemäß der Funktion s mit $s(t) = t^3 + 2t^2 + 4t + 2$ in Meter für t aus dem Intervall $[0 \text{ s}; 2 \text{ s}]$.

Wir berechnen die zeitabhängige Kraftfunktion F .

$$F(t) = m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = 1 \text{ kg} \cdot \frac{d^2}{dt^2}(t^3 + 2t^2 + 4t + 2) = 1 \text{ kg} \cdot \frac{d}{dt}(3t^2 + 4t + 4)$$

$$F(t) = 1 \text{ kg} \cdot (6t + 4)$$

Für die Zeit $t = 0 \text{ s}$ ergibt sich $F(0) = 4 \text{ N}$ und für $t = 2 \text{ s}$ ergibt sich $F(2) = 16 \text{ N}$.

Bewegungsgleichung

Die **Differentialgleichung** $m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} = \vec{F}$ nennt man **Bewegungsgleichung** einer Punktmasse m unter dem Einfluss der Kraft \vec{F} . Die Integrationskonstanten bei der Berechnung von v bzw. s können durch (Anfangs-)Bedingungen bestimmt werden.

Lösen wir die Bewegungsgleichung nach der Geschwindigkeitsfunktion auf, so müssen wir eine **Differentialgleichung erster Ordnung** lösen. Wollen wir die Wegfunktion s berechnen, ist eine **Differentialgleichung zweiter Ordnung** zu lösen.

Beispiel 1.1.04: Bewegungsgleichung für eine Punktmasse – Trägheitssatz

Eine gedachte Punktmasse m sei keiner Kraft unterworfen. Wir lösen die zugehörige Bewegungsgleichung $m \cdot \frac{d^2s}{dt^2} = 0$.

Durch einmalige Integration nach t erhalten wir $\frac{ds}{dt} = C_1$. Die Integrationskonstante C_1 kann durch eine Bedingung – z. B. $v(t_0) = v_0$ – festgelegt werden. Eine zweite Integration liefert $s(t) = C_1 \cdot t + C_2$.

Die Integrationskonstante C_2 kann durch die Bedingung $s(t_0) = s_0$ festgelegt werden, sodass wir die Lösungsfunktion $s(t) = v_0 \cdot t + s_0$ erhalten.

Die Gleichung $s(t) = v_0 \cdot t + s_0$ bedeutet, dass sich die gedachte Punktmasse mit der Anfangsgeschwindigkeit v_0 gleichförmig bewegt. Damit ist der **Trägheitssatz** bestätigt, der besagt, dass ein Körper im Zustand der Ruhe oder gleichförmigen Bewegung verharrt, wenn keine Kraft auf ihn einwirkt.

Dass das erste newtonsche Axiom – das Trägheitsaxiom – eine Folgerung aus dem zweiten Axiom – dem dynamischen Grundgesetz – ist, haben wir bereits in NAWI I/II festgestellt.

Beispiel 1.1.05: Bewegungsgleichung für den lotrechten Wurf nach oben

Wir stellen die Bewegungsgleichung für einen von der Anfangsposition h_0 mit v_0 lotrecht nach oben geworfenen Körper im Vakuum auf. Die einzige auf den Körper im Vakuum nach dem Abwurf wirkende Kraft ist die in die negative h -Richtung weisende Gewichtskraft F_G .

Die Bewegungsgleichung ist daher $m \cdot \frac{d^2h}{dt^2} = -m \cdot g$.

Durch einmalige Integration nach t erhalten wir $\frac{dh}{dt} = -g \cdot t + C_1$. Die Integrationskonstante C_1 ist durch die Anfangsbedingung $v(0) = v_0$ festgelegt. Eine zweite Integration liefert $h(t) = -\frac{g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + C_2$.

Die Integrationskonstante C_2 ist durch die Anfangsbedingung $h(0) = h_0$ festgelegt, sodass wir die Lösungsfunktion $h(t) = -\frac{g}{2} \cdot t^2 + v_0 \cdot t + h_0$ erhalten. Diese Gleichung kennen wir aus NAWI I/II für eine von der Anfangsposition h_0 mit v_0 lotrecht nach oben geworfene und mit g gleichmäßig in die negative h -Richtung beschleunigte Masse.

Im nachfolgenden Kapitel werden Schwingungen und Wellen behandelt. Als anschauliche und der Alltagserfahrung entnommene Objekte untersuchen wir dabei die periodischen Bewegungen von Pendeln. Im Kapitel D, 2.1.1 werden wir das Federpendel analysieren.

Beispiel 1.1.06: Reibungsfreies Federpendel

Wir stellen die Bewegungsgleichung für eine Masse m auf, die an einer Feder mit der Federkonstante D vertikal aufgehängt ist, wenn die Reibungsverluste vernachlässigt werden können. Auf die Masse m wirken in jedem Augenblick die Gewichtskraft F_G und die Federkraft F_F .

Legen wir den Nullpunkt der y -Achse in die Gleichgewichtslage des ruhenden Federpendels, so können wir den Einfluss der Gewichtskraft eliminieren. Damit bleibt als Gesamtkraft die Federkraft, die proportional zur Auslenkung aus der Gleichgewichtslage ist, übrig.

Die Bewegungsgleichung ist $m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = -D \cdot y$.

Das ist eine **Differentialgleichung zweiter Ordnung** mit konstanten Koeffizienten, die man mit einem Exponentialansatz $y(t) = C \cdot e^{\lambda t}$ löst. Einsetzen der Funktion und ihrer zweiten Ableitungsfunktion liefert $m \cdot \lambda^2 = -D$ mit den beiden konjugiert komplexen Lösungen bzw. Eigenwerten

$$\lambda_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{D}{m}} \cdot j.$$

Die imaginäre Einheit j ist gemäß $j^2 = -1$ definiert. Der Wurzelterm hat die Einheit $1/s$ und ist die Eigenkreisfrequenz ω des Federpendels.

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$$

Die Lösungsfunktion der Differentialgleichung ist dann mithilfe der eulerschen Formel $e^{j \cdot \omega \cdot t} = \cos(\omega \cdot t) + j \cdot \sin(\omega \cdot t)$

$$y(t) = C_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + C_2 \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

Die beiden Integrationskonstanten erhalten wir aus den Anfangsbedingungen. Das **reibungsfreie Federpendel** schwingt **sinusförmig** (harmonisch) um seine Gleichgewichtslage.



Die träge Masse – als Widerstand gegen eine Beschleunigung – **und die schwere Masse**, die für die Gewichtskraft verantwortlich ist, sind identisch. Daher verzichten wir auf die Indizes t und s bei den Massen.



Pendel siehe Kap. D, 2.1.

Eine **Differentialgleichung zweiter Ordnung** für eine Funktion y in Abhängigkeit von einer Variablen t mit konstanten Koeffizienten löst man mit einem Exponentialansatz $y(t) = C \cdot e^{\lambda t}$.

Für die erste Ableitung von y nach t ergibt sich mit der Exponential- und der Kettenregel für das Differenzieren

$$dy/dt = \lambda \cdot C \cdot e^{\lambda t} = \lambda \cdot y(t).$$

Die zweite Ableitung ergibt daher $d^2y/dt^2 = \lambda^2 \cdot C \cdot e^{\lambda t} = \lambda^2 \cdot y(t)$.



Exponentialregel des Differenzierens:

$$\frac{d}{dt}(e^{f(t)}) = e^{f(t)} \cdot \frac{df}{dt}$$



Kettenregel des Differenzierens:

$$\frac{d}{dt} f(g(t)) = \frac{df}{dt}(g(t)) \cdot \frac{dg}{dt}$$

In Worten: äußere Funktion, abgeleitet und ausgewertet an der inneren Funktion, multipliziert mit der Ableitung der inneren Funktion. Ganz kurz: äußere mal innere Ableitung.



Ziele erreicht? – „Bewegungsgleichungen für Translationen“

- 1.1.01 Geben Sie das **dynamische Grundgesetz der Translation** als Differentialgleichung für die Geschwindigkeits- und Wegfunktion an.
- 1.1.02 Geben Sie die **Bewegungsgleichung** für einen von der Position h_0 lotrecht mit v_0 nach unten **geworfenen Körper** im Vakuum an. Berechnen Sie die Geschwindigkeits- und Wegfunktion.

Zur Aufgabe 1.1.04: Eine geschwindigkeitsproportionale Kraft wird in einer Bewegungsgleichung durch $k \cdot dy/dt$ berücksichtigt.

Zur Aufgabe 1.1.06: Das **Gesetz von George Gabriel Stokes** beschreibt die Abhängigkeit der Reibungskraft sphärischer Körper von ihrem Radius, der Viskosität des Mediums, in dem sich der Körper befindet, und der Geschwindigkeit des Körpers.

- 1.1.03** Verwenden Sie die Lösungsfunktion aus Beispiel 1.1.06 und bestimmen Sie die **Integrationskonstanten** für ein **Federpendel** mit einer Masse von 400 g, einer Federkonstante von 1 N/dm und den Anfangsbedingungen $y(0) = 10 \text{ cm}$ und $v(0) = 0 \text{ cm/s}$. Stellen Sie zwei volle Perioden der Schwingung grafisch dar. Achten Sie auf Beschriftung und Skalierung der Achsen.
- 1.1.04** Stellen Sie die **Bewegungsgleichung** für ein **Federpendel** mit Masse m und Federkonstante D auf. Berücksichtigen Sie dabei eine geschwindigkeitsproportionale Reibungskraft.
- 1.1.05** Geben Sie die **Bewegungsgleichung** für eine waagrecht gelagerte **Masse** m an, die an einer Feder mit der Federkonstante D befestigt ist. Lösen Sie die Bewegungsgleichung, wenn die Masse zur Zeit $t = 0 \text{ s}$ um 5 cm aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt ist, $v(0 \text{ s}) = 10 \text{ cm/s}$ ist und Reibungsverluste vernachlässigt werden können.
- 1.1.06** Berechnen Sie die **Lösungsfunktion** der **Bewegungsgleichung** für eine auf der Erdoberfläche frei fallende Stahlkugel von zwei Zentimeter Durchmesser. Berücksichtigen Sie den Luftwiderstand durch die stokesche Reibungskraft. Recherchieren Sie über das stokessche Gesetz und die Viskosität von Luft.

1.2 Bewegungsgleichungen für Rotationen

Die Bedeutung von Rotationsbewegungen im Alltag wird durch die Vielzahl von rollenden Verkehrsmitteln demonstriert. In vielen technischen Geräten sind rotierende Bauteile eingebaut. Wir werden in diesem Kapitel die Differenzialgleichung für Rotationen aufstellen und exemplarisch lösen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- das **dynamische Grundgesetz für Rotationen** mit Differenzialquotienten angeben;
- **Differenzialgleichungen für Rotationen** lösen;
- **Bewegungsgleichungen für Rotationen** selbst aufstellen, auflösen und interpretieren.

Die mittlere Winkelgeschwindigkeit $\bar{\omega}$ (ω -quer) ist der Differenzenquotient aus Winkeländerung und benötigter Zeit, $\bar{\omega} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$.

Wenn die Zeitintervalle Δt immer kleiner gewählt werden können, erhält man einen immer genaueren Wert für die augenblickliche Winkelgeschwindigkeit ω .

Winkelgeschwindigkeitsfunktion

Die **Winkelgeschwindigkeitsfunktion** ω ist die erste Ableitungsfunktion des Winkels φ nach der Zeit t , $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$. Newtonsche Schreibweise: $\omega = \dot{\varphi}$.

| Translation | Rotation |
|---------------------|--------------------------------|
| Weg s | Winkel φ |
| Geschwindigkeit v | Winkelgeschwindigkeit ω |
| Beschleunigung a | Winkelbeschleunigung α |

Translations- und entsprechende Drehgrößen

Beispiel 1.2.01: Winkelgeschwindigkeitsfunktion

Ein starrer Körper drehe sich um eine Achse gemäß der Winkel-Zeit-Funktion φ mit $\varphi(t) = t^2 + 2t + 4$ in Radiant für t aus dem Intervall $[0 \text{ s}; 5 \text{ s}]$. Wir berechnen die **Winkelgeschwindigkeitsfunktion** ω mit

$$\omega(t) = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{d}{dt}(t^2 + 2t + 4) = 2t + 2.$$

Die Winkelgeschwindigkeit nimmt also linear mit der Zeit zu und hat zu Beginn des Beobachtungszeitraums den Wert $2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

Die mittlere Winkelbeschleunigung $\bar{\alpha}$ ist als Differenzenquotient aus Winkelgeschwindigkeitsänderung und benötigter Zeit definiert, $\bar{\alpha} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$.

Die momentane Winkelbeschleunigung α ist der Differentialquotient von Winkelgeschwindigkeit und Zeit, $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$. Ersetzen wir die Winkelgeschwindigkeit ω durch den Differentialquotienten $\frac{d\varphi}{dt}$, erhalten wir für die Winkelbeschleunigung die zweite Ableitung von φ nach t , $\alpha = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$.

Winkelbeschleunigungsfunktion

Die **Winkelbeschleunigungsfunktion** α ist die erste Ableitungsfunktion der Winkelgeschwindigkeitsfunktion ω nach der Zeit t bzw. die zweite Ableitungsfunktion des Winkels φ nach der Zeit t , $\alpha = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$.

Newton'sche Schreibweise: $\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\varphi}$.

Beispiel 1.2.02: Winkelbeschleunigungsfunktion

Wir vertiefen Beispiel 1.2.01, indem wir die Winkelbeschleunigungsfunktion α berechnen.

$$\alpha(t) = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d}{dt}(2t + 2) = 2$$

Die Winkel-Zeit-Funktion φ mit $\varphi(t) = t^2 + 2t + 4$ beschreibt eine gleichmäßig beschleunigte Drehbewegung mit Anfangswinkelgeschwindigkeit $2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$ und Anfangsdrehwinkel 4 rad .

Das dynamische Grundgesetz der Rotation können wir als

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\alpha} = J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} = J \cdot \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2} = \frac{d\vec{L}}{dt}$$

schreiben, wenn wir das Trägheitsmoment als konstant voraussetzen. Wir nehmen damit eine nicht veränderbare Drehachse während einer bestimmten Zeit an.

Bewegungsgleichung

Die **Differentialgleichung** $J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} = J \cdot \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2} = \vec{M}$ nennt man **Bewegungsgleichung** eines drehbar gelagerten Körpers mit dem Trägheitsmoment J unter dem Einfluss des Drehmoments \vec{M} . Die Integrationskonstanten bei der Berechnung von ω bzw. φ können durch (Anfangs)Bedingungen bestimmt werden.

Zu Beispiel 1.2.01: die Funktion $\varphi(t) = t^2 + 2t + 4$

lautet mit Einheiten

$$\varphi(t) = 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot t^2 + 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot t + 4 \text{ rad}$$

und entsprechend

$$\omega(t) = 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot t + 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}}.$$

| Translation | Rotation |
|-------------------------|------------------------------------|
| Geschwindigkeit | Winkelgeschwindigkeit |
| $v = \frac{ds}{dt}$ | $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$ |
| Beschleunigung | Winkelbeschleunigung |
| $a = \frac{dv}{dt}$ | $\alpha = \frac{d\omega}{dt}$ |
| $a = \frac{d^2s}{dt^2}$ | $\alpha = \frac{d^2\varphi}{dt^2}$ |

Translations- und entsprechende Drehgrößen als Differentialquotienten

| Translation | Rotation |
|---|---|
| Kraft \vec{F} | Drehmoment \vec{M} |
| Masse m | Trägheitsmoment J |
| Impuls \vec{p} | Drehimpuls \vec{L} |
| Dynamisches Grundgesetz | Dynamisches Grundgesetz |
| $\vec{F} = m \cdot \vec{a}$ | $\vec{M} = J \cdot \vec{\alpha}$ |
| $\vec{F} = m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt}$ | $\vec{M} = J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt}$ |
| $\vec{F} = m \cdot \frac{d^2\vec{s}}{dt^2}$ | $\vec{M} = J \cdot \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}$ |
| $\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt}$ | $\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt}$ |

Translations- und entsprechende Drehgrößen und die Bewegungsgleichungen

Zu Beispiel 1.2.03: die Funktion $\varphi(t) = t^3 + 2t^2 + 4t + 2$

lautet mit Einheiten

$$\varphi(t) = 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}^3} \cdot t^3 + 2 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \cdot t^2 + 4 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot t + 2 \text{ rad}$$

$$\varphi(t) = \frac{1}{\text{s}^3} \cdot t^3 + \frac{2}{\text{s}^2} \cdot t^2 + \frac{4}{\text{s}} \cdot t + 2$$

Beispiel 1.2.03: Drehmomentfunktion

Ein Stab mit einem Trägheitsmoment $J = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ rotiert um eine feste Achse. Die Winkelfunktion φ mit $\varphi(t) = t^3 + 2t^2 + 4t + 2$ in Radian für t aus dem Intervall $[0 \text{ s}; 2 \text{ s}]$ gibt den Winkel des Stabes zu einer festen Achse an. Wir berechnen das zeitabhängige Drehmoment M .

$$M(t) = J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{d^2}{dt^2}(t^3 + 2t^2 + 4t + 2) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \frac{d}{dt}(3t^2 + 4t + 4)$$

$$M(t) = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot (6t + 4)$$

Für $t = 0 \text{ s}$ ergibt sich ein Drehmoment von $M(0) = 4 \text{ N} \cdot \text{m}$ und für $t = 2 \text{ s}$ ist das Drehmoment $M(2) = 16 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Beispiel 1.2.04: Reibungsfreies physisches Pendel

Wir stellen die Bewegungsgleichung für ein physisches Pendel mit Trägheitsmoment J auf, das in einem Punkt außerhalb des Schwerpunkts reibungsfrei drehbar gelagert ist. Als Anfangsbedingungen wählen wir $\varphi(0) = 0 \text{ rad}$ und $\omega(0 \text{ s}) = 1 \text{ rad/s}$. Das wirkende Drehmoment ergibt sich durch das Produkt aus der Gewichtskraft F_G und dem Normalabstand des Gewichtskraftvektors zur Schwerlinie durch die Drehachse.

$$\text{Die Bewegungsgleichung ist daher } J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -F_G \cdot s \cdot \sin(\varphi).$$

Dabei bezeichnet s den Abstand des Schwerpunkts von der Drehachse. Das negative Vorzeichen berücksichtigt die rücktreibende Wirkung des Drehmoments zur Gleichgewichtslage. Um die Differentialgleichung elementar näherungsweise lösen zu können, beschränken wir uns auf sehr kleine Auslenkungswinkel φ aus der Gleichgewichtslage, sodass wir die Sinusfunktion durch ihr Argument ersetzen können.

$$J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} \approx -m \cdot g \cdot s \cdot \varphi$$

Nun haben wir eine Differentialgleichung (Dgl) zweiter Ordnung mit konstanten Koeffizienten vorliegen, die wir mit dem unbestimmten Ansatz $\varphi(t) = C \cdot e^{i\omega t}$ lösen.

Einsetzen der Funktion und ihrer zweiten Ableitungsfunktion liefert $J \cdot \lambda^2 \approx -m \cdot g \cdot s$. Auflösen nach λ liefert die beiden konjugiert komplexen Lösungen bzw. Eigenwerte

$$\lambda = \pm \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot s}{J}} \cdot j.$$

Die imaginäre Einheit j ist gemäß $j^2 = -1$ definiert. Der Wurzelterm besitzt die Einheit $1/\text{s}$ und ist die Eigenkreisfrequenz ω des Drehpendels,

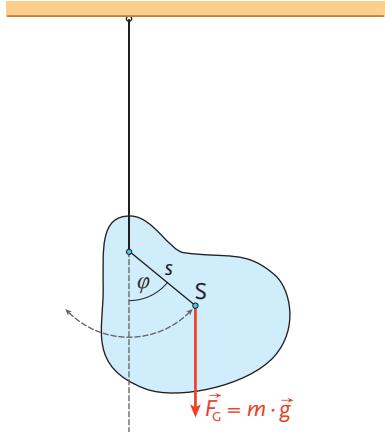
$$\omega = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot s}{J}}.$$

Die Lösungsfunktion der Dgl ist dann $\varphi(t) = C_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + C_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)$. Die beiden Integrationskonstanten sind durch die Anfangsbedingungen festgelegt.

$$\varphi(0) = C_1 \cdot \sin(\omega \cdot 0) + C_2 \cdot \cos(\omega \cdot 0) = C_2 = 0$$

$$\omega(0) = \omega \cdot C_1 \cdot \cos(\omega \cdot 0) = \sqrt{\frac{m \cdot g \cdot s}{J}} \cdot C_1 = 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$C_1 = \sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot s}}$$



Physisches Pendel

$\sin(\varphi) \approx \varphi$ für kleine Winkel

Zur newtonschen Schreibweise von Ableitungen:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = \ddot{s}$$

$$\frac{d^2f}{dx^2} = f''$$

Damit erhalten wir die Lösungsfunktion

$$\varphi(t) = C_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot s}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{m \cdot g \cdot s}{J}} \cdot t\right).$$

Das reibungsfreie physische Pendel schwingt sinusförmig (harmonisch) um seine Gleichgewichtslage.



Ziele erreicht? – „Bewegungsgleichungen für Rotationen“

- 1.2.01** Geben Sie das **dynamische Grundgesetz der Rotation** als Differenzialgleichung für die Winkelgeschwindigkeits- und Winkelfunktion an.
- 1.2.02** Verwenden Sie die Lösungsfunktion aus Beispiel 1.2.04. Bestimmen Sie die **Integrationskonstanten** für ein **physisches Pendel** mit einem Trägheitsmoment von $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, einer Masse von 10 kg und einem Schwerpunktabstand von 5 cm mit den Anfangsbedingungen $\varphi(0) = 10 \text{ rad}$ und $\omega(0) = 0 \text{ rad/s}$. Stellen Sie zwei volle Perioden der Schwingung grafisch dar. Achten Sie auf Beschriftung und Skalierung der Achsen.
- 1.2.03** Stellen Sie die **Bewegungsgleichung** für ein **physisches Pendel** mit Masse m , Trägheitsmoment J und Schwerpunktabstand s auf. Berücksichtigen Sie dabei ein geschwindigkeitsproportionales bremsendes Drehmoment.

2 Schwingungen und Wellen

In Österreich hat das Läuten der Pummerin, der größten Glocke Österreichs, zu Neujahr Tradition. Das Schwingen und Läuten dieser drittgrößten Glocke in West- und Mitteleuropa mit einer Masse von etwa 20 Tonnen fasziniert Alt und Jung. Glockenklang und allgemein Musik entsteht bei der Überlagerung von Schwingungen. Die Alltagsbegriffe Tonhöhe und Lautstärke können physikalisch definiert werden.



2.1 Schwingungen



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

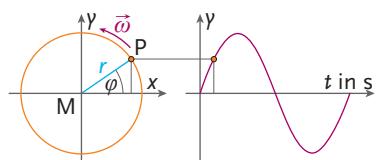
- die Begriffe lokale und fortschreitende Bewegung unterscheiden;
- die Bedingung für das Zustandekommen einer **harmonischen Schwingung** nennen;
- zwischen **gedämpfter** und **ungedämpfter Schwingung** unterscheiden;
- die **Periodendauer** definieren und eine Gleichung einer (un)gedämpften freien Schwingung angeben;
- die **Periodendauerformeln** für Feder-, Faden-, Drehpendel und physische Pendel angeben und anwenden;
- parallele und senkrechte Schwingungen **überlagern**.

Die Pummerin wurde nach dem Zweiten Weltkrieg im Jahr 1951 aus dem Metall ihrer Vorgängerin in St. Florian in Oberösterreich erneut gegossen

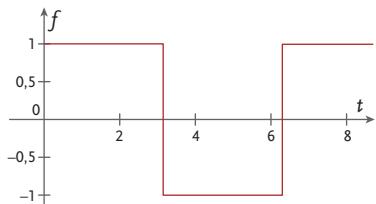


Abbildung zu Beispiel 2.1.01: Jeder der drei Zeiger hat eine eigene Periodendauer.

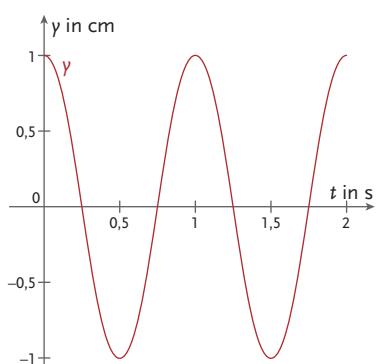
! $\frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \omega$
Zusammenhang zwischen Periodendauer T , Frequenz $f = \frac{1}{T}$ und Winkelgeschwindigkeit ω .



Eine Sinusschwingung als Projektion einer zur Zeit $t = 0$ s im Punkt $(r | 0)$ startenden gleichförmigen Kreisbewegung



Eine 2π -periodische Rechteckschwingung



Skizze zu Beispiel 2.1.02: Eine harmonische Schwingung mit einer Periodendauer von einer Sekunde und einer Amplitude von einem Zentimeter

Schwingungen

Schwingungen sind **periodische Vorgänge**, bei denen sich der Ablauf einer lokalen Bewegung regelmäßig in der Zeit wiederholt. Eine **lokale Bewegung** liegt vor, wenn ein Körper in der Umgebung eines festen Ortes bleibt und sich nicht wie bei einer fortschreitenden Bewegung von einem festen Ort entfernt.

Die bereits in NAWI I/II behandelte **Rotation** ist ein anschauliches Beispiel einer lokalen periodischen Bewegung. Ein um eine feste Achse mit konstanter Winkelgeschwindigkeit rotierender Körper ist nach einer Periode in derselben Position (demselben Zustand) wie vor der Umlaufzeit.

Periodendauer T und Frequenz f

Die kürzeste Zeit zwischen zwei exakt gleichen Zuständen nennt man **Periodendauer, Periode bzw. Umlaufzeit T** . Mathematisch beschreibe eine Funktion $f(t)$ einen zeitabhängigen Zustand. Dann gilt für die Periodendauer T : $f(t) = f(t + z \cdot T)$, wobei z eine ganze Zahl ist.

Der Kehrwert (Reziproker) der Periodendauer T ist die Frequenz f . $f = \frac{1}{T}$.

Beispiel 2.1.01: Analoge Uhr

Die Periodendauer des Sekundenzeigers einer analogen Uhr beträgt 60 Sekunden. Die des Minutenzeigers beträgt 60 Minuten und die des Stundenzeigers 12 Stunden.

Vorerst werden nur Schwingungen behandelt, deren grafische Darstellung durch eine allgemeine **Sinusfunktion** gelingt.

Harmonische Schwingung

Eine Schwingung heißt **harmonisch**, wenn die momentane Auslenkung y aus der Gleichgewichtslage durch die Gleichung

$$y(t) = r \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0\right) = r \cdot \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0) = r \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

beschrieben wird. Dabei ist T die **Perioden- oder Schwingungsdauer** und f die Frequenz. Die maximale Auslenkung r nennt man die **Amplitude** und φ_0 den **Nullphasenwinkel**. In der Gleichgewichtslage verschwindet die Vektorsumme aller Kräfte.

Rechteckschwingungen und **Säge Zahnschwingungen** sind Beispiele für nicht harmonische Schwingungen.

Beispiel 2.1.02: Spezielles Federpendel

Für ein reibungsfreies Federpendel mit einer Periodendauer von einer Sekunde, das zur Zeit $t = 0$ s im oberen Umkehrpunkt startet ($y(0) = r$), gilt die Schwingungsgleichung

$$y(t) = r \cdot \sin(2\pi \cdot t + \pi/2) = r \cdot \cos(2\pi \cdot t).$$

Eine harmonische Schwingung kann als Projektion einer gleichförmigen Kreisbewegung auf eine Ebene dargestellt werden.

Wir betrachten einen Punkt P , der mit konstanter Winkelgeschwindigkeit ω im Abstand r um den Koordinatenursprung kreist.

Für die y-Koordinate des Punktes P ergibt sich in Abhängigkeit von der Zeit t :

$$y(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t), \text{ falls } y(0 \text{ s}) = 0 \text{ m.}$$

Seine Bahngeschwindigkeit $v = \omega \cdot r$ kann in eine Komponente in x- und eine in y-Richtung zerlegt werden: $v_y(t) = \omega \cdot r \cdot \cos(\omega \cdot t)$.

Damit der Punkt eine Kreisbahn beschreibt, muss auf ihn die zum Mittelpunkt gerichtete Zentripetalkraft $F = m \cdot a = m \cdot \omega^2 \cdot r$ wirken. Die Zentripetalbeschleunigung lässt sich ebenfalls mithilfe der Winkelfunktionen in zwei Komponenten zerlegen: $a_y(t) = -\omega^2 \cdot r \cdot \sin(\omega \cdot t)$.

Ersetzt man $r \cdot \sin(\omega \cdot t)$ durch $y(t)$, erhält man die Bedingung für eine harmonische Schwingung.

Bedingung für eine harmonische Schwingung – lineares Kraftgesetz

Wenn die Beschleunigung a_y zur Auslenkung y direkt proportional und entgegengesetzt gerichtet ist, erfolgt die Schwingung **harmonisch**.
 $a_y(t) \sim -y(t)$.

Multipliziert man die Gleichung mit der Masse m , ergibt sich die analoge Bedingung, dass die zur Gleichgewichtslage zurücktreibende Kraft proportional zur Auslenkung aus der Gleichgewichtslage sein muss. Man spricht wegen des **hooke'schen Kraftgesetzes** von einer elastischen Kraft. Das Produkt aus dem Quadrat der Winkelgeschwindigkeit bzw. der Kreisfrequenz ω^2 und der Masse m heißt Richtgröße D .

Richtgröße

Richtgröße $D = \omega^2 \cdot m$.

$$\text{Einheit der Richtgröße: } [D] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2} = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

Will man den Verlauf der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfunktion einer harmonischen Schwingung darstellen, muss man lediglich die aus der Kinematik bekannten Beziehungen $v = \omega \cdot r$ und $a = \omega^2 \cdot r$ verwenden. Die Momentangeschwindigkeit verschwindet in den Umkehrpunkten und die Momentanbeschleunigung ist in den Gleichgewichtsdurchgängen null. Weil $y(t)$, $v(t)$ und $a(t)$ zudem dieselbe Periodendauer haben, ergeben sich die Geschwindigkeits- und die Beschleunigungsfunktion für harmonische Schwingungen wie im Beispiel 2.1.03 ausgeführt.

Mithilfe der Differentialrechnung ergibt sich $v(t)$ durch einmaliges Differenzieren von $y(t)$ nach t und $a(t)$ durch zweimaliges Differenzieren von $y(t)$ nach t .

Beispiel 2.1.03: Spezielles Federpendel

Für ein reibungsfreies Federpendel mit einer Periodendauer von einer Sekunde, das zur Zeit $t = 0 \text{ s}$ einen Dezimeter oberhalb der Gleichgewichtslage startet, gilt die Schwingungsgleichung

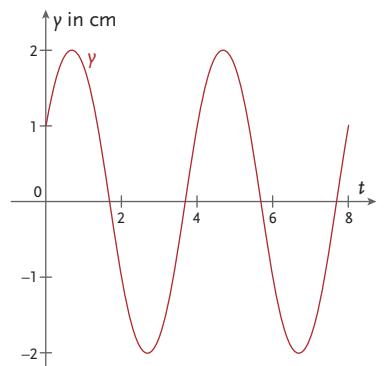
$$y(t) = r \cdot \sin\left(2\pi \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) = 10 \cdot \cos(2\pi \cdot t) \cdot \text{cm.}$$

Daher erhält man für die Geschwindigkeitsfunktion

$$v(t) = \omega \cdot r \cdot \sin(2\pi \cdot t + \pi) = -20\pi \cdot \sin(2\pi \cdot t) \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$$

und für die Beschleunigungsfunktion

$$a(t) = \omega^2 \cdot r \cdot \sin\left(2\pi \cdot t + \frac{3\pi}{2}\right) = -40\pi^2 \cdot \cos(2\pi \cdot t) \cdot \text{cm} \cdot \text{s}^{-2}.$$



Die Funktion y mit

$$y(t) = 2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{4} \cdot t + \frac{\pi}{6}\right) \cdot \text{cm}$$

hat eine Periodendauer von 4 Zeiteinheiten, eine Amplitude von 2 cm und einen Nullphasenwinkel von $\frac{\pi}{6}$ Radian.



Das hooke'sche Kraftgesetz $\Delta F = -D \cdot \Delta y$ wurde bereits in NAWI I/II behandelt. Damit gilt für die Richtgröße

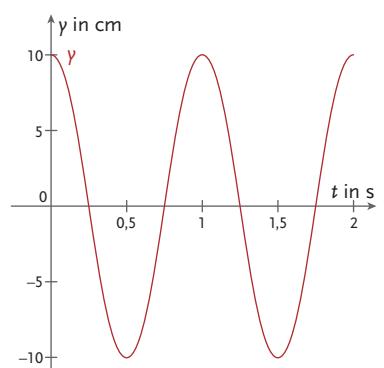
$$D = \left| \frac{\Delta F}{\Delta y} \right|$$



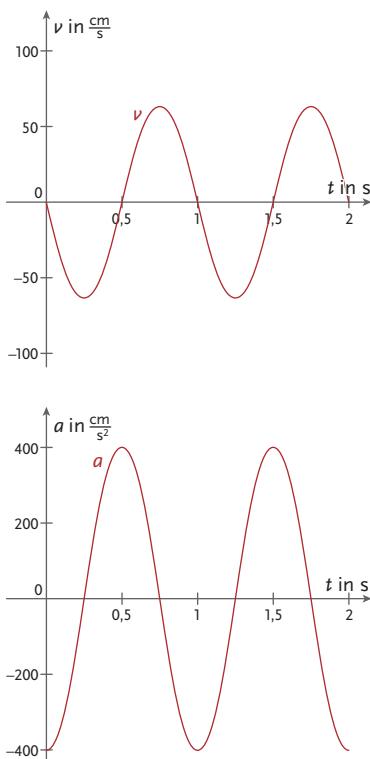
$$v(t) = \frac{dy}{dt}(t)$$

$$a(t) = \frac{dv}{dt}(t)$$

$$a(t) = \frac{d^2y}{dt^2}(t)$$



Das y-t-Diagramm für das Federpendel aus Beispiel 2.1.03



Skizzen zu Beispiel 2.1.03: Das v-t- und a-t-Diagramm einer harmonischen Schwingung mit $T = 1 \text{ s}$ und $r = 10 \text{ cm}$

Periodendauer einer harmonischen Schwingung

Wirkt auf einen Körper der Masse m eine **elastische Kraft**

$$F = -D \cdot y$$

mit der Richtgröße D in y-Richtung, so führt der Körper eine **harmonische Schwingung** in y-Richtung gemäß

$$y(t) = r \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{D}{m}} \cdot t + \varphi_0\right) \text{ aus.}$$

Für die **Periodendauer T** gilt dann wegen $T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}} \text{ und für die Frequenz } f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{D}{m}}.$$

Die Periodendauer bzw. Schwingungsdauer eines harmonisch schwingenden Körpers erhalten wir auch aus seiner Bewegungsgleichung. Ohne Berücksichtigung der Reibung gilt die Differenzialgleichung

$$m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} + D \cdot y = 0$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} + \frac{D}{m} \cdot y = 0$$

mit der allgemeinen Lösung

$$y(t) = a \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{D}{m}} \cdot t\right) + b \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{D}{m}} \cdot t\right).$$

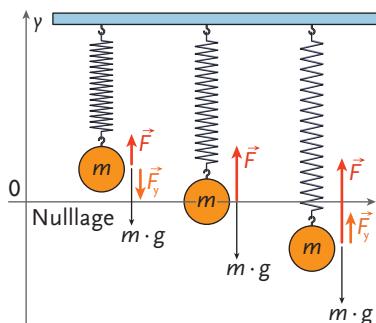
$$\text{Mit } T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$\text{folgt die obige Formel } T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}.$$

Im Alltag begegnen uns als einfache **mechanische Pendel** Feder-, Faden-, Drehpendel und physische Pendel, die nachfolgend einzeln beschrieben werden.

2.1.1 Federpendel

Ist der Kofferraum eines Pkw mit zu großer Masse – z. B. zu vielen Zementsäcken – gefüllt, werden die Stoßdämpfer über Gebühr belastet. Bei Bodenunebenheiten kann es bei entsprechend stärkerer äußerer Kraft zu stärkeren und vor allem langsameren Schwingungen als ohne zusätzliche Beladung des Kofferraums kommen.



Die Skizze zeigt ein Federpendel samt wirkenden Kräften oberhalb, in und unterhalb der Gleichgewichtslage. Die resultierende Kraft F_y ist stets der Auslenkung y aus der Gleichgewichtslage entgegengesetzt gerichtet.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die beiden Parameter eines **Federpendels** angeben;
- die Abhängigkeit der **Periodendauer** eines Federpendels von seinen Parametern experimentell untersuchen;
- die **Periodendauer** eines Federpendels berechnen.

Bei einem Federpendel hängt eine Masse m an einer Feder mit der Federkonstante D . Die Federmasse m_{Feder} ist verschwindend klein gegen m , also $m_{\text{Feder}} \ll m$. In der Gleichgewichtslage (Nulllage) verschwindet die Vektorsumme aus Gewichts- und Federkraft.

Versuch 2.1.01: Parameter des Federpendels

Wir beladen eine sehr leichte Feder mit einer Federkonstante von 20 N/m einmal mit einer Masse von 20 Gramm und andermal mit 80 Gramm. Wenn wir die Schwingungsdauer jeweils messen, erhalten wir etwa ein Schwingungsdauerverhältnis von 1 : 2.

Wenn also die Masse vervierfacht wird, verdoppelt sich die Schwingungs- bzw. Periodendauer.

Wir wählen als Kurzschreibweise den „Geht-über-in-Pfeil“ (\rightarrow).

$$m \rightarrow 4m: T \rightarrow 2T$$

Beladen wir **zwei unterschiedlich harte Federn** mit $D_1 = 2D_2$ nacheinander mit der gleichen Masse m ($> m_{\text{Feder}}$), so ergibt sich ein Schwingungsdauerverhältnis von rund 1 : 1,4.

$$D \rightarrow D/2: T \rightarrow 1,4T \approx \sqrt{2} \cdot T$$

Wir erkennen die Wurzelabhängigkeit der Periodendauer T von m und $1/D$, die oben für lineare Kraftgesetze bereits hergeleitet wurde.

Für ein Federpendel ist für kleine Auslenkungen die Bedingung für eine harmonische Schwingung wegen des hookeschen Kraftgesetzes $F = -D \cdot y$ mit der Federkonstante D erfüllt. Daher erhalten wir die Periodendauer eines Federpendels direkt aus der allgemeinen Formel für die Periodendauer einer harmonischen Schwingung.

Periodendauer eines Federpendels

Die Periodendauer T ist direkt proportional zur Wurzel aus der Masse m und indirekt proportional zur Wurzel aus der Federkonstante D .

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$$

Beispiel 2.1.04: Periodendauer eines Federpendels

Für die verschiedenen Parameterwerte des Versuches 2.1.01 berechnen wir die zugehörigen Periodendauern.

a) $D = 20 \text{ N/m}$, $m_1 = 20 \text{ g}$, $m_2 = 80 \text{ g}$

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m_1}{D}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,02 \text{ kg}}{20 \text{ Nm}^{-1}}} \approx 0,2 \text{ s}$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{D}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,08 \text{ kg}}{20 \text{ Nm}^{-1}}} \approx 0,4 \text{ s}$$

Weil die Masse vervierfacht wurde, verdoppelt sich die Periodendauer bei konstanter Federkonstante.

b) $m = 80 \text{ g}$, $D_1 = 20 \text{ N/m}$, $D_2 = 10 \text{ N/m}$

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D_1}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,08 \text{ kg}}{20 \text{ Nm}^{-1}}} \approx 0,4 \text{ s}$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D_2}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,08 \text{ kg}}{10 \text{ Nm}^{-1}}} \approx 0,56 \text{ s}$$

Weil die Masse konstant ist, die Feder aber durch eine weichere ersetzt wird, schwingt das Pendel um etwa 40 % langsamer, d. h., die Periodendauer wird mit dem Faktor $\sqrt{2} \approx 1,41$ multipliziert.

Ergebnisse für den Versuch 2.1.01 in Kurzschreibweise:

$$m \rightarrow 4m: T \rightarrow 2T$$

$$D \rightarrow D/2: T \rightarrow 1,4T$$

Federpendel

Masse m

Federkonstante D

Die Parameter eines Federpendels



Zur Parameterabhängigkeit der Periodendauer eines Federpendels halten wir in Kurzschreibweise fest:

$$m \rightarrow 4m: T \rightarrow 2T$$

$$D \rightarrow 4D: T \rightarrow T/2$$

In Worten:

- Wenn die Masse vervierfacht wird, verdoppelt sich die Periodendauer.
- Wenn die Federkonstante vervierfacht wird, halbiert sich die Periodendauer.



Ziele erreicht? – „Federpendel“

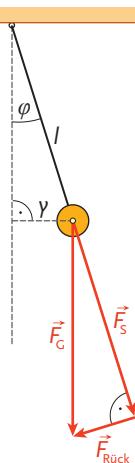
- 2.1.01** Geben Sie einfache **mechanische Pendel** an.
- 2.1.02** Geben Sie die Bedingung für das Auftreten einer harmonischen Schwingung an.
- 2.1.03** Berechnen Sie die Kreisfrequenz, die Frequenz und die Periodendauer eines **Federpendels** mit $m = 1 \text{ kg}$ und $D = 10 \text{ N/cm}$. Was passiert, wenn die Masse verdoppelt wird? Welche Periodendauer ergibt sich, wenn eine doppelt so harte Feder bei der ursprünglichen Masse verwendet wird? Welche Masse müsste man bei der härteren Feder verwenden, um die gleiche Periodendauer wie zu Beginn zu erhalten?
- 2.1.04** Mit welcher Masse wurde eine **Feder** mit einer Federkonstante von 1 N/dm belastet, wenn die Periodendauer eine Sekunde beträgt? Skizzieren Sie drei volle Schwingungen des Pendels, wenn Sie eine Amplitude von 10 cm verwenden und annehmen, dass zu Beginn das Federpendel nach unten aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt wurde. Geben Sie die Schwingungsgleichung der ungedämpften Schwingung an.
- 2.1.05** Die Periodendauer eines **Federpendels** verdoppelt sich, wenn die Masse um 300 g erhöht wird. Nehmen Sie die erste Periodendauer mit 1 s an. Verwenden Sie jeweils eine Amplitude von 5 cm . Die Federpendel sind zu Beginn nach oben aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt. Geben Sie die Schwingungsgleichungen der ungedämpften Schwingungen an und skizzieren Sie vier volle Schwingungen der beiden Pendel.

Fadenpendel

Fadenlänge l

Gravitationsbeschleunigung g

Die Parameter eines Fadenpendels



Beim Fadenpendel wird die Gewichtskraft in eine Fadenspannkraft F_S und eine zur Gleichgewichtslage rücktreibende Kraft $F_{\text{Rück}}$ zerlegt



Zur **Parameterabhängigkeit der Periodendauer eines Fadenpendels** halten wir in Kurzschreibweise fest:

$$\begin{aligned} l \rightarrow 4l: T &\rightarrow 2T \\ g \rightarrow 4g: T &\rightarrow T/2 \end{aligned}$$

In Worten:

- Wenn die Länge vervierfacht wird, verdoppelt sich die Periodendauer.
- Wenn die Gravitationsbeschleunigung vervierfacht wird, halbiert sich die Periodendauer.



Meine Ziele

2.1.2 Fadenpendel

Ein Pkw diente uns als Modell eines Federpendels. Beim Fadenpendel können wir uns eine Spinne am Ende ihres eigenen Fadens vorstellen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die beiden **Parameter** eines Fadenpendels angeben;
- die **Periodendauer** eines mathematischen Pendels berechnen.

Beim Fadenpendel hängt eine Masse m an einem Faden mit vernachlässigbarer Masse. Idealisiert man die Masse zu einem Massenpunkt und denkt den Faden masselos, erhält man ein **mathematisches Pendel**.

Beim Federpendel konnten wir die allgemein hergeleitete Kreisfrequenzformel $\omega^2 = D/m$ mit der Richtgröße D unmittelbar anwenden, weil die Federkonstante D diese Rolle übernahm.

Beim Fadenpendel sorgt der zur Gleichgewichtslage weisende Anteil der Schwerkraft für die Rücktriebung. Wir zerlegen die Gewichtskraft in eine den Faden spannende Komponente F_S und die rücktreibende Komponente $F_{\text{Rück}} = F_G \cdot \sin(\varphi) = \frac{m \cdot g \cdot y}{l}$. Damit erhalten wir als Näherung für die Richtgröße $D = \frac{m \cdot g}{l}$ für das Fadenpendel.

Das Einsetzen in die Periodendauerformel einer harmonischen Schwingung liefert die Periodendauer eines Fadenpendels.

Periodendauer eines Fadenpendels

Die **Periodendauer** T ist für kleine Auslenkungen direkt proportional zur Wurzel aus der Fadenlänge l und indirekt proportional zur Wurzel aus der Gravitationsbeschleunigung g .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Wenn die Auslenkung eines Fadenpendels aus der Gleichgewichtslage größer wird, ist die rücktreibende Kraft F_R nicht zur Auslenkung parallel. Mathematisch kann der Sinus des Auslenkungswinkels nicht mehr durch den Winkel (in Radian) selbst ersetzt werden. Als genauere Näherung kann man ein **Taylorpolynom** n -ter Ordnung ($n > 1$) für den Sinus verwenden.

Beispiel 2.1.05: Periodendauer eines Fadenpendels

Wir berechnen wie im Beispiel 2.1.04 vier verschiedene Periodendauern.

a) $l = 1 \text{ m}$, $g_1 = 9,81 \text{ m/s}^2$, $g_2 = 9,79 \text{ m/s}^2$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 \text{ m}}{9,81 \text{ ms}^{-2}}} \approx 2,006 \text{ s}$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_2}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 \text{ m}}{9,79 \text{ ms}^{-2}}} \approx 2,008 \text{ s}$$

Weil die Gravitationsbeschleunigung beim zweiten Fall etwas kleiner ist, nimmt die Periodendauer um zwei Millisekunden zu.

b) $g = 9,81 \text{ ms}^{-2}$, $l_1 = 30 \text{ cm}$, $l_2 = 1,2 \text{ m}$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l_1}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{0,3 \text{ m}}{9,81 \text{ ms}^{-2}}} \approx 1,1 \text{ s}$$

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l_2}{g}} = 2\pi \sqrt{\frac{1,2 \text{ m}}{9,81 \text{ ms}^{-2}}} \approx 2,2 \text{ s}$$

Weil die Länge vervierfacht wurde, verdoppelt sich die Periodendauer bei unveränderter Erdbeschleunigung.



Ziele erreicht? – „Fadenpendel“

- 2.1.06** Geben Sie die Parameter für die Periodendauer eines **Fadenpendels** an.
- 2.1.07** Berechnen Sie die Kreisfrequenz, die Frequenz und die Periodendauer eines **Fadenpendels** mit $l = 75 \text{ cm}$ auf dem Mond. Was passiert, wenn die Länge des Fadens halbiert wird? Welche Fadenlänge müsste man auf der Erde verwenden, um die gleiche Periodendauer wie auf dem Mond zu erhalten?
- 2.1.08** Welche Länge hat ein **Fadenpendel** auf der Erdoberfläche, wenn die Periodendauer zwei Sekunden beträgt? Informieren Sie sich über Maxima und Minima der Erdbeschleunigung auf unserem Planeten und lösen Sie die Aufgabe für diese Extremfälle.
- 2.1.09** Bei Messungen der **Erdbeschleunigung** wurden bei der Normerdbeschleunigung von $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ in einer bestimmten Zeit 3 900 Pendelschwingungen gezählt. Wie viele wären es bei $g = 9,79 \text{ m/s}^2$?

Taylorpolynom fünfter Ordnung für $\sin(x)$.

$$p_5(x) = x - x^3/3! + x^5/5!$$

Wenn wir die Fakultäten auswerten, erhalten wir

$$p_5(x) = x - x^3/6 + x^5/120.$$

| Translation | Rotation |
|----------------|---------------------------|
| Kraft F | Drehmoment M |
| Masse m | Massenträgheitsmoment J |
| Richtgröße D | Winkelrichtgröße D^* |

Translationsgrößen und entsprechende Rotationsgrößen

2.1.3 Drehpendel

Beispiele für Drehpendel findet man im Alltag zur Genüge. Die mechanische Armbanduhr fällt uns sofort ein. Wir denken aber auch an Sportgeräte, die an Seilen befestigt sind oder an Kräne, die Lasten an Stahlseilen bewegen sowie an analoge Messgeräte. Beim Seilklettern und beim Pendeln mit einem „Riesenpendel“ erfährt man das Verdrehen am eigenen Leib.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Analogien** zwischen Dreh- und Translationsgrößen in Bezug auf Pendel nennen;
- die **Parameter** eines Drehpendels angeben;
- die **Periodendauer** eines Drehpendels berechnen.

Bei einem **Dreh-** oder **Torsionspendel** führt eine an einem Draht befestigte Scheibe bzw. ein mit einer Feder verbundener Körper eine **Drehschwingung** aus.

Beim Feder- und Fadenpendel konnten wir die Kräfte als Ursache der Schwingung festmachen und untersuchen. Bei einem Drehpendel ist – wie in der Dynamik der Rotation erläutert – ein **Drehmoment** für die **Winkelbeschleunigung** verantwortlich.

Der rücktreibenden **Kraft** beim Feder- und Fadenpendel entspricht nun das rücktreibende **Drehmoment**, der **Masse** das **Massenträgheitsmoment** und der **Richtgröße D** die **Winkelrichtgröße D^*** .

Drehpendel werden zur experimentellen Bestimmung von Massenträgheitsmomenten verwendet.

Periodendauer eines Drehpendels

Die **Periodendauer T** ist für kleine Auslenkungen näherungsweise direkt proportional zur Wurzel aus dem Massenträgheitsmoment J und indirekt proportional zur Wurzel aus der Winkelrichtgröße D^* .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D^*}}$$

Merkhilfe: Ersetzen Sie die Translations- durch die entsprechenden Rotationsgrößen.

$$\text{Richtgröße } D = \frac{\text{Kraft}}{\text{Weg}}$$

$$T_{\text{Federpendel}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{D}}$$

$$\text{Winkelrichtgröße } D^* = \frac{\text{Drehmoment}}{\text{Drehwinkel}} \quad T_{\text{Drehpendel}} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D^*}}$$

Die **Periodendauer T** kann auch mit der Bewegungsgleichung $J \cdot d^2\varphi/dt^2 + D^* \cdot \varphi = 0$ hergeleitet werden.

Beispiel 2.1.06: Periodendauer eines Drehpendels

$$D^* = 1 \text{ Nm} \cdot \text{rad}^{-1}, J_1 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, J_2 = 1/9 \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$$

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{J_1}{D^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{1 \text{ Nm} \cdot \text{rad}^{-1}}} \approx 6,28 \text{ s}$$

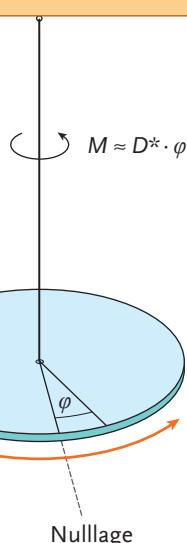
Für das **Massenträgheitsmoment** J wird auch die Kurzbezeichnung Trägheitsmoment verwendet.

Drehpendel

Massenträgheitsmoment J

Winkelrichtgröße D^*

Die Parameter eines Drehpendels



Beim Dreh- bzw. Torsionspendel wirkt ein Drehmoment, das näherungsweise der Auslenkung (Elongation) aus der Gleichgewichtslage proportional ist

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{J_2}{D^*}} = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{1}{9} \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{1 \text{ Nm} \cdot \text{rad}^{-1}}} \approx 2,09 \text{ s}$$

Weil das Massenträgheitsmoment im zweiten Fall der neunte Teil des Trägheitsmoments im ersten Fall ist, wird die Periodendauer gedreifacht.



Ziele erreicht? – „Drehpendel“

- 2.1.10** Geben Sie die Parameter für die Periodendauer eines **Drehpendels** an.
- 2.1.11** Berechnen Sie die Kreisfrequenz, die Frequenz und die Periodendauer eines **Drehpendels** mit $J = 5 \text{ kg} \cdot \text{dm}^2$ und $D^* = 1 \text{ N} \cdot \text{cm}/\text{rad}$. Welche Periodendauer ergibt sich, wenn durch Hinzufügen eines Probekörpers das Massenträgheitsmoment um 50 % zunimmt und die Winkelrichtgröße als unverändert angenommen werden kann?
- 2.1.12** Welche Winkelrichtgröße hat ein **Drehpendel** mit einem Massenträgheitsmoment von $2 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$, wenn die Periodendauer 10 s beträgt?
- 2.1.13** Eine an einem Draht hängende Scheibe führt in einer Minute 30 **Drehschwingungen** aus. Gibt man einen Zusatzkörper auf die Scheibe, werden um ein Drittel weniger Schwingungen in der gleichen Zeit ausgeführt. Welches Massenträgheitsmoment hat der Zusatzkörper, wenn die Scheibe eines von $0,1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ hat?

2.1.4 Physisches Pendel

Ein nicht gewichtetes Rad ist ein Beispiel für ein unerwünschtes physisches Pendel im Alltag. Allgemein führt ein beliebiger Körper, der auf einer Achse gelagert ist, die nicht durch seinen Schwerpunkt verläuft, eine Schwingung aus.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Parameter** eines physischen Pendels angeben;
- die **Periodendauer** eines physischen Pendels berechnen.

Periodendauer eines physischen Pendels

Die **Periodendauer** T ist für kleine Auslenkungen näherungsweise

- direkt proportional zur Wurzel aus dem Massenträgheitsmoment J ,
- indirekt proportional zur Wurzel aus der Masse m ,
- indirekt proportional zur Wurzel aus der Gravitationsbeschleunigung g
- und indirekt proportional zur Wurzel aus dem Schwerpunktabstand s .

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot s}}$$

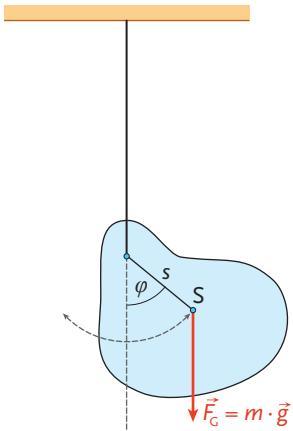
Wir leiten die Periodendauerformel des physischen Pendels aus der allgemeinen Formel für ein Drehpendel her. Dazu verwenden wir die Näherung $\sin(\varphi) \approx \varphi$ für kleine Winkel in Radiant.

Zur **Parameterabhängigkeit der Periodendauer** eines Drehpendels halten wir in Kurzschreibweise fest:

$$\begin{aligned} J \rightarrow 4J: T &\rightarrow 2T \\ D^* \rightarrow 4D^*: T &\rightarrow T/2 \end{aligned}$$

In Worten:

- Wenn das Massenträgheitsmoment vervierfacht wird, verdoppelt sich die Periodendauer.
- Wenn die Winkelrichtgröße vervierfacht wird, halbiert sich die Periodendauer.



Beim **physischen Pendel**, das auf einer nicht durch den Schwerpunkt S verlaufenden Achse gelagert ist, erzeugt die Gewichtskraft ein zur Gleichgewichtslage rücktreibendes Drehmoment. Das Drehmoment ist näherungsweise proportional zum Schwerpunktsabstand s von der Drehachse.

Physisches Pendel

Massenträgheitsmoment J

Masse m

Gravitationsbeschleunigung g

Schwerpunktabstand s

Die Parameter eines physischen Pendels

Zur Parameterabhängigkeit der Periodendauer eines physischen Pendels halten wir in Kurzschreibweise fest:

$$\begin{aligned} J \rightarrow 4J: T &\rightarrow 2T \\ m \rightarrow 4m: T &\rightarrow T/2 \\ g \rightarrow 4g: T &\rightarrow T/2 \\ s \rightarrow 4s: T &\rightarrow T/2 \end{aligned}$$

In Worten:

- Wenn das Massenträgheitsmoment vervierfacht wird, verdoppelt sich die Periodendauer.
- Wenn entweder die Masse, die Gravitationsbeschleunigung oder der Schwerpunktabstand vervierfacht wird, halbiert sich die Periodendauer.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{D^*}} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{M}} = 2\pi\sqrt{\frac{J \cdot \varphi}{F_G \cdot s \cdot \sin(\varphi)}} \approx 2\pi\sqrt{\frac{J \cdot \varphi}{F_G \cdot s \cdot \varphi}} = 2\pi\sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot s}}$$

Beispiel 2.1.07: Periodendauer eines physischen Pendels

$$J = 0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, m = 10 \text{ dag}, g = 9,81 \text{ m/s}^2, s = 5 \text{ cm}.$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{J}{m \cdot g \cdot s}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{0,1 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,05 \text{ m}}} \approx 20,1 \text{ s}$$



Ziele erreicht? – „Physisches Pendel“

- 2.1.14** Geben Sie die Parameter für die Periodendauer eines **physischen Pendels** an.
- 2.1.15** Berechnen Sie die Kreisfrequenz, die Frequenz und die Periodendauer eines **physischen Pendels** mit $J = 2,5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$, $m = 100 \text{ g}$, und $s = 5 \text{ mm}$ auf dem Mond. Welchen Schwerpunktabstand müsste man für das Pendel auf der Erde verwenden, um die gleiche Periodendauer zu erhalten?
- 2.1.16** Welchen Schwerpunktabstand hat ein **physisches Pendel** mit einer Masse von rund 20 dag auf der Erdoberfläche, wenn die Periodendauer vier Sekunden und das Massenträgheitsmoment $5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$ beträgt?
- 2.1.17** Erstellen Sie eine systematische Zusammenstellung aller paarweisen Änderungen der Parameter eines **physischen Pendels**, die die Periodendauer unverändert lassen.

2.1.5 Überlagerung von Schwingungen

Ein Mehrklang ist die additive Überlagerung mehrerer Einzeltöne. Allgemeiner ergibt sich die resultierende Gesamtbewegung aus der vektoriellen Summe der Einzelschwingungen, wenn mehrere periodische Kräfte auf ein System einwirken. Bei Schwingungen und ihren Überlagerungen denken wir aber nicht nur an Musik, sondern auch an elektromagnetische Wellen und damit an die Optik, die Thermodynamik und die Elektrodynamik. Schwingungs- und Wellenüberlagerung spielen in Natur und Technik eine fundamentale Rolle.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Schwingungsüberlagerungen** im Alltag angeben und zwischen **paralleler** und **senkrechter Überlagerung** von harmonischen Schwingungen unterscheiden;
- die Anwendungsgebiete von **Lissajousfiguren** angeben;
- die Überlagerung von zwei Schwingungen **grafisch** ermitteln;
- aus der grafischen Überlagerung zweier senkrechter Schwingungen das **Ampitituden-** und (rationale) **Frequenzverhältnis** ablesen.

Bei der Überlagerung von Schwingungen ist stets auf die Amplituden, die Frequenzen, eine eventuelle Phasenverschiebung und die relative Lage der Schwingungen zu achten. Wir beschränken uns auf die Überlagerung von **parallelen** und **senkrechten Schwingungen**.

Überlagerung von parallelen Schwingungen

Wir überlagern zuerst zwei Schwingungen gleicher Frequenz ohne Phasenverschiebung.

Beispiel 2.1.08: Zwei Töne gleicher Frequenz aber unterschiedlicher Lautstärke

Wenn der erste Ton durch die Gleichung

$$\gamma_1(t) = r_1 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

und der zweite gleichfrequente Ton durch

$$\gamma_2(t) = r_2 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

beschrieben wird, so ergibt sich für die Überlagerung der beiden Einzeltöne

$$\gamma_{\text{ges}}(t) = r_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + r_2 \cdot \sin(\omega \cdot t) = (r_1 + r_2) \cdot \sin(\omega \cdot t).$$

Das ist eine Sinusschwingung der gleichen Frequenz wie die beiden Töne mit der Summe der beiden Einzelamplituden.

Die beiden verstärken einander maximal; es liegt **vollständige konstruktive Interferenz (ungestörte Überlagerung)** vor.

Wir analysieren nochmals zwei Schwingungen gleicher Frequenz und gleicher Amplitude, aber nun mit einer Phasenverschiebung.

Beispiel 2.1.09: Zwei phasenverschobene Töne gleicher Frequenz und gleicher Amplitude

Wenn zwei identische Töne mit einer Periodendauer von 2π s nicht gleichzeitig erzeugt werden, ergibt sich nicht die doppelte Amplitude für die Gesamtschwingung.

Wir nehmen an, dass der zweite Ton

- a) eine Viertelperiode,
- b) eine Halbperiode nach dem ersten erklingt.

a) Für den ersten Ton gilt: $\gamma_1(t) = r \cdot \sin(t + \pi/2)$

Für den zweiten gilt: $\gamma_2(t) = r \cdot \sin(t)$

Damit ergibt sich die Gesamtschwingung für $t \geq 0$ s:

$$\gamma_{\text{ges}}(t) = r \cdot \sin(t + \pi/2) + r \cdot \sin(t).$$

$$\gamma_{\text{ges}}(t) = r \cdot (\sin(t + \pi/2) + \sin(t)).$$

Verwendet man einen Teil des zweiten Summensatzes, erhält man

$$\gamma_{\text{ges}}(t) = 2 \cdot \cos(\pi/4) \cdot r \cdot \sin(t + \pi/4).$$

Die Gesamtschwingung ist wieder eine Sinusschwingung der **gleichen Frequenz** wie die Einzelschwingungen.

b) Für den ersten Ton gilt: $\gamma_1(t) = r \cdot \sin(t + \pi) = -r \cdot \sin(t)$

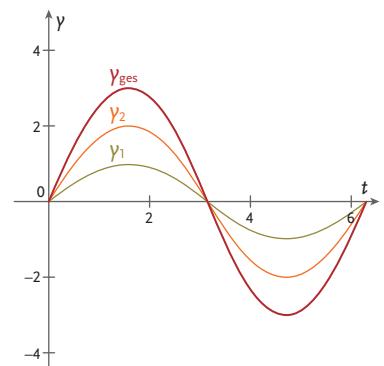
Für den zweiten gilt: $\gamma_2(t) = r \cdot \sin(t)$

Damit ergibt sich die Gesamtschwingung für $t \geq 0$ s:

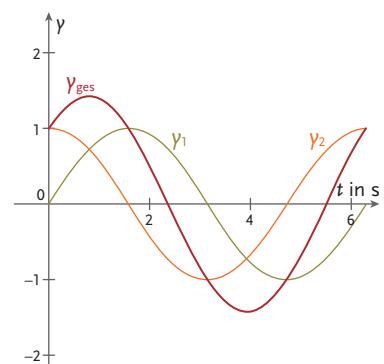
$$\gamma_{\text{ges}}(t) = 0.$$

Die beiden Schwingungen löschen sich aus; es liegt **vollständige destruktive Interferenz** vor.

Zur mathematischen Behandlung paralleler Schwingungen eignet sich auch ein **Zeigerdiagramm**. Stimmen die Frequenzen der Einzelschwingungen nicht mehr überein, so ist die Summe nicht mehr durch eine einzige Winkelfunktion darstellbar. Die Gesamtschwingung ist nicht harmonisch (anharmonisch), wie das nachfolgende Beispiel zeigt.

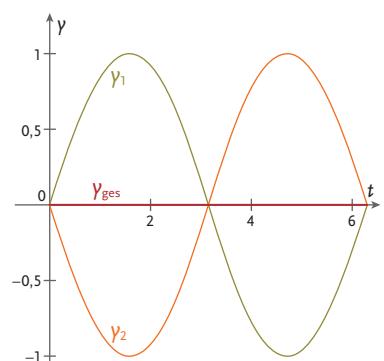


Beispiel für eine vollständige konstruktive Interferenz zweier harmonischer Schwingungen. Vergleichen Sie mit Beispiel 2.1.08.

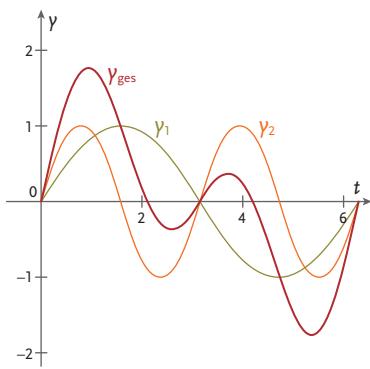


Skizze zu Beispiel 2.1.09: a) mit $r = 1$ Längeneinheit und $\omega = 1 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

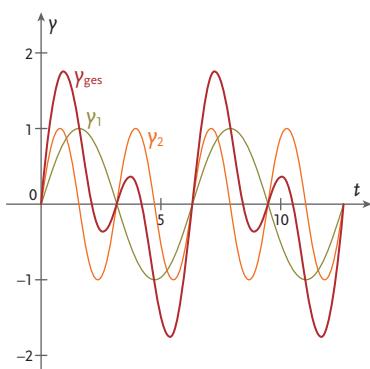
 Eine spezielle goniometrische Beziehung (Teil des zweiten Summensatzes):
 $\sin(x) + \sin(y) = 2 \sin\left(\frac{x+y}{2}\right) \cos\left(\frac{x-y}{2}\right)$



Vollständige destruktive Interferenz. Vergleichen Sie Beispiel 2.1.09 b)



Skizze zu Beispiel 2.1.10: Die Gesamtschwingung (rot) aus den beiden harmonischen Einzelschwingungen ist nicht mehr harmonisch.



Die Periodendauer der nicht harmonischen Summenfunktion aus Beispiel 2.1.10 beträgt 2π Zeiteinheiten.



JOSEPH BARON DE FOURIER,
1768 BIS 1830, FRANZÖSISCHER
PHYSIKER

| Amplituden | Kreisfrequenzen |
|---------------|-----------------|
| 1 | 1 |
| $\frac{1}{2}$ | 2 |
| $\frac{1}{3}$ | 3 |
| $\frac{1}{4}$ | 4 |
| $\frac{1}{5}$ | 5 |
| : | : |
| $\frac{1}{k}$ | k |

Zum Beispiel 2.1.12: die Amplituden und Kreisfrequenzen der Einzelschwingungen

Beispiel 2.1.10: Grundton und Oktave

Ein Ton und seine Oktave werden mit gleicher Amplitude erzeugt. Dann gilt für die Überlagerung der beiden Einzeltöne:

$$y_{\text{ges}}(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t) + r \cdot \sin(2\omega \cdot t)$$

Der Graph zeigt, dass die überlagerte Schwingung periodisch aber nicht mehr harmonisch, also sinusförmig ist.

Bei der grafischen Überlagerung von zwei Schwingungen mit gemeinsamen Null durchgängen ist die punktweise Addition der Einzelauslenkungen sehr effizient, um den Verlauf der Gesamtschwingung qualitativ zu erfassen.

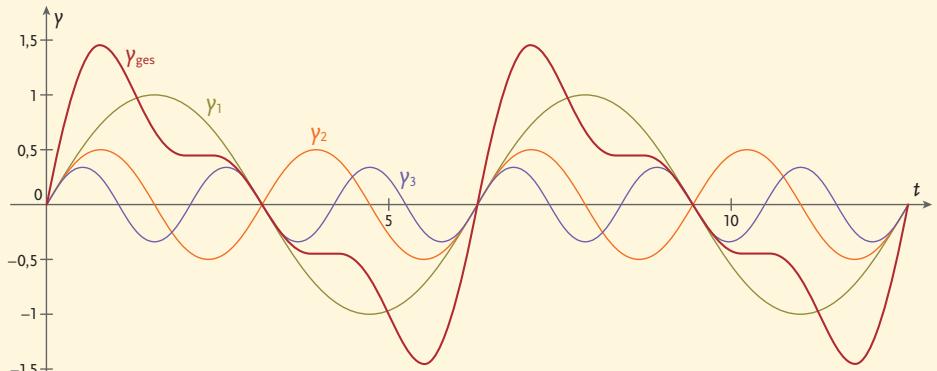
In den behandelten Beispielen und angestellten Überlegungen wurden bisher zwei parallele Schwingungen überlagert. Nachstehend werden einige Beispiele für die **Überlagerung von mehreren harmonischen Schwingungen** angeführt, die mit Computerunterstützung sehr leicht grafisch behandelt werden können.

Die Umkehraufgabe, wie man aus einer periodischen Summenfunktion die einzelnen additiven Teilkurven erhält, wird mithilfe von Fourierreihen gelöst.

Überlagerung von mindestens drei parallelen Schwingungen

Die Sägezahnschwingung spielt in der Elektro- und Automatisierungstechnik ebenso wie die Rechteckschwingung eine bedeutende Rolle.

Beispiel 2.1.11: Drei parallele harmonische Schwingungen mit Frequenzverhältnis 1 : 2 : 3



Die Summenfunktion nähert sich an eine fallende Sägezahnfunktion an.

Beispiel 2.1.12: 24 parallele harmonische Schwingungen mit Frequenzverhältnis 1 : 2 : 3 : ...

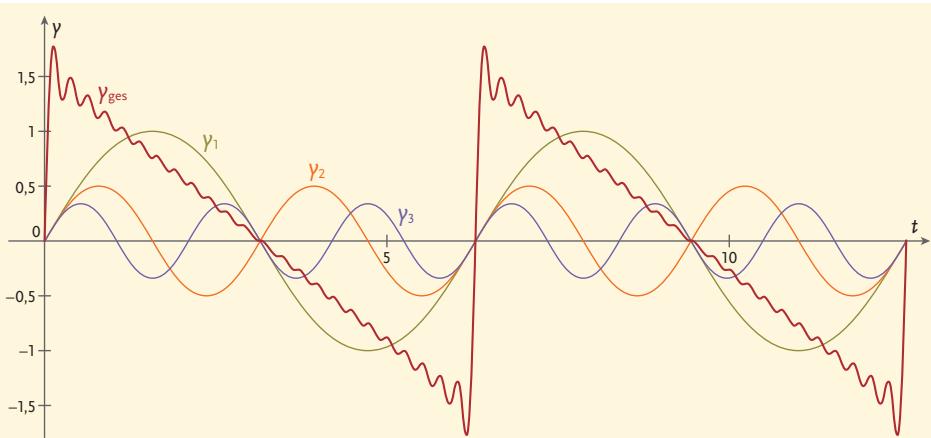
Nachstehend sind die ersten 24 Summanden überlagert.

$$y_1(t) = \sin(t)$$

$$y_2(t) = \frac{1}{2} \cdot \sin(2t)$$

$$y_3(t) = \frac{1}{3} \cdot \sin(3t)$$

⋮



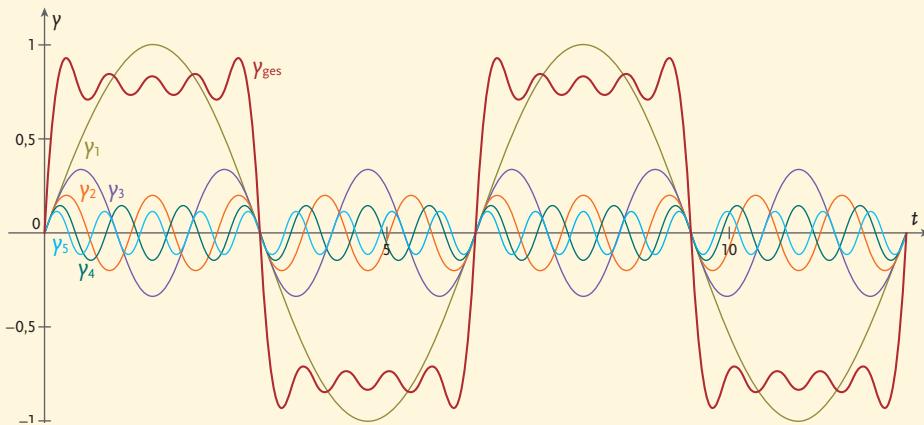
Die fallende **Sägezahmfunktion** mit einer Periodendauer von 2π s ist bereits deutlich ausgeprägt.

Bei einer Sägezahnschwingung tritt also jedes ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz als Frequenz einer sogenannten Oberschwingung auf.

Beim nachfolgenden Beispiel werden nur Schwingungen mit einem ungeraden ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz überlagert.

Beispiel 2.1.13: Fünf parallele harmonische Schwingungen mit Frequenzverhältnis 1 : 3 : 5 : 7 : 9

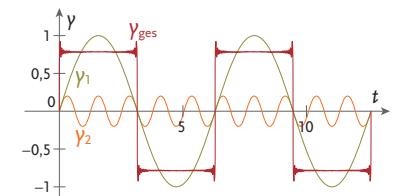
$$\begin{aligned}y_1(t) &= \sin(t) \\y_2(t) &= 1/3 \cdot \sin(3t) \\y_3(t) &= 1/5 \cdot \sin(5t) \\y_4(t) &= 1/7 \cdot \sin(7t) \\y_5(t) &= 1/9 \cdot \sin(9t)\end{aligned}$$



Die Überlagerung ist als Annäherung an die 2π -periodische **Rechteckfunktion** zu erkennen. Diese wird auch als **Einundausschaltfunktion** bezeichnet und spielt ebenso wie die Sägezahmfunktion in der Elektrotechnik bzw. Informatik eine bedeutende Rolle.

| Amplituden | Kreisfrequenzen |
|------------|-----------------|
| 1 | 1 |
| 1/3 | 3 |
| 1/5 | 5 |
| 1/7 | 7 |
| 1/9 | 9 |

Zum Beispiel 2.1.13: die Amplituden und Kreisfrequenzen der Einzelschwingungen

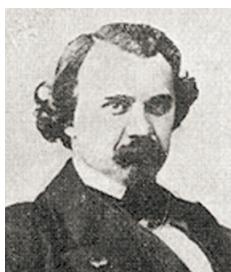


Fortführung von Beispiel 2.1.13: Überlagerung der ersten 51 Einzelschwingungen:

$$\sum_{k=1}^{51} \frac{[\sin(2k-1) \cdot t]}{2k-1}$$

Überlagerung von senkrechten Schwingungen

Jeder kennt die Bilder von Intensivstationen mit Oszillosografen, die ein EKG (Elektrokardiogramm) anzeigen. Die nachstehend gezeigten Figuren können ebenfalls mit einem Oszillosografen und den entsprechenden sinusförmigen Wechselspannungen an den beiden Eingängen (x- und y-Eingang) dargestellt werden.



JULES ANTOINE LISSAJOUS,
1822 BIS 1880, FRANZÖSISCHER
PHYSIKER

Wir lassen bei der senkrechten Überlagerung die erste Schwingung entlang der x-Achse und die zweite Schwingung entlang der y-Achse ablaufen und legen die beiden harmonischen Schwingungen als

$$\begin{aligned}x(t) &= r_x \cdot \sin(\omega_x \cdot t) \\y(t) &= r_y \cdot \sin(\omega_y \cdot t + \varphi_0)\end{aligned}\quad t \geq 0 \text{ s}$$

fest.

Lissajousfiguren

Die Figuren, die bei einer Überlagerung von zwei Schwingungen mit senkrecht zueinander stehenden Schwingungsrichtungen entstehen, heißen **Lissajousfiguren**. Das rationale Frequenzverhältnis der beiden Einzelschwingungen ist gleich dem Verhältnis der Anzahl der **Berührungs punkte** mit den umschriebenen Rechteckseiten der Lissajousfigur.

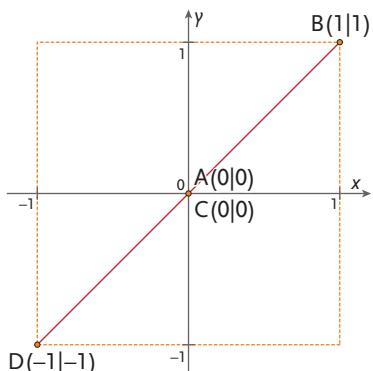
Eine systematische Untersuchung der senkrechten Überlagerung von zwei harmonischen Schwingungen nach den Parametern Amplitude r , Winkelgeschwindigkeit ω und Phasenverschiebung $-\varphi_0$ für unsere Festlegung – bietet sich an.

Senkrechte Überlagerung ohne Phasenverschiebung ($\varphi_0 = 0$ rad)

Beide Schwingungen starten im Koordinatenursprung, sodass die Überlagerung durch den Punkt (0|0) verläuft.

Senkrechte Überlagerung ohne Phasenverschiebung und mit gleicher Amplitude

Die Lissajousfigur verläuft durch den Punkt (0|0) und kann in ein Quadrat mit der Seitenlänge $a = 2r$ eingeschrieben werden.



Skizze zu Beispiel 2.1.14: Hier ist die Amplitude $r = 1$

Senkrechte Überlagerung ohne Phasenverschiebung, mit gleicher Amplitude und gleicher Frequenz

Überlagert man zwei identische Schwingungen

$$x(t) = y(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t),$$

ergibt sich als Lissajousfigur ein Ausschnitt der ersten Mediane.

Beispiel 2.1.14: Zwei identische Schwingungen, senkrecht überlagert

Für $x(t) = y(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t) = \sin(t)$

ergibt die Überlagerung die Diagonale eines Quadrats mit Seitenlänge 2 und dem Koordinatenursprung als Mittelpunkt.

Die Diagonale wird von A(0|0) beginnend nach rechts oben durchlaufen. Die Überlagerung kehrt im Punkt B(1|1) um, läuft bis zum unteren Eckpunkt des Quadrats D(-1|-1) und hat beim nachfolgenden Passieren des Koordinatenursprungs eine volle Schwingung vollendet.

| t | 0 | $\pi/2$ | π | $3\pi/2$ | 2π |
|--------|---|---------|-------|----------|--------|
| $x(t)$ | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 |
| $y(t)$ | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 |
| Punkt | A | B | C | D | E |

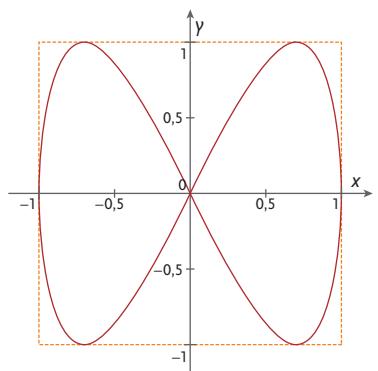
Die Punkte werden in ihrer alphabetischen Reihenfolge durchlaufen.

Senkrechte Überlagerung ohne Phasenverschiebung, mit gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Frequenz

Beispiel 2.1.15: Frequenzverhältnis 1 : 2

$$\begin{aligned}x(t) &= \sin(t) \\y(t) &= \sin(2t)\end{aligned}$$

Am besten fertigt man eine Wertetabelle für t aus $[0 \text{ rad}; \pi \text{ rad}]$ in $\pi/4$ -Schritten und überlegt sich die vollständige Lissajousfigur mithilfe von Symmetrievergleichungen.



Skizze zu Beispiel 2.1.15: Die waagrechten Rechteckseiten werden zweimal, die lotrechten einmal berührt

Beispiel 2.1.16: Frequenzverhältnis 2 : 3

$$\begin{aligned}x(t) &= \sin(2t) \\y(t) &= \sin(3t)\end{aligned}$$

Weil die x-Schwingung π -periodisch und die y-Schwingung $2\pi/3$ -periodisch ist, wählt man für die Wertetabelle eine Schrittweite von $\pi/12$.

Bisher haben wir **rationale Frequenzverhältnisse** gewählt, sodass die entstehende Figur stets **geschlossen** war. Liegt ein **irrationales Frequenzverhältnis** vor, so ist die Lissajousfigur **offen** und füllt umso mehr Punkte des Quadrats aus, je länger die Einzelschwingungen überlagert werden.

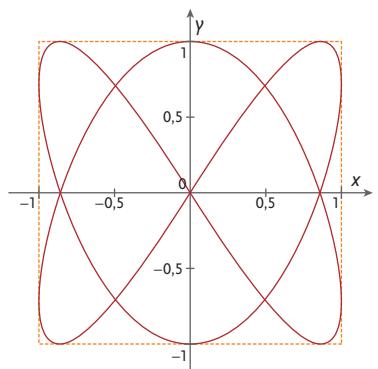
Beispiel 2.1.17: Irrationales Frequenzverhältnis $1 : \sqrt{2}$

$$\begin{aligned}x(t) &= \sin(t) \\y(t) &= \sin(\sqrt{2} \cdot t)\end{aligned}$$

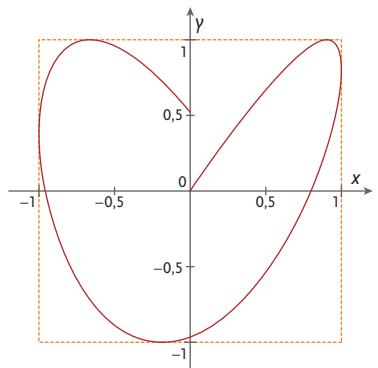
Wir lassen vorerst t von 0 s bis 2π s laufen und erhalten nebenstehende offene Figur.

Wenn t nun auch Werte aus $[2\pi \text{ s}; 6\pi \text{ s}]$ annimmt, macht die Einzelschwingung in x-Richtung bereits drei volle Schwingungen, sodass die Überlagerung mehr Platz im Quadrat einnimmt.

Lässt man die Schwingung in x-Richtung 25 volle Perioden durchlaufen, so ergibt sich eine beeindruckende Vielfalt.



Skizze zu Beispiel 2.1.16: drei Berührungsstellen für die waagrechten und zwei für die senkrechten Rechteckseiten



Skizze zu Beispiel 2.1.17: t durchläuft die Werte von 0 s bis 2π s

Senkrechte Überlagerung ohne Phasenverschiebung, aber mit unterschiedlicher Amplitude

Die Überlagerung kann in ein Rechteck mit den Seitenlängen $a = 2r_x$ und $b = 2r_y$ eingeschrieben werden.

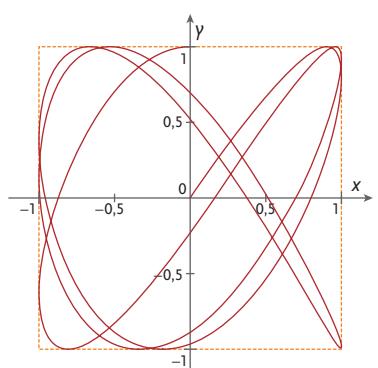
Senkrechte Überlagerung ohne Phasenverschiebung, mit unterschiedlicher Amplitude, aber gleicher Frequenz

Die Lissajousfigur ergibt einen Ausschnitt einer homogenen linearen Funktion mit der Steigung r_y/r_x .

Beispiel 2.1.18: $y = kx$

$$\begin{aligned}x(t) &= 5\sin(t) && \text{d. h. Rechteckseite } a = 10 \\y(t) &= 3\sin(t) && \text{d. h. Rechteckseite } b = 6\end{aligned}$$

$$\text{Steigung } k = 3/5 = 0,6$$



Skizze zu Beispiel 2.1.17: t durchläuft die Werte von 0 s bis 6π s

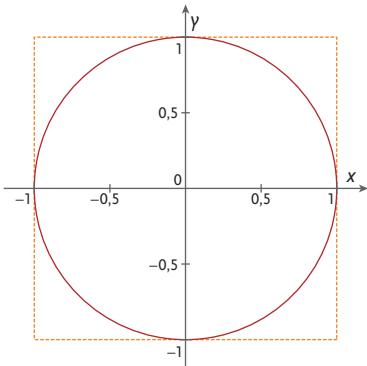
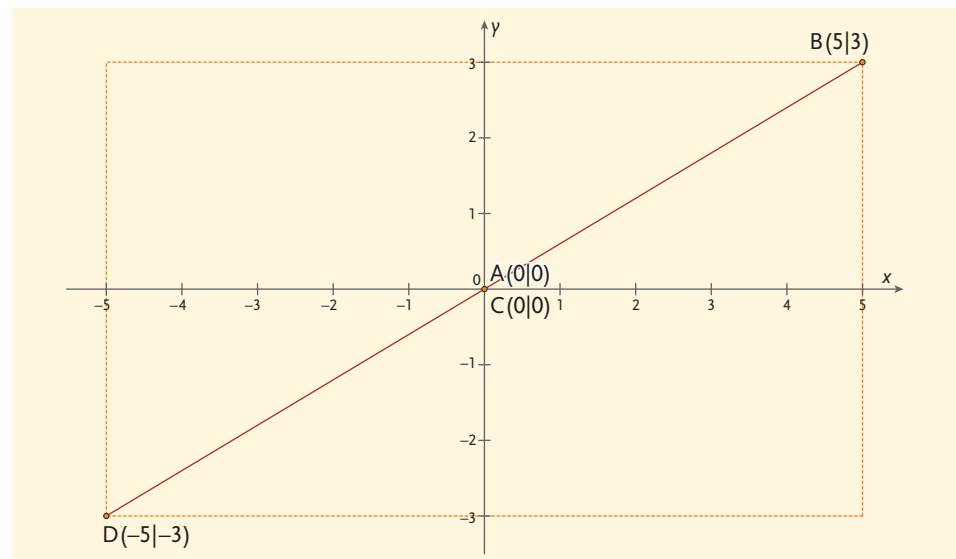


Diagramm und Wertetabelle zu Beispiel 2.1.19:

| t | 0 | $\pi/2$ | π | $3\pi/2$ | 2π |
|--------|---|---------|-------|----------|--------|
| $x(t)$ | 0 | 1 | 0 | -1 | 0 |
| $y(t)$ | 1 | 0 | -1 | 0 | 1 |
| Punkt | A | B | C | D | E |

Die Punkte werden in ihrer alphabetischen Reihenfolge durchlaufen und erzeugen so den Einheitskreis.

Senkrechte Überlagerung mit Phasenverschiebung

Wegen

$$x(0 \text{ s}) = 0 \text{ m}$$

$$y(0 \text{ s}) = r_y \cdot \sin(\varphi_{0y}) \text{ m}$$

startet die Überlagerung im Punkt $(0 | r_y \cdot \sin(\varphi_{0y}))$.

Senkrechte Überlagerung mit Phasenverschiebung, mit gleicher Amplitude und gleicher Frequenz

Beispiel 2.1.19: Der Einheitskreis als Lissajousfigur

$$x(t) = \sin(t)$$

$$y(t) = \sin\left(t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(t)$$

Als Überlagerung ergibt sich der Einheitskreis, der vom Punkt A(0|1) beginnend im Uhrzeigersinn (in technisch negativer Drehrichtung) durchlaufen wird.

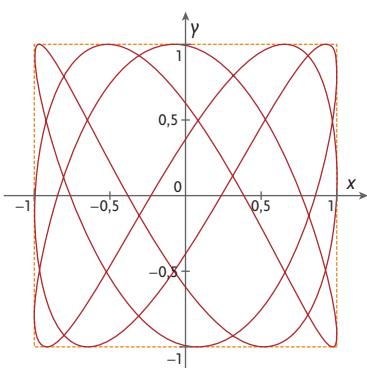
Senkrechte Überlagerung mit Phasenverschiebung, mit gleicher Amplitude, aber unterschiedlicher Frequenz

Beispiel 2.1.20: Lissajousfigur für ein Frequenzverhältnis von 3 : 5

$$x(t) = \sin(3t)$$

$$y(t) = \sin\left(5t + \frac{\pi}{3}\right)$$

Ohne Rechnerunterstützung empfiehlt sich für dieses Beispiel eine Wertetabelle mit einer gemeinsamen Schrittweite von $\pi/30$.



Skizze zu Beispiel 2.1.20: Die Lissajousfigur berührt die waagrechten Quadratseiten fünfmal und die senkrechten dreimal, weil das Frequenzverhältnis von x-Schwingung zu y-Schwingung 3 : 5 beträgt

Senkrechte Überlagerung mit Phasenverschiebung, unterschiedlicher Amplitude, aber gleicher Frequenz

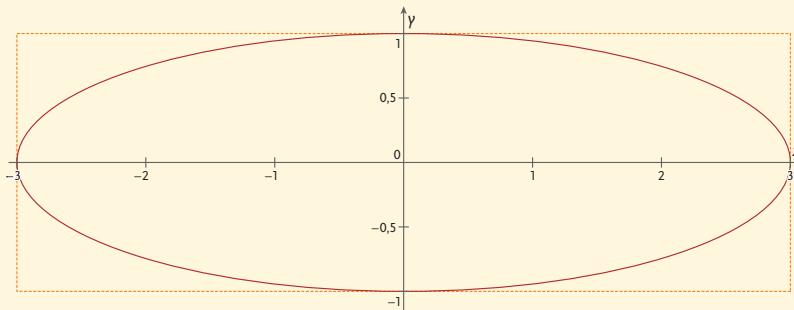
Beispiel 2.1.21: Eine Ellipse als Lissajousfigur

$$x(t) = 3\sin(t)$$

$$y(t) = \sin\left(t + \frac{\pi}{2}\right) = \cos(t)$$

d. h. Rechteckeite $a = 6$

d. h. Rechteckeite $b = 2$

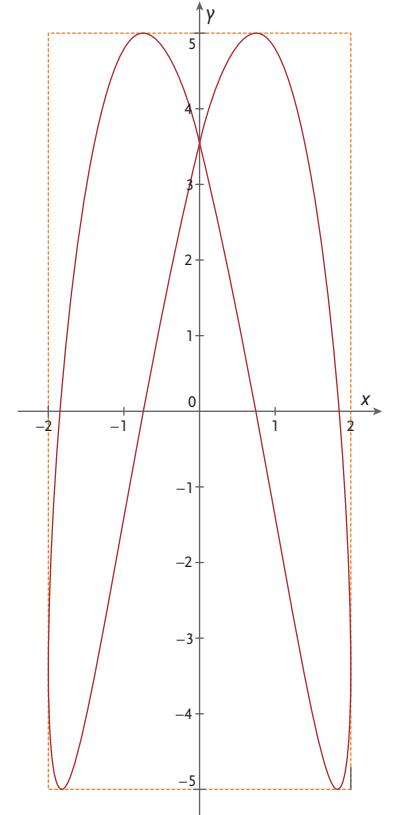


Die Ellipse, die vom Punkt A(0|1) startend im Uhrzeigersinn durchlaufen wird, berührt das umschriebene Rechteck in den Haupt- und Nebenscheiteln, sodass das Frequenzverhältnis 1 : 1 bestätigt wird. Eine Überprüfung mit einigen Werten empfiehlt sich mit einer Schrittweite von $\pi/4$, um jeweils zwischen den Scheiteln einen weiteren Ellipsenpunkt zu erhalten.

| t | 0 | $\pi/4$ | $\pi/2$ | $3\pi/4$ | π |
|--------|---|--------------|---------|---------------|-------|
| $x(t)$ | 0 | $3/\sqrt{2}$ | 3 | $3/\sqrt{2}$ | 0 |
| $y(t)$ | 1 | $1/\sqrt{2}$ | 0 | $-1/\sqrt{2}$ | -1 |
| Punkt | A | B | C | D | E |

Wertetabelle zu Beispiel 2.1.21:
Die Punkte werden in ihrer alphabetischen Reihenfolge durchlaufen und erzeugen so die Ellipse

$$\frac{x^2}{9} + y^2 = 1.$$



Senkrechte Überlagerung mit Phasenverschiebung, unterschiedlicher Amplitude und unterschiedlicher Frequenz

Beispiel 2.1.22: Eine axialsymmetrische Lissajousfigur

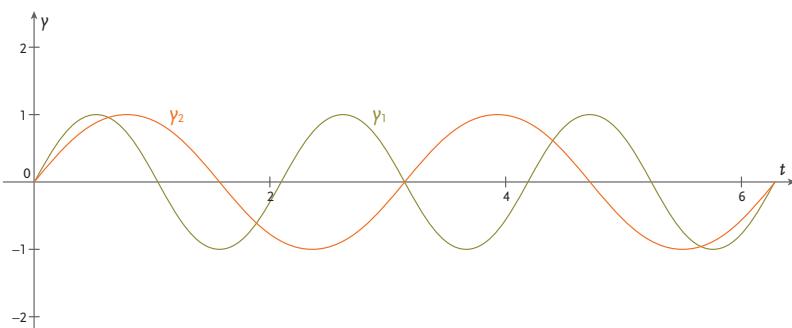
$$\begin{aligned}x(t) &= 2 \sin(t) && \text{d. h. Rechteckseite } a = 4 \\y(t) &= 5 \sin\left(2t + \frac{\pi}{4}\right) && \text{d. h. Rechteckseite } b = 10\end{aligned}$$

Den vier Berührungs punkten mit den waagrechten Rechteckseiten stehen zwei mit den vertikalen Seiten gegenüber, sodass das Frequenzverhältnis von 1 : 2 bestätigt wird.



Ziele erreicht? – „Überlagerung von Schwingungen“

- 2.1.18 Unter welcher Bedingung ist eine Überlagerung von zwei parallelen Sinusschwingungen wieder **harmonisch**?
- 2.1.19 Wie groß ist die **Periodendauer** der Summenfunktion zweier paralleler Sinusschwingungen mindestens?
- 2.1.20 Überlagern Sie **zwei parallele harmonische ungedämpfte Schwingungen** gleicher Frequenz mit einem Amplitudenverhältnis von 3 : 1 grafisch.
- 2.1.21 Ermitteln Sie die **Überlagerung** zweier paralleler harmonischer ungedämpfter Schwingungen mit einem Frequenz- und Amplitudenverhältnis von 2 : 3 a) ohne Phasenverschiebung und b) mit einer Phasenverschiebung von π grafisch.
- 2.1.22 Ermitteln Sie qualitativ die **Überlagerung** eines Tons und seiner Quinte (Frequenzverhältnis = 3 : 2, z. B. c und g) grafisch im folgenden Diagramm. Ermitteln Sie zuerst jene Punkte der Gesamtschwingung, bei denen mindestens eine der beiden Einzelschwingungen eine Nullstelle hat.



Skizze zu Beispiel 2.1.22: Die Schwingung in y-Richtung ist doppelt so schnell wie die in x-Richtung

Zu Aufgabe 2.1.22:
Bei einer Oktave beträgt das Frequenzverhältnis 2 : 1 und bei einer (reinen) Quinte 3 : 2. Die reine Quinte wird auch als pythagoreische Quinte bezeichnet.

- 2.1.23** Welche Frequenzen treten bei einer **Sägezahnschwingung** im Vergleich zur Grundfrequenz auf?
- 2.1.24** Skizzieren Sie die drei **Einzelschwingungen** $y_1(t) = 2\sin(t)$, $y_2(t) = -\sin(2t)$, $y_3(t) = 2\sin(3t)/3$ und markieren Sie die Nullstellen der Summenfunktion.
- 2.1.25** Was ist eine **Lissajousfigur**?
- 2.1.26** Überlagern Sie **zwei senkrechte harmonische ungedämpfte Schwingungen** mit einem Frequenzverhältnis von 2 : 1 und einem Amplitudenverhältnis von 3 : 1 grafisch. Erstellen Sie eine geeignete Wertetabelle. Überlegen Sie die dazu nötige Schrittweite.
- 2.1.27** Überlagern Sie **zwei senkrechte harmonische ungedämpfte Schwingungen** mit einem Frequenzverhältnis von 1 : 3 und einem Amplitudenverhältnis von 3 : 2 grafisch. Erstellen Sie eine Wertetabelle und überlegen Sie zuvor die nötige Schrittweite.
- 2.1.28** Fertigen Sie eine **tabellarische Zusammenfassung** aller Möglichkeiten der senkrechten Überlagerung für harmonische Schwingungen im Hinblick auf ihre drei Parameter an.
- 2.1.29** Modellieren Sie die Überlagerung von **zwei parallelen harmonischen Schwingungen** im Hinblick auf ihre drei Parameter. Die oben durchgeführte systematische senkrechte Überlagerung von zwei harmonischen Schwingungen ist dabei hilfreich.

2.1.6 Erzwungene und gedämpfte Schwingung

In der Praxis treten aufgrund der unvermeidlichen Reibung **gedämpfte Schwingungen** auf. Am Beispiel einer mechanischen Pendeluhr erkennen wir auch, dass die Pendelstange der Pendeluhr nur durch einen äußeren Zwang – den Energieübertrag durch Anker und Steigrad – zu einer konstanten Amplitude und Periodendauer gebracht werden kann.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **freie** bzw. **erzwungene** sowie **ungedämpfte** und **gedämpfte harmonische Schwingung** unterscheiden;
- die **Schwingungsgleichung** einer freien ungedämpften sowie einer freien und gedämpften Schwingung angeben und mit ihnen rechnen;
- **Resonanzdiagramme** interpretieren.

Bisher haben wir ein Pendel mithilfe einer Kraft aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt und danach sich selbst überlassen. Die dabei unvermeidlichen Reibungsverluste wurden vernachlässigt. Solche Schwingungen sind freie, also nicht erzwungene ungedämpfte Schwingungen.



Schwingtüren kommen in klassischen Western immer wieder vor. Sie führen eine gedämpfte Schwingung aus.



Bei einer Pendeluhr wird im jeweils richtigen Moment über den Anker durch die Zähne des Steigrades Energie zugeführt. Diese ist als potentielle Energie in den angehobenen Antriebsmassen gespeichert. Dadurch erreicht man eine Schwingung mit fast konstanter Amplitude.

Gedämpfte Schwingungen

Will man in der Technik eine nahezu ungedämpfte Schwingung realisieren, führt man einem reibungsbehafteten Pendel (**Oszillator**) zu einem geeigneten Zeitpunkt die durch Reibung verlorene Energie wieder zu (**Rückkopplung**). Beispiele sind elektromagnetische Schwingkreise sowie mechanische Uhren. Die dadurch entstehenden Schwingungen entsprechen freien ungedämpften Schwingungen.

Die in der Praxis unvermeidliche Reibung beeinflusst eine Schwingung in zweierlei Hinsicht:

- Die **Amplitude** nimmt exponentiell mit der Zeit ab, wenn die Reibungskraft proportional und entgegengesetzt zur Geschwindigkeit gerichtet ist

$$r(t) = r_0 \cdot \exp(-\delta t) = r_0 \cdot e^{-\delta t}.$$

δ ist die Dämpfungskonstante mit der Einheit s^{-1} .

- Die **Kreisfrequenz** ändert sich

$$\omega^2 = \omega_0^2 - \delta^2.$$

ω_0 bezeichnet die Kreisfrequenz des idealisierten ungedämpften Pendels und wird Eigenkreisfrequenz genannt.

Damit ergibt sich folgende Gleichung der gedämpften harmonischen Schwingung.

Gleichung der gedämpften harmonischen Schwingung

Die momentane Auslenkung y einer gedämpften harmonischen Schwingung nimmt exponentiell mit der Zeit ab.

$$y(t) = r_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cdot t + \varphi_0).$$

Der Wurzausdruck schränkt die Gültigkeit der obigen Formel für $\delta < \omega_0$ ein. Ist die Dämpfungskonstante δ kleiner als die Eigenkreisfrequenz ω_0 , liegt eine **schwache Dämpfung** vor.

Beispiel 2.1.23: Schwach gedämpfte harmonische Schwingung

Eine Masse $m = 500 \text{ g}$ werde an eine sehr leichte Feder mit einer Federkonstanten von $5 \text{ N} \cdot \text{dm}^{-1}$ gehängt und zur Zeit $t = 0 \text{ s}$ 10 cm oberhalb der Gleichgewichtslage sich selbst überlassen.

Wir nehmen eine Dämpfungskonstante von 5 % der Eigenkreisfrequenz an und erhalten damit

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{D}{m}} = \sqrt{\frac{50 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}}{0,5 \text{ kg}}} = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$\delta = 0,05 \cdot \omega_0 = 0,5 \frac{1}{\text{s}}$$

sowie

$$y(t) = r_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \cdot t + \varphi_0) = 10 \cdot e^{-0,5t} \cdot \sin\left(\sqrt{100 - 0,5^2} \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \text{ cm}.$$

Zusätzlich zur schwachen Dämpfung unterscheidet man zwischen **mittlerer** und **starker Dämpfung**.

- Ist die Dämpfungskonstante genauso groß wie die Eigenkreisfrequenz, liegt eine mittlere Dämpfung vor. Die Rückkehr in die Nulllage erfolgt in kürzester Zeit. Mittlere Dämpfung wünscht man sich beispielsweise bei analogen Messinstrumenten mit Zeigerausschlag.
- Wenn die Dämpfungskonstante größer ist als die Eigenkreisfrequenz, ist das Pendel stark gedämpft und kriecht in seine Ruhelage, ohne dass eine Hin-und-Herbewegung erfolgt. In der Mathematik nennt man diesen Vorgang **aperiodisch**.



Die **Gleichung für die Amplitude** $r(t)$ erhalten wir aus der Annahme, dass die Abnahme proportional zur Amplitude selbst und zur Zeitspanne ist. In differenzieller Schreibweise

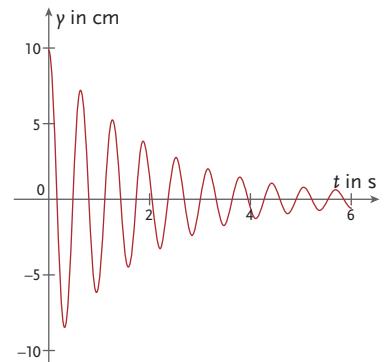
$$dr = -\delta \cdot r(t) \cdot dt.$$



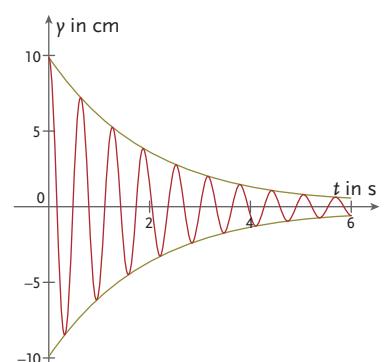
Zur **Dämpfungskonstante**: Wenn eine Reibungskraft F_R mit $|F_R| = k \cdot v$ auf ein Pendel der Masse m wirkt, gilt

$$\delta = \frac{k}{2m}.$$

Der Reziprokwert (Kehrwert) der Dämpfungskonstante hat die Dimension einer Zeit und gibt an, nach welcher Zeit die Amplitude auf das $1/e$ -Fache der Anfangsamplitude gefallen ist.



Skizze zu Beispiel 2.1.23: Die Amplitude nimmt exponentiell ab



Nochmals zu Beispiel 2.1.23: nun auch mit den beiden einhüllenden Exponentialfunktionen
 $y(t) = 10 \cdot \exp(-0,5 \cdot t)$ und
 $y(t) = -10 \cdot \exp(-0,5 \cdot t)$.

| Kriterium | Schwingung |
|---------------------|---------------------------------|
| $\delta < \omega_0$ | schwach gedämpft |
| $\delta = \omega_0$ | mittel gedämpft |
| $\delta > \omega_0$ | stark gedämpft (aperiodisch) |

Je nach der Größe von Dämpfungskonstante δ und Eigenkreisfrequenz ω_0 ergeben sich drei verschiedene Fälle von gedämpften Schwingungen.

| Physikalische Größe | Bezeichnung |
|---------------------|--------------------------------------|
| ω_0 | Eigenkreisfrequenz |
| ω | Kreisfrequenz des gedämpften Pendels |
| ω_E | Erregerkreisfrequenz |

Zur Unterscheidung der Kreisfrequenzen bei Schwingungen



Die Tacoma-Narrows-Hängebrücke wurde 1938–1940 erbaut und stürzte nach nur vier Monaten Betriebszeit am 7. November 1940 aufgrund winderregter Schwingungen spektakulär ein. Mit einer Mittelspannweite von 853 Metern besaß sie zum Zeitpunkt ihrer Fertigstellung die drittgrößte Spannweite einer Hängebrücke weltweit. Dieser Einsturz war keine Resonanzkatastrophe im eigentlichen Sinn, weil die Erregung nicht durch eine periodische Kraft erfolgte.

Erzwungene Schwingungen

Ist ein **schwingungsfähiges System (ein Oszillator)** einer periodischen äußeren Kraft unterworfen, liegt eine **erzwungene Schwingung** vor. Nach einer **Einschwingzeit** schwingt der Körper mit der Frequenz der äußeren Kraft, also mit der **Erregerfrequenz f_E** , die in Hertz angegeben wird.

Resonanzdiagramm

Trägt man die Oszillatoramplitude als Funktion der Erregerfrequenz auf, erhält man ein **Resonanzdiagramm**. Je größer die Dämpfung, desto flacher das Resonanzdiagramm.

Resonanzerscheinungen sind einerseits oft **erwünscht**:

- Beim Funkempfang (Radio, Fernsehen, Handfunk ...) wird die Resonanzfrequenz des Empfängers auf die Erregerfrequenz des gewünschten Senders abgestimmt.
- Mit Ultraschall können kleine Körper zur Resonanz gebracht und damit zerstört werden (Nierensteinzertrümmerung).
- Bei Zungenfrequenzmessern wird durch die zu messende Frequenz eine der geeichten Zungen am stärksten zum Schwingen gezwungen.

Andererseits sind **Resonanzerscheinungen** aber auch **unerwünscht** und sogar **gefährlich**:

- Die Frequenz einer Glocke bzw. die Drehzahl einer Maschine darf nicht mit der Eigenfrequenz der Biegeschwingung ihrer eigenen Welle, der Eigenfrequenz des Gebäudes oder des Fundaments ... übereinstimmen.
- Verkehrslärm – vor allem der niederfrequente von Lastkraftwagen – kann Fensterscheiben zu Schwingungen zwingen, sodass sie klingen.
- Das Marschieren im Takt bzw. Wind kann Tribünen bzw. Brücken gefährden.
- Das Dröhnen von Teilen eines Fahrzeugs hängt von der Geschwindigkeit ab und kann zur Lockerung oder sogar Ablösung von Teilen führen.

Resonanzkatastrophe

Wird die Amplitude eines durch eine periodische Kraft zu Schwingungen gezwungenen Oszillators so groß, dass er zerstört wird, liegt eine **Resonanzkatastrophe** vor.

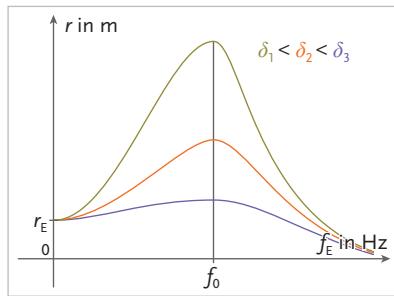
Ein berühmtes auf verschiedenen Videos festgehaltenes Beispiel einer Resonanzkatastrophe ist die Zerstörung eines (Trink)Glases durch einen Tongenerator.

Versuch 2.1.02: Pohlsches Pendel – Aufnahme eines Resonanzdiagramms

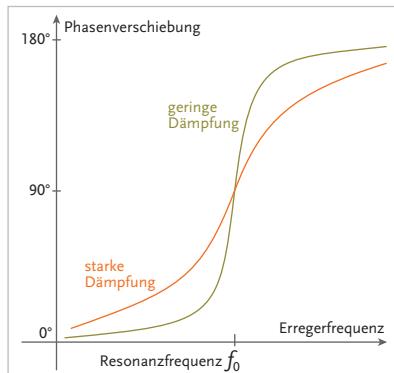
Die Erregerfrequenz wird von null beginnend langsam gesteigert.

- Zuerst schwingen die Kupferscheibe und der Erreger **phasengleich** und mit gleicher Amplitude.
- Aufgrund der Trägheit ergibt sich für größere Erregerfrequenzen, die aber noch wesentlich kleiner als die Eigenfrequenz f_0 sind, eine **Phasenverschiebung** und **Vergroßerung der Amplitude**.
- Stimmt die Erregerkreisfrequenz etwa mit der Eigenfrequenz überein, tritt **Resonanz** auf. Die Amplitude nimmt je nach Dämpfung ein **Vielfaches der Erregeramplitude** an und die Phase eilt um 90° nach.
- Bei geringer Dämpfung kann der Oszillatator zerstört werden: **Resonanzkatastrophe**.

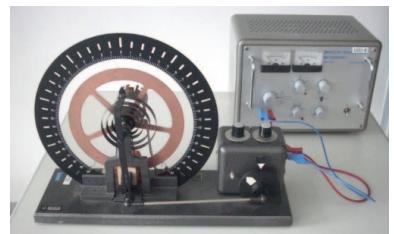
Wird die Erregerfrequenz über die Eigenfrequenz hinaus gesteigert, nimmt die Amplitude wieder ab. Die Phase eilt um 180° nach, weil der Oszillator dem schnellen Schwingen des Erregers aufgrund seiner Trägheit nicht mehr folgen kann.



Die drei **Resonanzkurven** zeigen ein Maximum bei der Eigenfrequenz f_0 und sind umso flacher, je stärker die Dämpfung ist.



Die Kurve zeigt das Nacheilen der **Phase** des Pendels im Vergleich zum Erreger in Abhängigkeit von der Erregerfrequenz.



Das pohlsche Drehpendel zur Demonstration von erzwungenen gedämpften Schwingungen

Resonare: lateinisch für wieder klingen.



Die **Einschwingzeit** ist auch beim Sprechen sowie bei Musikinstrumenten von großer Bedeutung. Sie beträgt bei einer Trompete ca. 20 ms. Die Einschwingzeit einer Flöte beträgt etwa das 15-Fache der Einschwingzeit einer Trompete.



Die Zungen mit einer der Erregerfrequenz entsprechenden Eigenfrequenz führen eine erzwungene Schwingung aus



Die mathematische Behandlung von erzwungenen Schwingungen wird im Allgemeinen mithilfe von Differentialgleichungen der Art

$$m \cdot d^2y/dt^2 = D \cdot y - k \cdot dy/dt + F(t)$$

durchgeführt, wobei $F(t)$ die erzwingende äußere Kraft ist. Siehe Kap. D, 1.



Ziele erreicht? – „Erzwungene und gedämpfte Schwingung“

- 2.1.30** Wie unterscheidet man zwischen den drei Fällen von **Dämpfung**?
- 2.1.31** Berechnen Sie die **Schwingungsgleichung** eines schwach gedämpften Pendels mit 250 g Masse an einer Feder mit $D = 2 \text{ N} \cdot \text{dm}^{-1}$, das zur Zeit $t = 0 \text{ s}$ um 5 cm aus der Gleichgewichtslage nach unten ausgelenkt wird. Die Dämpfungskonstante beträgt 4 % der Eigenkreisfrequenz. Zeichnen Sie den Graphen rechnerunterstützt.
- 2.1.32** Wie viel Prozent der **Eigenkreisfrequenz** muss die **Dämpfungskonstante** sein, damit die Kreisfrequenz einer schwach gedämpften Schwingung
a) um 10 % kleiner, b) um ein Viertel und c) um 90 % kleiner ist als die Eigenkreisfrequenz.
- 2.1.33** Eine Kugel von 10 g schwingt an einer sehr leichten Feder mit einer Federkonstante $D = 1 \text{ N} \cdot \text{dm}^{-1}$. Berechnen Sie die **Schwingungsgleichung**, wenn die Dämpfungskonstante 2 s^{-1} und die Amplitude 8 cm beträgt. Auf welchen Bruchteil der Anfangsamplitude sinkt die Amplitude nach
a) fünf vollen Schwingungen und b) nach zehn vollen Schwingungen? Zeichnen Sie den Graphen rechnerunterstützt und kontrollieren Sie damit Ihre Berechnungen.
- 2.1.34** Geben Sie erwünschte und unerwünschte **Resonanzphänomene** an.
- 2.1.35** Welche Geschwindigkeit soll ein Pkw auf einer Autobahnbrücke mit Dehnfugen im Abstand von 20 m vermeiden, wenn der Pkw eine **Eigenfrequenz** von 0,5 Hz hat?
- 2.1.36** Welchen Einfluss hat eine zusätzliche Beladung des Pkws in Aufgabe 2.1.35?
- 2.1.37** Analysieren Sie den Einfluss des Dehnfugenabstandes aus dem Beispiel 2.1.35 auf die zu meidende Geschwindigkeit.

2.1.7 Energieformen bei Schwingungen

Die Energie ist eine der wichtigsten physikalischen Größen, die die Beschreibung vieler Vorgänge vereinfacht. So auch bei Schwingungen. Bei den erzwungenen Schwingungen haben wir bereits erwähnt, dass dem Pendel Energie zugeführt wird, um die Reibungsverluste auszugleichen.

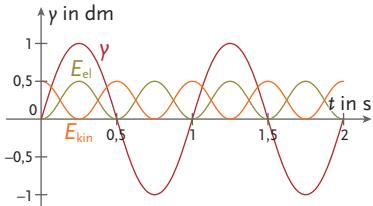


Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **elastische** und die **kinetische Energie** eines ungedämpften Federpendels skizzieren;
- die **Abhängigkeit der Gesamtenergie** von der Masse, der Schwingungsfrequenz und der Amplitude angeben;
- die **maximale elastische** bzw. **maximale kinetische Energie** spezieller Pendel berechnen.

Zusätzlich zur kinetischen Energie tritt bei Pendeln mindestens eine weitere Energieform auf.



Skizze zu Beispiel 2.1.24: Verlauf der kinetischen und der elastischen Energie eines reibungsfreien Federpendels im Vergleich zur Schwingung selbst. Die Energie ist in Joule aufgetragen; die momentane Auslenkung in Dezimetern und die Zeit in Sekunden.

Beispiel 2.1.24: Energieformen bei einem speziellen Federpendel

Wir betrachten ein reibungsfreies Federpendel, das um 10 cm aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt wird und mit einer Periodendauer von einer Sekunde schwingt. Im höchsten Punkt hat das Pendel nur die in der gestauchten Feder ($D = 1 \text{ N/cm}$) gespeicherte elastische Energie, in der Gleichgewichtslage nur kinetische Energie.

Trägt man die beiden **Energieformen** in ein E-t-Diagramm ein, erkennt man die **doppelte Periode** des Wechsels zwischen den Energieformen im Vergleich zum y-t-Diagramm. Da die **elastische** und die **kinetische Energie** jeweils quadratisch von y bzw. v abhängen, werden nur positive Werte angenommen.

Zu Beginn des Kapitels 2.1 Schwingungen haben wir die harmonische Schwingungsfunktion $y(t)$ und die zugehörige Geschwindigkeitsfunktion $v(t)$ angegeben. Mithilfe von $y(t)$ erhalten wir die elastische Energie eines harmonischen Federpendels; mithilfe von $v(t)$ die kinetische Energie eines harmonischen Pendels als Funktion der Zeit.

Energieformen beim Federpendel

Die **kinetische** und die **elastische Energie** eines Federpendels sind **zeitabhängig**:

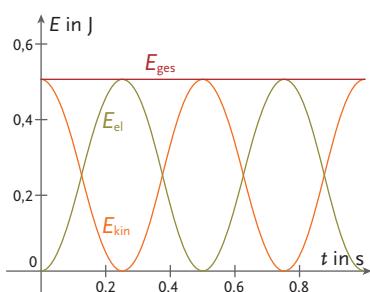
$$\begin{aligned} E_{\text{kin}}(t) &= m \cdot v(t)^2 / 2 \text{ und} \\ E_{\text{el}}(t) &= D \cdot y(t)^2 / 2. \end{aligned}$$

Weil $\sin(x)$ zwischen -1 und 1 beschränkt ist, nimmt $\sin(x)^2$ Werte zwischen 0 und 1 an. Damit wird mathematisch das stets positive Vorzeichen der Energien bei Pendelvorgängen bestätigt, weil $y(t)$ und $v(t)$ proportional zu $\sin(t)$ sind.

Gesamtenergie einer ungedämpften harmonischen Schwingung

Die **Gesamtenergie ist konstant** und gleich der maximalen kinetischen Energie:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}, \text{max}} = m \cdot v_{\text{max}}^2 / 2 = m \cdot (\omega \cdot r)^2 / 2 = m \cdot 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot r^2 / 2 = 2\pi^2 \cdot m \cdot f^2 \cdot r^2 = E_{\text{pot}, \text{max}} = D \cdot r^2 / 2.$$

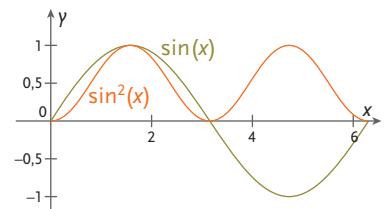


Kinetische, elastische und Gesamtenergie eines reibungsfreien Federpendels. Zu den numerischen Daten vergleichen Sie Beispiel 2.1.24.



Ziele erreicht? – „Energieformen bei Schwingungen“

- 2.1.38** Geben Sie die Formeln für die **kinetische** und die **elastische Energie** eines **Federpendels** an.
- 2.1.39** Ein nahezu ungedämpftes **Federpendel** wird um 5 cm aus der Gleichgewichtslage ausgelenkt. Berechnen Sie die maximale Geschwindigkeit, wenn die Richtgröße 2 N/dm und die Pendelmasse 100 g beträgt. Skizzieren Sie das v-t- und das $E_{\text{kin}}\text{-t}$ -Diagramm.
- 2.1.40** Ein nahezu ungedämpftes **Federpendel** schwingt mit 5 dm/s durch die Gleichgewichtslage. Berechnen Sie die Richtgröße, wenn die Amplitude 10 cm und die Masse 10 dag beträgt. Skizzieren Sie das y-t- und das $E_{\text{pot}}\text{-t}$ -Diagramm.
- 2.1.41** Geben Sie die Formel für die **Gesamtenergie** einer **ungedämpften harmonischen Schwingung** an und interpretieren Sie sie.
- 2.1.42** Berechnen Sie die **Gesamtenergie** eines Federpendels mit einer Masse von 1 kg, einer Periodendauer von 1 s und einer Amplitude von 1 dm. Skizzieren Sie die kinetische Energie sowie die momentane Auslenkung für zwei volle Perioden der Auslenkung.



Die Funktion f mit $f(x) = \sin^2(x) = \{\sin(x)\}^2 = \{1 - \cos(2x)\}/2$ ist zwischen 0 und 1 beschränkt. Bei der Leistung von Wechselstrom wird uns diese Kurve wieder begegnen.

Die **Gesamtenergie** einer ungedämpften harmonischen Schwingung ist direkt proportional zur Masse, zum Quadrat der Frequenz und zum Quadrat der Amplitude.

$$\begin{aligned} m &\rightarrow 2m \Rightarrow E_{\text{ges}} \rightarrow 2E_{\text{ges}} \\ f &\rightarrow 2f \Rightarrow E_{\text{ges}} \rightarrow 4E_{\text{ges}} \\ r &\rightarrow 2r \Rightarrow E_{\text{ges}} \rightarrow 4E_{\text{ges}} \end{aligned}$$

2.1.8 Kopplung von Pendeln

Den Begriff der **Kopplung**, genauer der **Rückkopplung**, hört man im Alltag oft bei Liveübertragungen, wenn beispielsweise ein Zuhörer das Radiogerät eingeschaltet hat und an der Sendung mittels Telefon teilnimmt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

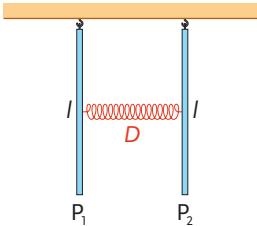
- angeben, wovon die **Geschwindigkeit der Energieübertragung** abhängt;
- eine **Schwebung** erklären;
- die **y-t-Diagramme** zweier gleicher gekoppelter Pendel interpretieren.

Bisher haben wir stets ein einzelnes Pendel betrachtet und bezüglich

- momentaner Auslenkung $y(t)$ bzw. Amplitude r ,
 - Periodendauer T bzw.
 - Energie E
- untersucht.

Nun untersuchen wir die Kopplung von Pendeln, beschränken uns aber auf den einfachsten Fall der **Kopplung von gleichen Oszillatoren**. Wird das Pendel 1 in der nebenstehenden Abbildung angestoßen, wird durch die **Kopplung** eine periodische Kraft auf das Pendel 2 ausgeübt, sodass es zu Schwingungen gezwungen wird. Dabei wird Energie vom ersten auf das zweite Pendel übertragen, bis die Amplitude des ersten Pendels verschwindet. Dann beginnt der Energieübertrag von Pendel 2 auf Pendel 1. Ohne Reibung erfolgt der Energieübertrag unaufhörlich. Der zeitliche Verlauf der Schwingung eines Kopplungspartners ist als spezielle Überlagerung von zwei Schwingungen mit den Kreisfrequenzen ω_1 und ω_2 , aber gleicher Amplitude r darstellbar:

$$y_1(t) = r \cdot \sin(\omega_1 \cdot t) + r \cdot \sin(\omega_2 \cdot t) = r \cdot \{\sin(\omega_1 \cdot t) + \sin(\omega_2 \cdot t)\}$$

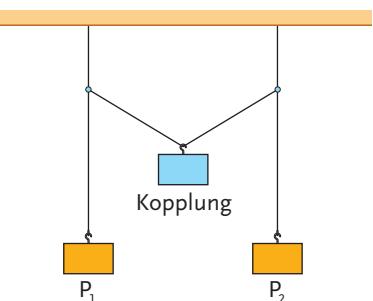


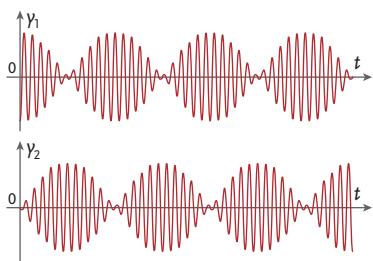
Zwei identische Stabpendel sind durch eine Feder miteinander gekoppelt.

Die

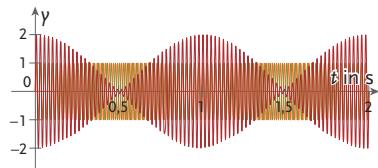
- Federkonstante D ,
- die vertikale Position der Feder,
- die Stabmassen und
- der Abstand der beiden Stabpendel

bestimmen die Kopplungsstärke und damit die Geschwindigkeit der Energieübertragung.





Die beiden y - t -Diagramme zeigen das Bild einer **Schwebung**. Diese entsteht, wenn zwei parallele Schwingungen gleicher Amplitude, aber leicht unterschiedlicher Frequenz überlagert werden.



Ein Ton mit 40 Hz wird mit einem Ton der gleichen Amplitude mit 41 Hz überlagert. Es ergibt sich eine Schwebung mit der Schwebungsfrequenz von 1 Hz.

Mithilfe der bereits bei der Überlagerung von Schwingungen verwendeten goniometrischen Beziehung $\sin(x) + \sin(y) = 2 \cdot \sin\left(\frac{x+y}{2}\right) \cdot \cos\left(\frac{|x-y|}{2}\right)$ folgt

$$y_1(t) = 2r \cdot \{\sin[(\omega_1 + \omega_2) \cdot t/2] \cdot \cos[(\omega_1 - \omega_2) \cdot t/2]\}$$

Der Term $2r \cdot \cos[(\omega_1 - \omega_2) \cdot t/2]$ kann als zeitlich veränderliche Amplitude aufgefasst werden, d. h., die Amplitude ist **moduliert**. Die Schwingung erfolgt mit der Kreisfrequenz $(\omega_1 + \omega_2)/2$.

$$(\omega_1 - \omega_2)/2\pi = f_1 - f_2$$

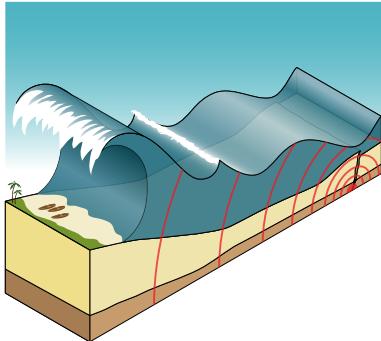
wird **Schwebungsfrequenz** genannt und ist doppelt so groß wie die Frequenz der Amplitudenschwingung.

Auch Molekül- oder Atomverbände eines Körpers stellen gekoppelte Oszillatoren dar. Sie werden in der Festkörperphysik eingehend untersucht (**Gitterschwingungen**).



Ziele erreicht? – „Kopplung von Pendeln“

- 2.1.43** Von welchen physikalischen Größen hängt die Geschwindigkeit der **Energieübertragung** bei gekoppelten Pendeln ab?
- 2.1.44** Skizzieren Sie die beiden **y-t-Diagramme** zweier gleicher gekoppelter Pendel.
- 2.1.45** Überlegen Sie, mit welcher Schwingung die Schwingung $y(t) = 10 \cdot \sin(200 \cdot t)$ cm überlagert werden muss, um eine **Schwebung** mit 2 Hz zu ergeben. Stellen Sie die beiden Schwingungen und ihre Überlagerung mit einem Grafikprogramm dar.



Das Seeboden bzw. der dadurch ausgelöste Tsunami am 26. Dezember 2004 und seine Folgen kosteten insgesamt etwa 230 000 Menschen, davon allein in Indonesien rund 165 000 das Leben. Mehr als 110 000 Menschen wurden verletzt und mehr als 1,7 Millionen Küstenbewohner rund um den Indischen Ozean wurden obdachlos.

2.2 Wellen

Am 26. Dezember 2004 löste eine Riesenwelle – ein **Tsunami** – verheerende Verwüstungen rund um den Indischen Ozean aus.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **lineare Welle**, **Flächen-** und **Raumwelle**, **Stoß-** und **periodische Welle** sowie **Transversal-** und **Longitudinalwelle** unterscheiden;
- die Formel für die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** von Wellen angeben;
- die Begriffe **Wellenzentrum**, **Wellenfront** und **Wellenstrahl** beschreiben, experimentell untersuchen und für spezielle Wellen skizzieren;
- die **allgemeine Form einer harmonischen Welle** angeben und mit ihr rechnen;
- den Zusammenhang zwischen **Wellenlänge**, **Frequenz** und **Ausbreitungsgeschwindigkeit** interpretieren.

Im Kapitel über gekoppelte Pendel haben wir den Energieübertrag zwischen zwei gekoppelten identischen Pendeln behandelt. Nebenstehend ist eine **Wellenmaschine** mit 48 gekoppelten Drehpendeln abgebildet. Wenn wir eines der Pendel auslenken, wird die Auslenkung durch die Kopplung zeitverzögert an die benachbarten Pendel

weitergegeben, bis beim letzten Pendel eine Reflexion an einem losen Ende auftritt und die Welle zurückläuft. Dabei wird keine Masse transportiert. Jedes Drehpendel schwingt um seine Ruhelage. Zusätzlich zur **Zeitabhängigkeit** der momentanen Auslenkung (Elongation) γ aus der Gleichgewichtslage einer Schwingung tritt also noch die **Ortsabhängigkeit** dazu.

Welle

Eine **Welle** ist eine zeitliche und räumliche Veränderung eines Schwingungszustandes. Die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** einer Welle bezeichnen wir mit c . Eine Welle transportiert Energie.

Um eine mathematische Beschreibung einer Welle zu erhalten, gehen wir von der Gleichung einer Schwingung $\gamma(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t)$ aus. Die momentane Auslenkung einer Welle an der Position x zur Zeit t – also $\gamma(x, t)$ – ist genauso groß wie an der Stelle $x - z \cdot c \cdot T$. Dabei ist z eine ganze Zahl und T die Periodendauer und c die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle. Damit ergibt sich die folgende Gleichung.

Ungedämpfte harmonische Welle

$$\gamma(x, t) = r \cdot \sin\left(\omega \cdot \left(t - \frac{x}{c}\right)\right) = r \cdot \sin\left(\omega \cdot t - \omega \cdot \frac{x}{c}\right) = r \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x).$$

Der Quotient aus der Kreisfrequenz ω und der Ausbreitungsgeschwindigkeit c der Welle heißt **Wellenzahl** k oder Wellenvektor(betrag) (in Ausbreitungsrichtung) und hat die Einheit $1/m$.

Mit dem Wellenvektor ergibt sich die allgemeine Form einer harmonischen Welle zu $\gamma(\vec{x}, t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t - \vec{k} \cdot \vec{x})$.

Um die allgemeine Form einer harmonischen Welle leichter interpretieren zu können, halten wir einen der beiden Parameter x oder t fest.

- $x = \text{konstant} = x_0$: $\gamma(x_0, t) = \gamma(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot (t - t_0)) = r \cdot \sin(\omega \cdot t - \omega \cdot t_0)$, also $\gamma(t) = r \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi_0)$

Das ist die **zeitabhängige** ungedämpfte harmonische Schwingung(sgleichung). Der Oszillator in der Entfernung x_0 vom Erreger der Welle wird durch $\gamma(t)$ beschrieben.

- $t = \text{konstant} = t_0$: $\gamma(x, t_0) = \gamma(x) = r \cdot \sin(\omega \cdot (t_0 - x/c)) = r \cdot \sin(\omega \cdot t_0 - \omega \cdot x/c)$, also $\gamma(x) = r \cdot \sin\left(\varphi_0 - \omega \cdot \frac{x}{c}\right) = r \cdot \sin(\varphi_0 - k \cdot x)$

Dabei handelt es sich um eine **ortsabhängige** ungedämpfte harmonische Schwingungsgleichung. D. h., wir haben eine Momentaufnahme (ein Momentanbild) der Welle zur Zeit t vor uns.

Wir halten zusammenfassend fest: Ungedämpfte harmonische Wellen weisen eine **räumliche und zeitliche Periodizität** auf. Die räumliche ist durch die Wellenlänge und die zeitliche durch die Periodendauer bestimmt.

Wellen treten sehr variantenreich auf. Es empfiehlt sich eine Einteilung nach

- der **Bewegungsrichtung** der einzelnen Oszillatoren,
- der **Ausbreitung**,
- der Art der **übertragenen Energie** und
- nach der Art der **Erregung**.



Die 48 gekoppelten identischen Drehpendel einer Wellenmaschine zeigen eine typische Wellenformation



Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von etwa 343 m/s von Schallwellen in Luft bei 1 013 hPa macht man sich bei der Dreisekundenregel bei Gewittern zunutze. Folgt Donner etwa drei Sekunden nach einem Blitz, ist er in rund einem Kilometer Entfernung gesichtet worden.



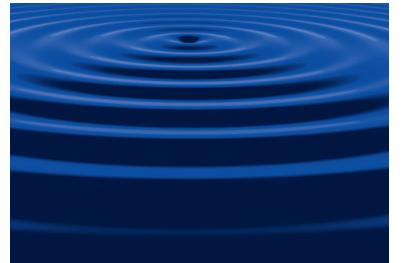
Licht breitet sich im Vakuum mit beinahe 300 000 km/s aus, also

$$c_{\text{Licht}} \approx 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$



Wellenzahl k bzw. Betrag des Wellenvektors

$$|\vec{k}| = k = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda}$$



Die konzentrischen Kreise sind die **Wellenfronten** einer Flächenwelle; der Abstand zwischen zwei Wellenfronten beträgt eine Wellenlänge. Wasserwellen sind **Transversalwellen**. Die einzelnen Wassermoleküle bewegen sich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Wasserwelle.



Konzentrische Kugeloberflächen sind die Wellenfronten einer Kugelwelle (einer speziellen Raumwelle) in einem homogenen Medium.



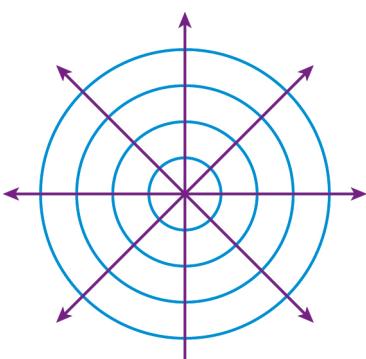
Polarisation von Wellen
siehe Kap. D, 2.3.



Vielleicht kennen Sie auch den Liedtext: „Ins Wasser fällt ein Stein, ganz heimlich, still und leise. Und ist er noch so klein, er zieht doch weite Kreise.“



Louis-Victor de Broglie,
1892 BIS 1987, FRANZÖSISCHER
PHYSIKER, NOBELPREIS FÜR
PHYSIK IM JAHR 1929 FÜR DIE
ENTDECKUNG DER WELLENNATUR
VON ELEKTRONEN – WELLE-
TEILCHEN-DUALISMUS



Vier Wellenfronten und acht senkrecht zu den Wellenfronten verlaufende Wellenvektoren

Versuch 2.2.01: Seilwelle und Federwelle

- Zwei Schülerinnen halten ein Seil leicht gespannt fast horizontal. Eine der beiden bewegt ihre Hand senkrecht auf und ab. Die einzelnen gedachten sehr kurzen **Seilabschnitte** führen **vertikale Schwingungen** aus, während sich die **Seilwelle** senkrecht dazu **horizontal** ausbreitet.
- Eine Feder wird vertikal gehalten und ein Ende vertikal in Schwingung versetzt. Die einzelnen **Windungen** der Feder führen ebenfalls **vertikale Schwingungen** aus und auch die **Federwelle** breitet sich **vertikal** aus.

Transversal- und Longitudinalwelle

- Bei einer **Transversalwelle (TW)** bzw. **Querwelle** bewegen sich die einzelnen Oszillatoren quer (transversal) zur Ausbreitungsrichtung der Welle.
- Bei einer **Longitudinalwelle (LW)** bzw. **Längswelle** bewegen sich die einzelnen Oszillatoren in der Ausbreitungsrichtung der Welle.

Beispiele für Transversalwellen sind Lichtwellen, wie wir im Kapitel 2.3 mithilfe der Polarisation noch nachweisen werden. Schallwellen sind Longitudinalwellen.

Versuch 2.2.02: Wasser- und Schallwelle

- Fällt ein Stein ins Wasser, bilden sich konzentrische **Flächenwellen** längs der **Wasseroberfläche** aus.
- Wenn wir eine nahezu punktförmige Schallquelle in die Mitte eines sehr großen Raumes (eines Fußballstadions) stellen, messen wir an verschiedenen Punkten im Abstand r um die Schallquelle die gleiche Lautstärke. Schallwellen in homogenen Räumen (gleiche Dichte, Temperatur und Druck) sind kugelsymmetrische **Raumwellen**.

Lineare Welle, Flächen- und Raumwelle

- Eine lineare Welle breitet sich längs einer Geraden aus,
- eine Flächenwelle längs einer (Ober-)Fläche und
- eine Raumwelle im Raum.

Weitere Beispiele für lineare Wellen sind linear polarisierte Wellen. Die Membranen von Trommeln führen Flächenschwingungen aus. Eine punktförmige Schallquelle sendet Raumwellen aus.

Versuch 2.2.03: Seil- und Lichtwelle

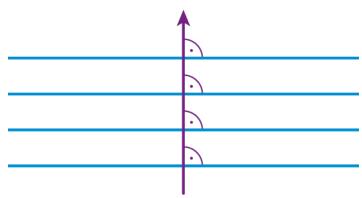
- Eine **Seilwelle** können wir mittels **mechanischer Energie** erzeugen.
- Eine **Lichtwelle** können wir mit einem Laser erzeugen.

Mechanische, elektromagnetische und Materiewelle

- Eine **mechanische Welle** überträgt mechanische Energie,
- eine **elektromagnetische Welle** elektromagnetische.
- **Materiewellen** (z. B. Elektronenwellen) wurden 1924 von Louis-Victor de Broglie postuliert. Mit **Materiewellen** wurden und werden auch Interferenzversuche durchgeführt. Beim Elektronenmikroskop erreicht man aufgrund der viel kleineren Wellenlänge der Elektronenwelle höhere Auflösungen als mit Lichtmikroskopen. Lichtmikroskope verwenden sichtbares Licht mit Wellenlängen zwischen rund 400 nm und 800 nm. Als Auflösung bezeichnet man die kleinste Distanz zwischen zwei noch als getrennt wahrgenommenen Punkten.

Versuch 2.2.04: Stoßwelle und periodische Welle

- Ein leicht gespanntes, mehrere Meter langes, in Ruhe befindliches Gummiband wird durch einen Handkantenschlag einmal gestört: eine **Stoßwelle** bzw. ein Wellenpaket breitet sich durch das Band aus.
- Das leicht gespannte Gummiband wird durch regelmäßige Bewegungen zu einer periodischen Schwingung gezwungen: Eine **periodische Welle** wird erzeugt.



Vier parallele **Wellenfronten** und ein dazu senkrecht verlaufender **Wellenvektor**, der die Ausbreitungsrichtung der Welle angibt

Stoß- und periodische Welle

- Eine **Stoßwelle** breitet sich nach einer **einmaligen Störung** aus,
- eine **periodische Welle** bei einer **periodischen Erregung**.

Ein weiteres Beispiel für (akustische) Stoßwellen ist der Knalleffekt. Eine harmonische (sinusförmige) Welle ist eine spezielle periodische Welle.

Zur Beschreibung von Wellen werden die Begriffe Wellenzentrum, Wellenfront und Wellenstrahl benötigt.

Wellenzentrum, Wellenfront und Wellenvektor

- Das **Wellenzentrum** ist der Ort des Erregers, von dem sich die Welle ausbreitet.
- Die **Wellenfront** verbindet alle Punkte der Welle mit gleicher Phasenlage. Bei punktförmigen Erregern ergeben sich in der homogenen Ebene Kreise und im homogenen Raum Kugeln als Wellenfronten. Ebene Wellen haben als Wellenfront eine Ebene. Das Sonnenlicht kommt auf der Erde aufgrund der großen Entfernung gleichsam als ebene Welle an.
- **Wellenvektoren** stehen senkrecht auf den Wellenfronten und geben damit die Ausbreitungsrichtung der Welle an.



Elastische Seile sind beim Bungee-Jumping ebenso im Einsatz wie in der Forsttechnik

Versuch 2.2.05: Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Stoßwelle

Ein horizontal leicht gespanntes, mehrere Meter langes, in Ruhe befindliches Gummiseil wird durch einen Handkantenschlag einmal gestört. Die Spannung des Seiles wird schrittweise gesteigert und die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßwelle beobachtet und gegebenenfalls gemessen.

- a) Je **größer** die mechanische Spannung $\sigma = F/A$, die als Maß für die Kopplung der einzelnen gedachten Seilstücke angesehen werden kann, ist, umso **schneller** breitet sich die Stoßwelle aus.
- b) Ist ein Gummiseil mit **größerer** Dichte vorhanden, kann man feststellen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit **niedriger** ist.

Begründung für b): Die größere Dichte ergibt bei gleichem Volumen eine größere Masse und damit eine größere Trägheit. Allgemein gilt für die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen Folgendes.

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen

Die **Wellenausbreitungsgeschwindigkeit** c ist direkt proportional zur Wurzel aus dem Kopplungsmaß und indirekt proportional zur Wurzel aus dem Trägheitsmaß.

$$c = \sqrt{\frac{\text{Kopplungsmaß}}{\text{Trägheitsmaß}}}$$



Für Musiker ist die Frequenz von 440 Hz die Referenzfrequenz. Der Kammerton a¹ schwingt mit einer Frequenz von 440 Hz.



Die samstägliche Sirenenprobe liefert in Österreich eine Referenzfrequenz von 420 Hz, also relativ nahe am Kammerton a¹.



Bei den Pendeln haben wir die Formel

$$\omega = \sqrt{\frac{D}{m}}$$

kennengelernt.

m ist ein Maß für die Trägheit und wegen

$$\nu = \frac{\omega}{r}$$

ist es nicht mehr sehr weit zur Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen.

Für das Beispiel 2.2.01 ergibt sich bei **pythagoreischer Stimmung**

$$f_E : f_A = 3 : 4$$

$$f_E = 3 \cdot f_A / 4 = 165 \text{ Hz}$$



Die Grundschwingung einer Saite besitzt als Wellenlänge die doppelte Seitenlänge.

Pythagoras (um 570 bis nach 510 v. Chr.) fand heraus, dass Akkorde angenehm klingen, wenn die Frequenzen der Teiltöne im Verhältnis kleiner ganzer Zahlen stehen.
 Oktave: 2 : 1
 Quinte: 3 : 2
 Quarte: 4 : 3
 Große Terz: 5 : 4
 Kleine Terz: 6 : 5



CHRISTIAAN HUYGENS,
1629 BIS 1695, HOLLÄNDISCHER
PHYSIKER

Für eine Seilwelle, bei der die Spannung σ ein Maß für die Kopplung und die Dichte ρ ein Maß für die Trägheit ist, gilt folglich für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit:

$$c = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}}$$

Beispiel 2.2.01: Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in einer Gitarrensaite

Der Durchmesser der dicksten Saite einer klassischen Gitarre beträgt rund 1 mm.

Die Dichte kann mit rund 3 kg/dm^3 angenommen werden, weil der Kunststoffkern mit Metall umhüllt ist.

Für eine Kraft mit einem Betrag von 100 N ergibt sich für eine frei schwingende Länge von etwa 65,5 cm eine Frequenz von rund 157,3 Hz, wie die nachstehende Berechnung zeigt.

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2 \cdot l} = \frac{1}{2 \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{4 F}{d^2 \cdot \pi \cdot \rho}} = \frac{1}{d \cdot l} \cdot \sqrt{\frac{F}{\pi \cdot \rho}}$$

$$f = \frac{1}{0,001 \text{ m} \cdot 0,655 \text{ m}} \cdot \sqrt{\frac{100 \text{ N}}{\pi \cdot 3000 \text{ kg/m}^3}} \approx 157,3 \text{ Hz}$$

Die E-Saite klingt eine Quarte tiefer als die A-Saite, die die halbe Frequenz des Kammertons a¹ besitzt. Also $f_A = 220 \text{ Hz}$.

Die 157,3 Hz sind realistisch, weil $\frac{3}{4}$ von 220 Hz = 165 Hz und weil bei einer Quarte das Frequenzverhältnis 4:3 beträgt.



Ziele erreicht? – „Wellen“

2.2.01 Geben Sie die drei **Arten von Wellen** an.

2.2.02 Geben Sie die Formel für die **Ausbreitungsgeschwindigkeit** von Wellen an.

2.2.03 Wie schnell ist eine Welle in einer **Stahlsaite** mit 1 m Länge, einem Durchmesser von 1 mm und einer Dichte von $7,5 \text{ t/m}^3$, wenn die Saite durch eine Kraft von 1 kN gespannt wird?

2.2.04 Um wie viel Prozent muss die Spannkraft einer eingespannten **Saite** vergrößert werden, um eine um 40 % höhere Ausbreitungsgeschwindigkeit zu erreichen, wenn Sie alle anderen Parameter unverändert lassen? Geben Sie Alternativen für die Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit an.

2.2.1 Das Prinzip von Huygens und mechanische Wellen

Naturwissenschaftler möchten möglichst viele Phänomene mit nur einem zugrunde liegenden Prinzip erklären. Das von **Christiaan Huygens** formulierte und von **Gustav Kirchhoff** (1824 bis 1887) modernisierte Prinzip ist ein mustergültiges Beispiel dafür.

Wasser-, Seil- und Schallwellen sowie Druckwellen bei Explosionen sind Beispiele für mechanische Wellen. Sich von Wasserwellen auf offener See oder im Meer treiben zu lassen, ist für viele Menschen eine klassische Urlaubsbeschäftigung.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- Beispiele für **mechanische Wellen** nennen;
- das **huygenssche Prinzip** angeben;
- mit **mechanischen Wellen** experimentieren und eine **mechanische Welle** definieren.

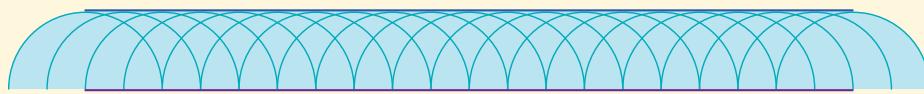
Die Ausbreitung von Wellen wird durch ein erstmals von Christiaan Huygens aufgestelltes Prinzip beschrieben.

Prinzip von Huygens

Eine Welle breite sich aus, indem von jedem ihrer Punkte eine neue im Allgemeinen (halb)kugelförmige **Elementarwelle** ausgeht. Durch **Interferenz** aller Elementarwellen ergibt sich die tatsächlich beobachtete Welle. Die **Einhüllende aller Elementarwellenfronten** ergibt die **Wellenfront**.

Beispiel 2.2.02: Prinzip von Huygens für eine ebene Welle

Jeder Punkt einer Wellenfront einer ebenen Welle ist selbst Ausgangspunkt einer Elementarwelle, sodass die Einhüllende wieder eine Ebene ist.



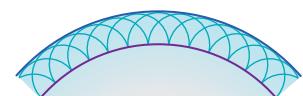
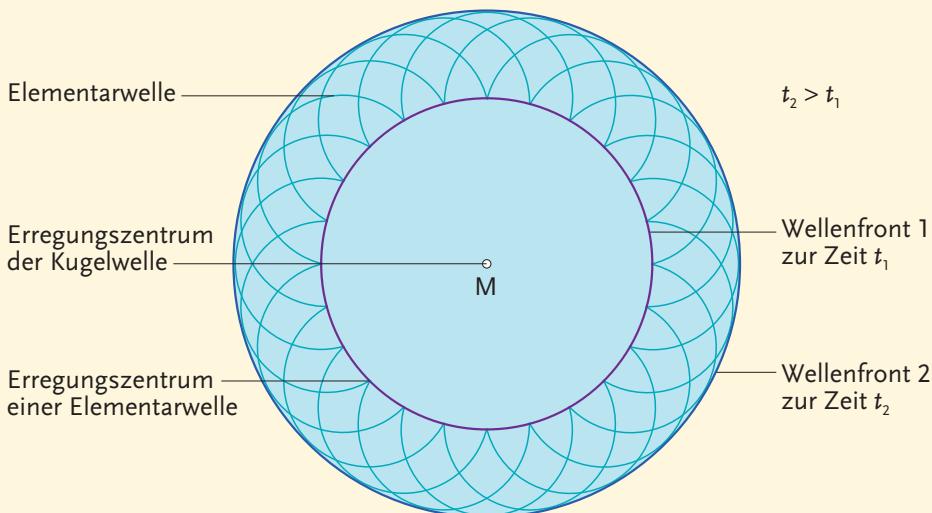
Die typischen **Wellenphänomene Beugung** und **Brechung** können mit dem huygensschen Prinzip ebenso erklärt werden wie die **Ausbreitung in einem homogenen Medium** und die **Reflexion**.

Die Wellenphänomene **Reflexion**, **Beugung** und **Brechung** werden uns bei Lichtwellen wieder begegnen, sodass wir uns hier kurz fassen.

Beispiel 2.2.03: Prinzip von Huygens für eine Kugelwelle

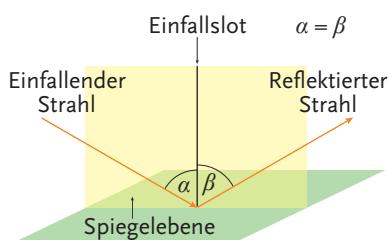
Jeder Punkt einer Wellenfront einer Kugelwelle ist selbst Ausgangspunkt einer Elementarwelle, sodass die Einhüllende wieder eine Kugel ist.

Schnitt durch eine Kugelwelle

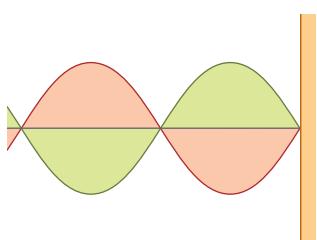


Die **Einhüllende aller Elementarwellenfronten** ergibt konzentrische Kreise bzw. konzentrische Kugeln als Wellenfronten für eine Kreis- bzw. eine Kugelwelle

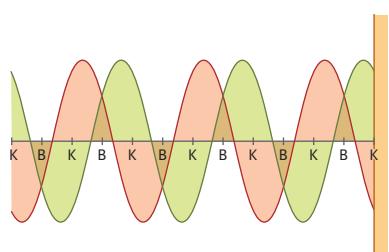
Reflexionsgesetz: Der Einfallswinkel α ist gleich dem Reflexionswinkel β .



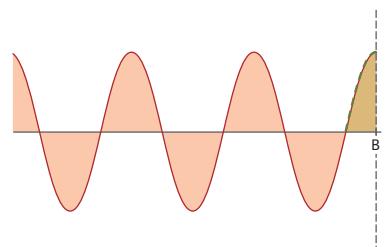
Der einfallende und der reflektierte Strahl liegen in einer Ebene



Reflexion an einem festen Ende bewirkt am Ort der Reflexion einen Phasensprung um π . Der Schwingungszustand der reflektierten Transversalwelle (grün) ist also entgegengesetzt zum Schwingungszustand der (von links) einlaufenden Transversalwelle (rot). Die gesamte Elongation der einfallenden und reflektierten Welle ist an dieser Stelle immer gleich 0. Man nennt so eine Position einen Schwingungsknoten.



Die einlaufende rote Welle wird am rechten festen Ende mit einem Phasensprung von 180° reflektiert, sodass sie als grün markierte Welle zurückläuft.



Die einlaufende rote Welle wird am rechten losen Ende ohne Phasensprung reflektiert, sodass sie als grün markierte Welle zurückläuft.

Das Reflexionsgesetz für Wellen – Winkelbetrachtung

Trifft eine Welle unter dem Einfallswinkel α , gemessen zum Lot, auf eine Grenzfläche, so wird die Welle unter dem Reflexionswinkel $\beta = \alpha$, wieder gemessen zum Lot, reflektiert. Kurz: **Einfallswinkel = Reflexionswinkel**.

Betrachtet man eine Welle auch im Hinblick auf ihre Phase, so muss man unterscheiden, ob die Reflexion an einem festen (z. B. bei einem angebundenen Seil) oder einem losen Ende (z. B. bei einem Peitschenschlag) auftritt.

Das Reflexionsgesetz für Wellen – Phasenbetrachtung

Bei einer Reflexion an einem festen Ende tritt ein Phasensprung um π auf.
Bei einer Reflexion an einem losen Ende tritt kein Phasensprung auf.

In der Einleitung haben wir Wasser-, Seil- und Schallwellen sowie Druckwellen als Beispiele für mechanische Wellen genannt. Die Definition einer mechanischen Welle benutzt das Modell des Masseteilchens.

Mechanische Wellen

Die **Oszillatoren mechanischer Wellen** sind gekoppelte Masseteilchen.

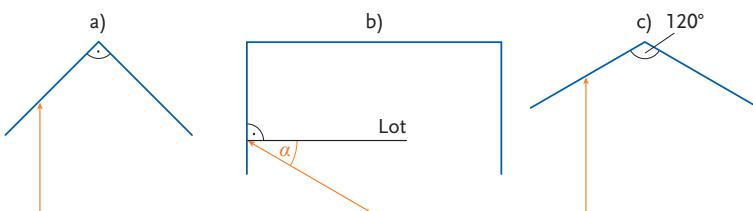
Nach der Art der Kopplung können die gekoppelten Masseteilchen eine transversale oder eine longitudinale Welle erzeugen.



Ziele erreicht? – „Prinzip von Huygens“

2.2.05 Geben Sie das Prinzip von Huygens und das **Reflexionsgesetz** für Wellen an.

2.2.06 Konstruieren Sie den Strahlengang und berechnen Sie alle auftretenden Winkel für folgende Spiegelanordnungen. Variieren Sie den Einfallswinkel für den Fall b).



2.2.2 Brechung

Naturvölker faszinieren auch mit ihren einfachen Jagd- bzw. Fischereimethoden. Besonders beeindruckend ist das Fangen von Fischen mit bloßen Händen. Dabei berücksichtigt man die Brechung von Licht beim Übergang von Wasser in Luft.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- das Brechungsgesetz von Snellius angeben;
- mit dem **Brechungsgesetz von Snellius** operieren;
- das Brechungsgesetz von Snellius interpretieren und dokumentieren.

Tritt eine Welle von einem (isotropen) Medium 1 mit einer Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 in ein (isotropes) Medium 2 mit c_2 , wird die Welle von ihrer Ausbreitungsrichtung abgebracht; die Welle wird **gebrochen**.



TWILLABRORD SNEL VAN ROJEN
(SNELLIUS), 1580 BIS 1626,
HOLLÄNDISCHER PHYSIKER

Brechungsgesetz von Snellius

Trifft eine Welle unter dem Winkel α zum Lot auf eine Grenzfläche zwischen Medium 1 mit Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 und Medium 2 mit c_2 , so ergibt sich der **Brechungswinkel** β , gemessen zum Lot, gemäß

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2}.$$

$$\text{Also } \beta = \arcsin\left(\frac{c_2}{c_1} \cdot \sin \alpha\right).$$

Das Verhältnis von Vakuumlichtgeschwindigkeit zur Ausbreitungsgeschwindigkeit in einem Medium wird **Brechungsindex** bzw. **Brech(ungs)zahl n** genannt.

Ableitung des Brechungsgesetzes mit dem huygensschen Prinzip

Die einfallende Welle trifft zuerst im Punkt A auf. Zu diesem Zeitpunkt beträgt der Abstand der Wellenfront zum Punkt B noch \overline{DB} .

In den $t = \overline{DB}/c_1$ Sekunden bis zum Erreichen von B hat sich die in A erzeugte Elementarwelle um die Strecke $c_2 \cdot t$ im Medium 2 ausgebreitet und den Punkt C erreicht.

$$\frac{\overline{DB}}{c_1} = t = \frac{\overline{AC}}{c_2} \quad \frac{\overline{AB} \cdot \sin \alpha}{c_1} = \frac{\overline{AB} \cdot \sin \beta}{c_2} \quad \frac{\sin \alpha}{c_1} = \frac{\sin \beta}{c_2}$$

Die Verbindung von B mit C liefert die neue Wellenfront. Senkrecht zur neuen Wellenfront erhalten wir die Ausbreitungsrichtung im Medium 2 und damit den Brechungswinkel.

Brechzahl n

Das dimensionslose Verhältnis von Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 zur Lichtgeschwindigkeit c in einem Medium heißt **Brechzahl n** des Mediums.

$$n = \frac{c_0}{c}$$

Damit können wir mit $c_1 = c_0/n_1$ und $c_2 = c_0/n_2$ das Brechungsgesetz von Snellius wie folgt schreiben:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$$

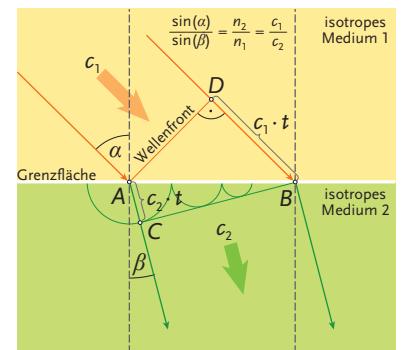
Beispiel 2.2.04: Brechung von Licht beim Übergang von Luft in Wasser

Licht treffe unter einem Winkel von 30° zum Lot auf die Grenzfläche zwischen Luft und Wasser.

$$n_1 = 1,0003, n_2 = 1,33, \alpha = 30^\circ$$

$$\frac{\sin 30^\circ}{\sin \beta} = \frac{1,33}{1,0003}$$

$$\beta = \arcsin \frac{1,0003 \cdot 0,5}{1,33} \approx 22,09^\circ$$



Das Brechungsgesetz von Snellius kann mit dem huygensschen Prinzip begründet werden



Wellenlängen für Schallwellen:

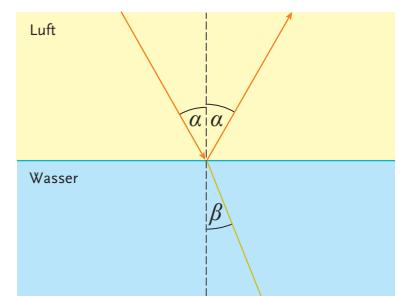
Aus $c = \lambda \cdot f$ folgt

$$\lambda = \frac{c}{f} \approx \frac{330}{f} \text{ m, also}$$

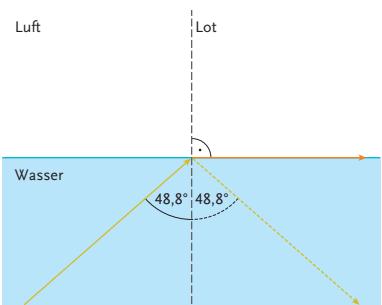
$$\lambda(20 \text{ Hz}) \approx 16,5 \text{ m}$$

$$\lambda(20 \text{ kHz}) \approx 1,65 \text{ cm}$$

Im Beispiel 2.2.04 wird das einfallende Licht zum Lot hin gebrochen.



Das unter 30° zum Lot einfallende Licht wird teilweise an der Grenzfläche reflektiert. Der in das Wasser eindringende Lichtanteil wird gebrochen.



Totalreflexion beim Übergang von Wasser in Luft: Das Licht, das unter $48,8^\circ$ zum Lot auf die Grenzfläche zwischen Wasser und Luft auftrifft, verbleibt vollständig im Wasser

Der Brechungswinkel ist also etwa $22,09^\circ$.

Resümee:

- Beim Übergang ins dichtere Medium tritt eine **Brechung zum Lot** auf.
- Beim Übergang ins dünnere Medium erfolgt eine **Brechung vom Lot weg**.

Totalreflexion

Bei einer Totalreflexion verbleibt die Welle innerhalb des ersten Mediums und tritt nicht mehr in das andere Medium über.

Der **Grenzwinkel** für die **Totalreflexion** ergibt sich als:

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin(n_2/n_1) = \arcsin(c_1/c_2) = \arcsin(\lambda_1/\lambda_2)$$

Totalreflexion kann nur bei einer Brechung vom Lot auftreten. Beim Grenzwinkel α_{Grenz} beträgt der Brechungswinkel 90° .

Beispiel 2.2.05: Totalreflexion von Licht beim Übergang von Wasser in Luft

Den Grenzwinkel der Totalreflexion erhalten wir, wenn der Brechungswinkel 90° beträgt.

$$n_1 = 1,33, n_2 = 1,000\ 3, \beta = 90^\circ$$

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin \frac{1,000\ 3}{1,33} \approx 48,8^\circ$$



Zur Totalreflexion: Eine Fata Morgana und das Flirren des erwärmten Asphalt sind damit auch erklärbar.



Halten Sie eine wasserdichte Uhr unter Wasser und beschreiben Sie qualitativ und quantitativ Ihre Beobachtungen für verschiedene Positionen bzw. Einfallswinkel.



Ziele erreicht? – „Brechung“

2.2.07 Geben Sie das **Brechungsgesetz von Snellius** an.

2.2.08 Berechnen Sie für eine Welle mit 2 m Wellenlänge im Medium 1 und einer um 20 % größeren Wellenlänge im Medium 2 den **Brechungswinkel**. Die Welle trifft unter 30° auf die Grenzfläche 1 nach 2.

2.2.09 Geben Sie die Formel für den Grenzwinkel der **Totalreflexion** an und fertigen Sie eine ausreichend beschriftete Skizze an.

2.2.10 Berechnen Sie für die Welle aus Aufgabe 2.2.08 den Grenzwinkel für die **Totalreflexion**. Was ergibt sich für einen Einfallwinkel, der um 20 % größer als der **Grenzwinkel** ist? Skizzieren Sie Ihre Berechnungen.

2.2.3 Beugung und Interferenz

Hörschall: Frequenzen von rund 20 Hz bis 20 kHz; Wellenlängen von rund 16,5 mm bis 16,5 m

Sichtbares Licht: Wellenlängen von rund 400 nm bis 800 nm

Hörschall besitzt Frequenzen von rund 20 Hz bis 20 kHz. Für eine Schallgeschwindigkeit von rund 330 m/s ergeben sich damit Wellenlängen von Hörschall von rund 16,5 mm bis 16,5 m. Das ist gerade die Ausdehnung vieler Alltagsgegenstände, sodass wir Hörschall um die Ecke wahrnehmen können. **Sichtbares Licht** mit Wellenlängen von rund 400 bis 800 nm wird an Alltagsgegenständen kaum gebrochen, sodass wir nicht um die Ecke sehen können. Die Beugung von Lichtwellen an kleinen Hindernissen bedingt beispielsweise, dass Schatten nicht scharf begrenzt sind. Die Beugung von Licht ist daher für das Auflösungsvermögen (die kleinste Distanz zwischen zwei noch als getrennt wahrgenommenen Punkten) von optischen Instrumenten entscheidend. Nicht nur Schall- und Lichtwellen werden gebrochen. Die Beugung von Materiewellen von Protonen, Neutronen und Elektronen dient z. B. zur Kristallstrukturuntersuchung.

Den Begriff der Interferenz haben wir bereits beim huygensschen Prinzip kennengelernt. Im Alltag ist die ungestörte Überlagerung von Wasser-, Schall- und Lichtwellen präsent. In der angewandten Physik sind Interferometer als präzise Messinstrumente nicht mehr wegzudenken.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Beugungsphänomene** im Alltag angeben;
- die **Bedingungen für maximale Verstärkung** und **Auslöschung** bei gleicher Amplitude angeben;
- die Begriffe **Gangunterschied** und **Interferenz** erklären;
- die **Beugung** mit dem Prinzip von Huygens erklären.

Beugung

Beugung beschreibt das Eindringen einer Welle in den geometrischen Schattenraum. Nach dem Prinzip von Huygens breitet sich von jedem Punkt der auf die Öffnung treffenden Welle eine neue im Allgemeinen kugelförmige **Elementarwelle** aus. Durch **Interferenz** aller Elementarwellen ergibt sich die tatsächlich beobachtete Welle. Die Einhüllende aller Elementarwellenfronten ergibt die **Wellenfront der gebeugten Welle**.

Beispiel 2.2.06: Beugung von Schall- und Lichtwellen

Wenn wir die Schallgeschwindigkeit in Luft bei einer bestimmten Temperatur mit rund 330 m/s annehmen, dann hat eine Schallwelle mit einer Frequenz von 100 Hz (tiefe Bassstimme) eine Wellenlänge von

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{330 \cdot \text{m/s}}{100 \cdot 1/\text{s}} = 3,3 \text{ m.}$$

Eine Schallwelle mit einer Frequenz von 330 Hz (übliche Stimmlage beim Sprechen) eine Wellenlänge von

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{330 \cdot \text{m/s}}{330 \cdot 1/\text{s}} = 1 \text{ m.}$$

Einer sehr schrillen Kinderstimme mit einer Frequenz von 660 Hz entspricht gar eine Wellenlänge von

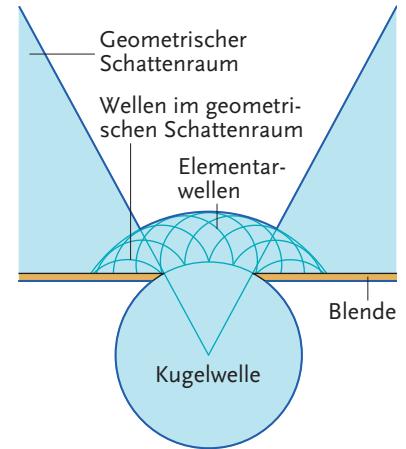
$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{330 \cdot \text{m/s}}{660 \cdot 1/\text{s}} = 0,5 \text{ m.}$$

Alle diese Größenordnungen (3,3 m; 1 m und 0,5 m) treten im Alltag als Hindernisse (Kfz, Bäume, Türen ...) auf, sodass Schall zusätzlich zu zahlreichen Reflexionen viele Beugungen erfährt.

Für eine Lichtwelle aus dem mittleren sichtbaren Wellenlängenbereich mit rund 600 nm Wellenlänge findet man im Alltag nur sehr wenige Hindernisse von dieser Größenordnung.

Versuch 2.2.06: Beugung in einer Wellenwanne

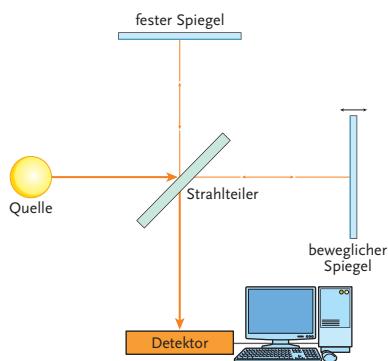
Wird der Spalt in einer Wellenwanne für die einlaufende Kreiswelle immer kleiner gemacht, so dringt die Welle immer tiefer in den Schattenraum des Spaltes ein. Für den Eindringwinkel gilt näherungsweise $\alpha \approx \text{Wellenlänge}/\text{Spaltbreite}$.



Die Überlagerung aller Elementarwellen erklärt das Eindringen der Welle in den geometrischen Schattenraum



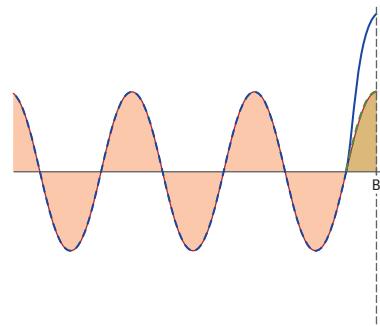
Interferenz von Schwingungen siehe Kap. D, 2.1.5.



Die Skizze zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Interferometers. Die von der Quelle ausgehenden Wellen interferieren nach der Reflexion an den beiden Spiegeln auf dem Weg zum Detektor.



Abbildung zu Versuch 2.2.07: Die beiden Erreger tauchen zeitgleich in das Wasser ein.



Skizze zu Versuch 2.2.08: Interferenz einer einfallenden Transversalwelle (rot) mit ihrer an einem losen Ende reflektierten Welle (grün). Die Reflexion an einem losen Ende bewirkt am Ort der Reflexion keinen Phasensprung.

Gang- und Phasendifferenz

Gelangt eine Welle von einem Erreger auf zwei verschiedenen langen Wegen zu einem Punkt P, so kommt es

- zu einer **Verstärkung** im Punkt P, wenn der **Gangunterschied** $s_2 - s_1$ ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist. $s_2 - s_1 = k \cdot \lambda$, k eine ganze Zahl,
 - zu einer **Auslöschung** im Punkt P, wenn der Gangunterschied $s_2 - s_1$ ein ungerades ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist:
- $$s_2 - s_1 = (2k + 1) \cdot \lambda/2, k \text{ eine ganze Zahl.}$$

Versuch 2.2.07: Interferenz in der Wellenwanne

In einer Wellenwanne werden zwei zylindrische Erreger phasengleich im Abstand d in Wasser eingetaucht. Auf der Symmetrieachse der beiden Eintauchorte kommt es stets zu konstruktiver Interferenz, weil der Gangunterschied 0 ist. Die Punkte mit einer ganzen Wellenlänge Gangunterschied liegen auf zwei Hyperbelästen.

Die Gleichung $s_2 - s_1 = \lambda = \text{konstant}$ mit den beiden Eintauchorten als Brennpunkten und den beiden Wellenwegen als Leitstrecken ergibt eine Hyperbel.

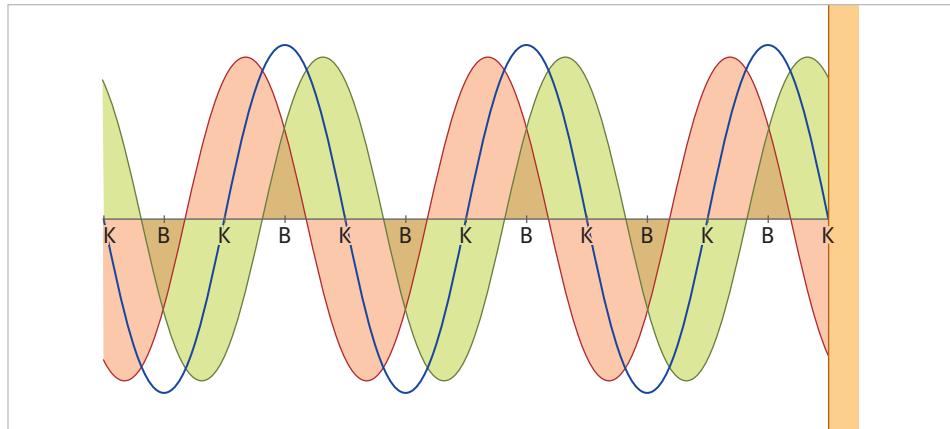
Versuch 2.2.08: Interferenz von einfallender und reflektierter Welle

Eine Transversalwelle laufe auf ein Ende zu und werde dort reflektiert.

Ist das Ende **fest**, tritt ein **Phasensprung** um π auf und die Überlagerung der einfallenden und reflektierten Welle hat am festen Ende einen Schwingungsknoten K.

Ist das Ende **lose**, tritt **kein Phasensprung** auf. Der Schwingungszustand der reflektierten Transversalwelle ist also gleich wie der Schwingungszustand der einlaufenden Transversalwelle. Der Betrag der gesamten Elongation der einfallenden und reflektierten Welle ist an dieser Stelle immer maximal. So eine Position heißt **Schwingungsbauch** B.

Das nachstehende Bild zeigt eine auf ein festes Ende (vertikaler Balken rechts) zulaufende Transversalwelle (rot), ihre mit einem Phasensprung um 180° reflektierte Welle (grün) und deren Überlagerung (blau). Diese überlagerte Welle ist eine **stehende Welle**, weil sie Positionen mit stets verschwindender Auslenkung – ihre Knoten – hat.



Beispiel 2.2.07: Grund- und Oberschwingungen einer beiderseits eingespannten Saite

Eine Gitarrensaite der Länge l führt bei transversaler Auslenkung gleichzeitig ihre Grundschwingung mit der geringsten Frequenz und je nach Bauweise mehrere Oberschwingungen mit einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz aus.

Das Bild der Grundschwingung bei stehenden Wellen erhält man immer als jene Schwingung mit der geringsten Anzahl an Knoten. Bei der eingespannten Saite hat die Grundschwingung daher zwei Knoten an den Einspannstellen.

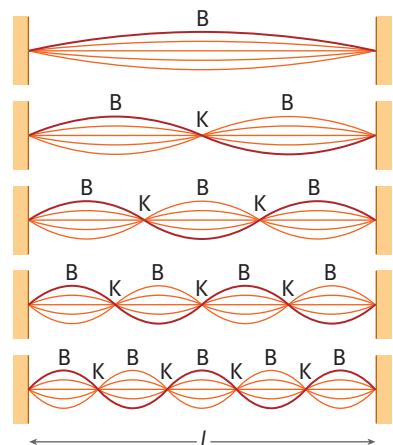
Die erste Oberschwingung der Saite hat drei Knoten, die zweite vier und so fort.

Je nach den Amplitudenverhältnissen von Grund- zu Oberschwingung ergibt sich der charakteristische Klang der Saite bzw. des Saiteninstruments.

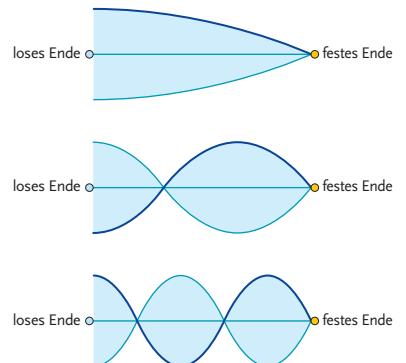
Beispiel 2.2.08: Grund- und Oberschwingungen einer einseitig offenen Luftsäule

Bei einem einseitig offenen Zylinder der Länge l erhält man als Bild der Grundschwingung der Luftsäule den vierten Teil einer Sinuswelle. Das geschlossene Ende bildet einen Knoten und das offene Ende einen Bauch.

Die erste Oberschwingung des einseitig offenen Zylinders hat zwei Knoten und zwei Bäuche. Die Wellenlänge der ersten Oberschwingung beträgt also vier Drittel der Länge l .



Die Grundschwingung und die ersten vier Oberschwingungen einer beiderseits eingespannten Saite der Länge l sind dargestellt



Die Grundschwingung und die ersten beiden Oberschwingungen einer einseitig offenen Luftsäule, also bei einem festen und einem losen Ende



Orgelpfeifen können „gedeckt“ oder „ungedeckt“ sein. Siehe Kap. D, 2.4.



Die Sonnenstrahlen breiten sich in alle Richtungen von der Sonne aus. Denkt man sich die Lichtquelle punktförmig bzw. kugelsymmetrisch, ergeben sich Kugeloberflächen als Wellenfronten.

2.3 Geometrische und Wellenoptik

„Ein Bild sagt mehr als tausend Worte“, sagt der Volksmund und unser Alltag ist voller Bilder. In der **geometrischen Optik** gelingt die Beschreibung vieler optischer Phänomene mit einfachen abbildenden Elementen. Die Wirkungsweise von Spiegeln und Linsen erklären wir mit dem Reflexions- und Brechungsgesetz und der Absorption.

Treten Interferenzphänomene bzw. Hindernisse in der Größenordnung der Wellenlänge auf, müssen wir zur Erklärung die **Wellenoptik** heranziehen.

2.3.1 Lichtausbreitung und Schattenbildung, Spektrum

Wenn man „Licht und Schatten“ in Suchmaschinen eingibt, erhält man mehr als vier Millionen Einträge. In Zeitungskommentaren findet man Licht und Schatten ebenso wie in Gedichten und sogar CDs tragen diesen Titel.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **Lichtstrahl** sowie **Schatten** erklären und angeben, unter welchen Bedingungen die **Strahlenoptik** bzw. **geometrische Optik** angewendet wird;
- die Begriffe **Reflexions-, Absorptions-** sowie **Transmissionsgrad** definieren und die Begriffe **Halb-** und **Kernschatten** sowie **Spektrum** erklären;
- die Größenordnung der **Lichtgeschwindigkeit** angeben und mit ihr operieren.

Licht – Lichtstrahlen – Schatten – geometrische Optik

Reflectere: lateinisch für zurückbiegen.

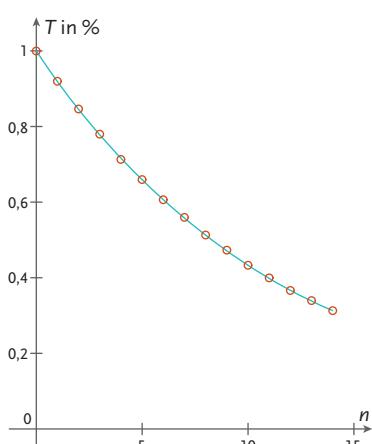
Absorbere: lateinisch für verschlucken.

Transmittere: lateinisch für durchlassen.

Iisos: griechisch für gleich.

Tropos: griechisch für Drehung, Richtung.

Isotropie ist die Unabhängigkeit einer Eigenschaft von der Richtung.



Der Graph zeigt den diskreten Energiedurchlass in Abhängigkeit der Anzahl n der hintereinanderliegenden **Fensterglasscheiben** von ca. 3 mm Stärke sowie die kontinuierliche Interpolationsfunktion

- Licht ist eine **elektromagnetische Welle**, die für das menschliche Auge erkennbar ist und **Wellenlängen zwischen ca. 400 nm und 800 nm** hat.
- In der Regel breitet sich Licht vom Ort seiner Entstehung als **Kugelwelle geradlinig** nach allen Seiten aus.
- Einzelne **Sektoren** der Kugelwelle heißen **Strahlenbündel**. Die **Strahlenbündel** beginnen im Kugelmittelpunkt und haben einen endlichen Öffnungswinkel.
- **Lichtstrahlen** sind Strahlenbündel mit verschwindendem Öffnungswinkel, also unendlich enge Strahlenbündel.
- Treffen Lichtstrahlen auf ein undurchsichtiges Objekt, ist die Projektion des Objektes sein **Schatten**.
- Die **geometrische Optik** oder **Strahlenoptik** beschreibt den Verlauf von Lichtstrahlen hinreichend genau, wenn die innerhalb des Strahlenbündels dargestellten Objekte groß im Vergleich zur Wellenlänge sind, d. h. sehr viel größer als $1 \mu\text{m}$.

Licht breitet sich in einem homogenen isotropen Medium geradlinig aus. Ein Medium ist homogen und **isotrop**, wenn die betrachteten physikalischen Parameter gleich und richtungsunabhängig sind. Trifft Licht auf eine Grenzfläche zwischen zwei Medien, z. B. von homogener Luft auf eine völlig ebene Glasplatte der Dicke d , dann wird

- ein Teil **reflektiert (zurückgeworfen)**,
- ein Teil in der Platte **absorbiert (aufgenommen)** und
- ein Teil geht **durch** die Platte **hindurch** – er wird **transmittiert**.

Beispiel 2.3.01: Fensterglas

Bei einem herkömmlichen Fensterglas mit 3 mm Dicke werden rund 6 % der einfallenden Lichtenergie reflektiert, 2 % erwärmen das Glas und 92 % gehen durch die Scheibe hindurch.

Bei einem Doppelglasfenster treten daher $0,92^2 = 0,846 = 84,6\%$ der einfallenden Lichtintensität (Lichtenergie pro Zeit und Fläche) durch.

Bei einer Dreifachverglasung werden in Summe 22,1 % reflektiert bzw. absorbiert und $77,9\% = 0,92^3$ werden transmittiert.

Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad

$$\text{Reflexionsgrad } \rho = \frac{\text{reflektierte Strahlungsleistung}}{\text{auftreffende Strahlungsleistung}}$$

$$\text{Absorptionsgrad } \alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlungsleistung}}{\text{auftreffende Strahlungsleistung}}$$

$$\text{Transmissionsgrad } \tau = \frac{\text{transmittierte Strahlungsleistung}}{\text{auftreffende Strahlungsleistung}}$$

Aufgrund der Energieerhaltung gilt: $\rho + \alpha + \tau = 1$.

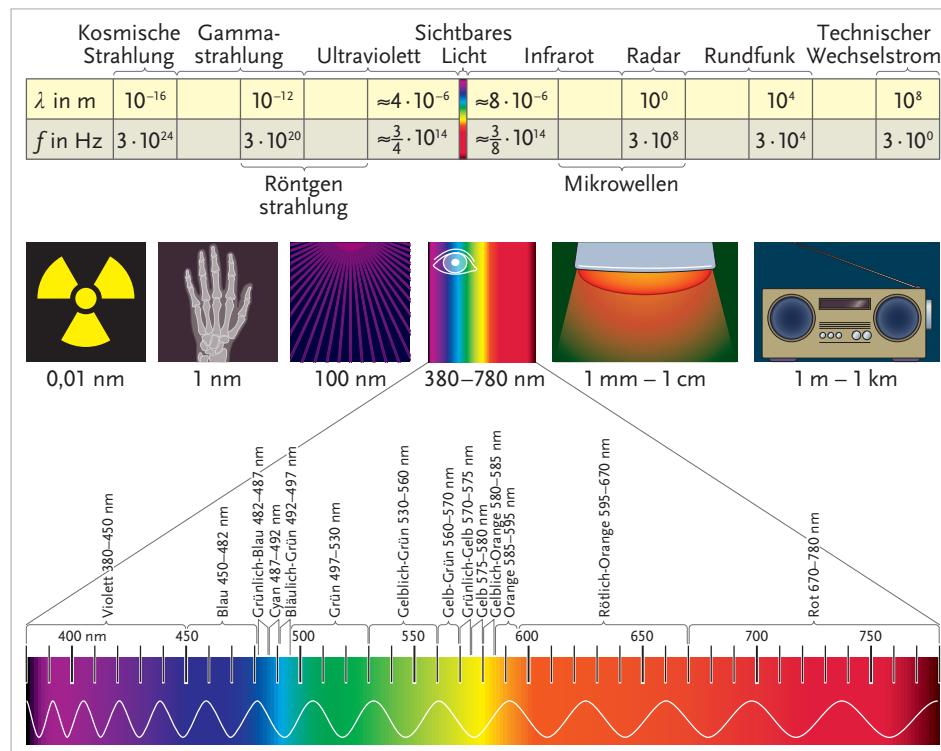
Anstelle der Bezeichnung Reflexionsgrad wird auch der Begriff Reflexionskoeffizient verwendet. Analog für Absorptions- und Transmissionsgrad auch Absorptionskoeffizient sowie Transmissionskoeffizient.

Beispiel 2.3.02: Mattglas

Bei einem Mattglas mit 3 mm Dicke, wie es gerne bei Türen verwendet wird, werden rund 15 % der einfallenden Lichtenergie reflektiert und 15 % im Glas absorbiert, sodass 70 % durch die Scheibe hindurchgehen: $\rho = \alpha = 0,15$ und $\tau = 0,7$.

Bei zwei Mattglasscheiben hintereinander treten daher rund $0,70^2 = 0,49 = 49\%$ der einfallenden Lichtintensität durch: $\tau_2 = \tau^2 = 0,49$.

Licht ist eine **elektromagnetische Welle**. Die nachfolgende Tabelle zeigt den winzigen Ausschnitt, den das sichtbare Licht im elektromagnetischen Spektrum einnimmt. Die gesamte Tabelle umfasst 24 Zehnerpotenzen.

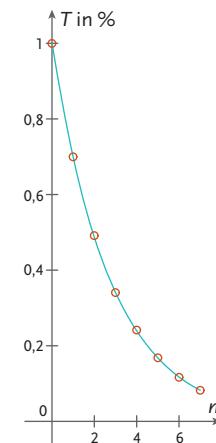


Den einzelnen Frequenzen und wegen $c = \lambda \cdot f$ auch den einzelnen Wellenlängen entsprechen unterschiedliche Farben innerhalb des sichtbaren Lichtes von Rot, Gelb, Grün, Blau bis Violett. Man unterscheidet die Regenbogenfarben Rot, Orange, Gelb, Grün, Blau, Indigo und Violett.

Spektrum

Das **Spektrum** ist die Intensitätsverteilung einer elektromagnetischen Strahlung in Abhängigkeit von der **Wellenlänge**.

Die verschiedenen Arten von Spektren werden uns bei Prismen und Gittern wieder begegnen.



Der Graph zeigt den diskreten Energiedurchlass für n hintereinanderliegende **Mattglasscheiben** von ca. 3 mm Stärke sowie die kontinuierliche Interpolationsfunktion.



Sicherlich haben Sie schon von der Problematik des Schmelzens der Polkappen gehört. Schnee hat einen durchschnittlichen Reflexionsgrad von 93 %, wirft also 93 % der einfallenden Sonnenstrahlung teilweise in den Weltraum zurück. Erde und Fels absorbieren hingegen die auftreffende Sonnenstrahlung sehr stark.

Zu den Abkürzungen:

- **UV** = ultraviolet: oberhalb von Violett
 - **VIS** = visible, engl. sichtbar
 - **IR** = infrarot: unterhalb von Rot.
- Die Ordnung erfolgt also nach der Frequenz.

Spectrum: lateinisch für Bild, Erscheinung.

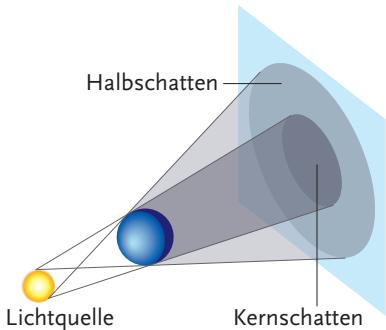


Brezung an Prismen und Beugung an Gittern.

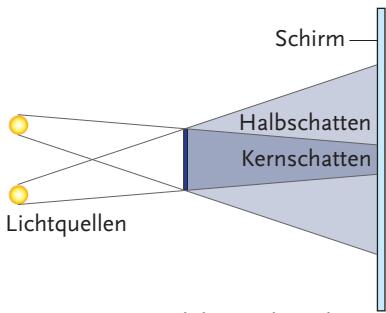


Für Überschlagsrechnungen verwenden wir für die **Brechzahl von Luft** 1,000 3 den Näherungswert 1.

Eine ausgedehnte Lichtquelle:



Zwei ausgedehnte Lichtquellen:



Bei einer ausgedehnten bzw. bei zwei oder mehreren ausgedehnten Lichtquellen ergeben sich ein **Kernschatten** und mehrere **Halbschattenbereiche**

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht, kurz **Lichtgeschwindigkeit**, ist **unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle bzw. des Beobachters** und stets **konstant**.

Der Wert der Naturkonstante **Vakuumlichtgeschwindigkeit** wurde 1983 festgelegt.

Vakuumlichtgeschwindigkeit

Licht breitet sich im Vakuum definitionsgemäß mit der **Vakuumlichtgeschwindigkeit** $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s} \approx 1\,079\,252\,848,8 \text{ km/h}$ aus.

In Luft ist Licht nur unwesentlich langsamer: $c_{\text{Luft}} \approx 299\,703\,000 \text{ m/s}$. Damit ergibt sich für die Brechzahl von Luft:

$$n_{\text{Luft}} = \frac{c_0}{c_{\text{Luft}}} \approx \frac{299\,792\,458}{299\,703\,000} \approx 1,000\,3.$$

Kern- und Halbschatten

Der dunkelste Bereich eines schattigen Gebietes ist der **Kernschatten**.

Der **Halbschatten** ist für eine reale Lichtquelle jener Bereich, in dem Teile der Lichtquelle sichtbar sind.



Ziele erreicht? – „Lichtausbreitung und Schattenbildung, ...“

2.3.01 Geben Sie an, welche Wellenlänge **sichtbares Licht** hat und welche Bereiche an welchem Ende angrenzen.

2.3.02 Berechnen Sie die **Brechzahl** von Quarz, wenn die Lichtgeschwindigkeit in Quarz rund 193 084 km/s beträgt.

2.3.03 Nach wie vielen etwas verschmutzten **Fensterscheiben** mit einem Transmissionskoeffizienten τ von rund 80 % ist die anfängliche Intensität auf etwa a) 51 %, b) 41 % bzw. c) 26 % gesunken? Stellen Sie die transmittierte Intensität als Funktion der Scheibenanzahl grafisch dar.

2.3.2 Reflexion

Licht wird beim Auftreffen auf ein Hindernis teilweise reflektiert. Im Alltag können Reflexionen auch erwünscht sein. Bereits Archimedes soll die Reflexion von Sonnenlicht zielgerichtet angewendet haben.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **Einfallswinkel**, **Reflexionswinkel** und **Lot** erklären;
- **diffuse** und **reguläre Reflexion** unterscheiden;
- das **Reflexionsgesetz** nennen und anwenden.

Ist eine Grenzfläche sehr glatt poliert oder verspiegelt, wird ein einfallendes Lichtbündel in eine bestimmte Richtung reflektiert und behält seine Bündelung. Es liegt **reguläre Reflexion** bzw. **Spiegelung** vor, für die das Reflexionsgesetz gilt.

Reflexionsgesetz

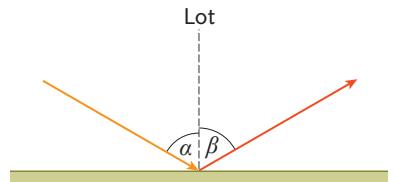
Trifft Licht unter dem Winkel α zum Lot auf eine (sehr glatte) Grenzfläche, wird ein Teil unter dem Winkel $\beta = \alpha$ zum Lot reflektiert.

Kurz: **Einfallswinkel α = Reflexionswinkel β** .

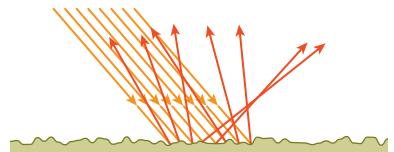
Im Raum gilt die Zusatzbedingung, dass der einfallende, der reflektierte Strahl und das Lot in einer Ebene liegen.

Beim Sonderfall des senkrechten Lichteinfalls sind die beiden Winkel, gemessen zum Lot, null Grad: $\alpha = \beta = 0^\circ$ (Retroreflexion).

Ist die Grenzfläche rau, wird das auftreffende Licht in alle Richtungen zerstreut, sodass die Fläche allseits sichtbar ist. Es liegt diffuse Reflexion vor.



Die Abbildung zeigt das Reflexionsgesetz: Einfallswinkel = Reflexionswinkel β (reguläre Reflexion)



Bei der **diffusen Reflexion** wird das auftreffende gebündelte Licht in alle Richtungen zerstreut. Die Bündelung geht verloren.



Ziele erreicht? – „Reflexion“

2.3.04 Skizzieren Sie einen speziellen Fall einer **regulären Reflexion** und eine **diffuse Reflexion**. Beschriften Sie bei der regulären Reflexion das Lot, den Einfalls- und den Reflexionswinkel. Skizzieren Sie bei der diffusen Reflexion mehrere Lote.

2.3.05 Skizzieren Sie den Spezialfall einer **Retroreflexion**.

2.3.3 Brechung

Trifft Licht auf eine Grenzfläche zweier homogener (überall gleichartiger) Medien, wird es nicht nur gemäß dem Reflexionsgesetz reflektiert, sondern dringt auch in das andere Medium ein. Dabei ändert es seine Richtung: Der Lichtstrahl wird **gebrochen**. Der Vorgang heißt **Lichtbrechung** oder **Refraktion**.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

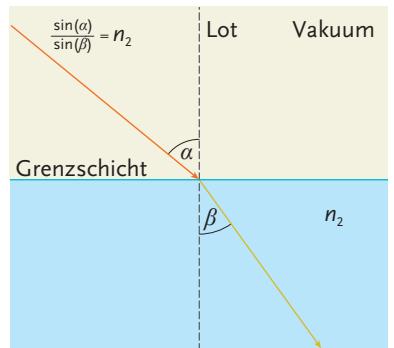
- Brechungserscheinungen im Alltag qualitativ beschreiben und die Begriffe **Einfallswinkel**, **Brechungswinkel** und **Lot** erklären;
- mit dem **Brechungsgesetz** von Snellius operieren;
- das **Brechungsgesetz** von Snellius herleiten.

Brechungsgesetz von Snellius

Trifft eine Welle unter dem Winkel α zum Lot auf eine Grenzfläche zwischen einem Medium 1 mit Ausbreitungsgeschwindigkeit c_1 und einem Medium 2 mit Ausbreitungsgeschwindigkeit c_2 , ergibt sich der Brechungswinkel β gemäß

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c_1}{c_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Das Brechungsgesetz von Snellius kann mit dem fermatschen Prinzip (Licht wählt den Weg mit der kürzesten Gesamtzeit) hergeleitet werden.

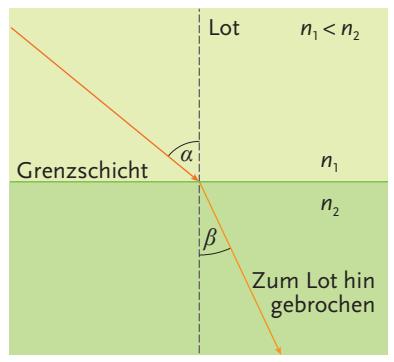


Der Lichtstrahl wird zum Lot gebrochen. Im Vakuum ist der Brechungsindex $n = 1$.

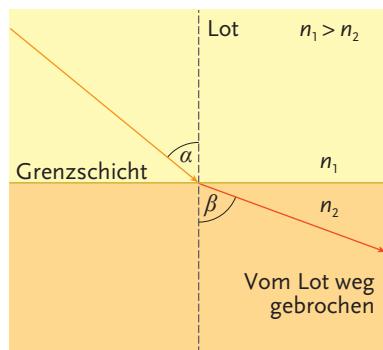
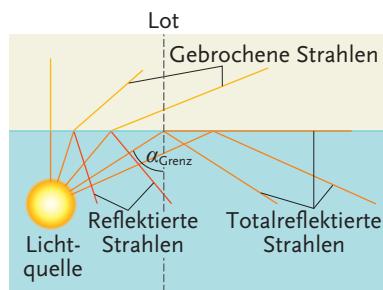


Herleitung des Brechungsgesetzes siehe Kap. 2.2.2.

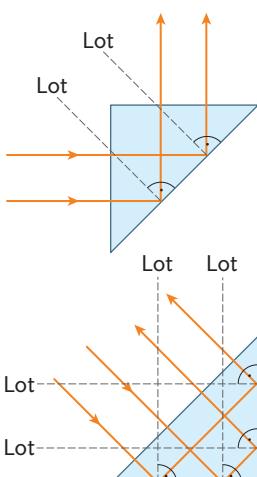
Beim Übergang von einem homogenen Medium in ein anderes homogenes Medium mit verschiedenen Brechungsindizes treten **zwei Fälle** auf:



Lichtbrechung **zum Lot**

Lichtbrechung **vom** Lot

Aus Übersichtlichkeitsgründen ist das Lot nur für den Grenzwinkel α_{Grenz} eingezeichnet. Für Einfallswinkel kleiner als α_{Grenz} wird ein Teil gebrochen (gelb) und ein Teil reflektiert (rot). Die Grenzschicht selbst kann beliebig dünn gedacht werden, sodass der Energieerhaltungssatz in der Form $\rho + \tau = 1$ gilt, weil der Absorptionsgrad $\alpha = 0$ ist.



Totalreflektierende Prismen
Die Skizzen zeigen den Strahlenverlauf für zwei totalreflektierende Umlenkprismen

Beispiel 2.3.03: Lichtbrechung zum Lot

Wenn Licht von einem optisch dünneren Medium 1 mit Brechzahl n_1 in ein optisch dichteres Medium 2 mit Brechzahl $n_2 > n_1$ eintritt, wird es zum Lot hin gebrochen. Der Brechungswinkel ist kleiner als der Einfallswinkel, also $\beta < \alpha$.

Brechung zum Lot tritt beispielsweise auf, wenn Licht von Luft in Wasser oder Glas übergeht.

Beispiel 2.3.04: Lichtbrechung vom Lot

Wenn Licht von einem optisch dichten Medium 1 mit Brechzahl n_1 in ein optisch dünneres Medium 2 mit Brechzahl $n_2 < n_1$ eintritt, wird es vom Lot weg gebrochen. Der Brechungswinkel ist größer als der Einfallswinkel, also $\beta > \alpha$.

Brechung vom Lot tritt beispielsweise auf, wenn Licht von Wasser oder Glas in Luft übergeht.

Bei der Brechung vom Lot ergibt sich ein Grenzfall für einen Brechungswinkel β von 90° . Der gebrochene Lichtstrahl tritt nicht mehr in das optisch dünnerne Medium über, sondern verbleibt im dichtenen Medium.

Totalreflexion

Beim Übergang von einem optisch dichtenen Medium 1 in ein optisch dünneres Medium 2 ($n_1 > n_2$)

- nennt man den **Einfallswinkel** α_{Grenz} , für den der Brechungswinkel $\beta = 90^\circ$ ist, **Grenzwinkel der Totalreflexion**.

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin(n_2/n_1) = \arcsin(c_1/c_2) = \arcsin(\lambda_1/\lambda_2)$$
- Für größere Einfallswinkel als den Grenzwinkel α_{Grenz} tritt **Totalreflexion** auf. Der Lichtstrahl verbleibt im Medium 1; es findet keine Brechung mehr statt.

Beispiel 2.3.05: Totalreflexion beim Übergang von Glas in Luft

Wenn Licht von einem Glas mit einer Brechzahl von rund 1,5 in Luft mit einer Brechzahl von 1,0003 übertritt, findet bis zu einem Grenzwinkel von

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin\left(\frac{1,0003}{1,5}\right) \approx 41,83^\circ$$

eine Brechung vom Lot statt.

Dieser Grenzwinkel ist kleiner als 45° , sodass rechtwinkelige gleichschenkelige, gerade Glasprismen als Strahlumlenkprismen verwendet werden können. Dieser Winkel ist auch relativ klein im Vergleich zu 90° bei einem senkrechten Einfall auf die Stirnfläche einer Glasfaser. Daher lassen sich Glasfaserkabeln aus der modernen Informationstechnologie nicht mehr wegdenken.

Wir behandeln diese beiden wichtigen Anwendungen der Totalreflexion noch etwas genauer.

Anwendung der Totalreflexion bei Strahlumlenkprismen

Wenn Licht senkrecht auf die Kathetenfläche eines rechtwinkeligen gleichschenkeligen, geraden Glasprismas fällt, passiert es diese wegen $\alpha = 0^\circ$ ungebrochen. Der Einfallswinkel auf die Grenzfläche im Inneren des Prismas ist dann 45° und damit kleiner als der im Beispiel 2.3.05 berechnete Grenzwinkel für die Totalreflexion. Der Lichtstrahl kann daher die Hypotenuse nicht passieren, sondern er wird an ihr total reflektiert. Er verlässt das Glasprisma durch die andere Kathetenfläche wieder senkrecht.

Anwendung der Totalreflexion bei Lichtleitern

Lichtleiter sind lange Glasfasern mit einem Kern mit hohem Brechungsindex, einer konzentrischen Ummantelung mit niedrigem Brechungsindex und einer Hülle zum mechanischen Schutz der Faser. Durch Bündelung werden rund 400 Einzelfasern pro mm^2 zusammengefasst. Treffen Lichtstrahlen beinahe senkrecht auf die Stirnfläche einer Glasfaser, so treffen sie im Inneren der Faser unter einem großen Einfallswinkel auf die Grenzfläche Glas–Luft und werden dort total reflektiert. Vielfache Totalreflexion (rund 20 000 Totalreflexionen pro Laufmeter Glasfaserkabel) leitet das Licht in der Faser fort. Ist die Lichtwellenlänge vernachlässigbar klein gegen den Faserdurchmesser, tritt am Ende der Faser ein homogenes Lichtbündel aus.

Lichtleiter sind mechanisch beanspruchbar und erlauben Beobachtungen sonst unzugänglicher Bereiche. Die Endoskopie in der Medizin muss ebenso angeführt werden wie handelsübliche Endoskope für den Haushalt und verschiedene Handwerksbetriebe.

Beispiel 2.3.06: Totalreflexion beim Übergang von Glas in Wasser

Wenn Licht von einem Glas mit einer Brechzahl von rund 1,5 in Wasser mit einer Brechzahl von 1,333 übertritt, findet bis zu einem Grenzwinkel von

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin(1,333/1,5) \approx 62,71^\circ$$

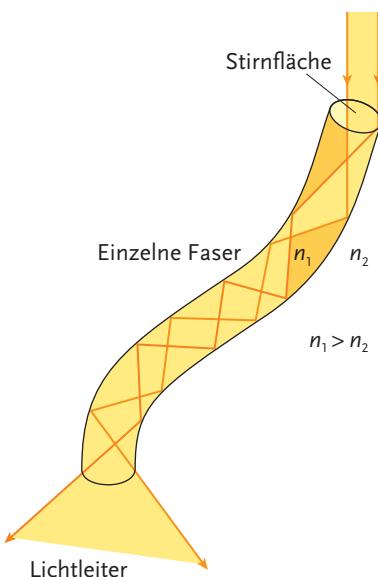
eine Brechung vom Lot statt.

Wir stellen fest, dass dieser Grenzwinkel um $20,88^\circ$ oder rund 49,9 % größer als der Grenzwinkel beim Übergang von Glas in Luft (aus Beispiel 2.3.05) ist.

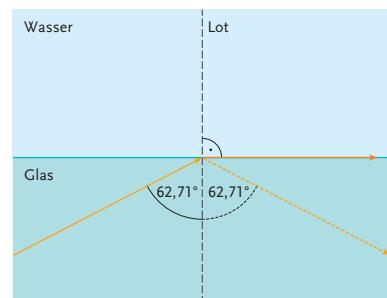


Ziele erreicht? – „Brechung“

- 2.3.06** Geben Sie das **snelliussche Brechungsgesetz** an und argumentieren Sie, unter welchen Bedingungen **Brechung zum bzw. vom Lot** stattfindet.
- 2.3.07** Unter welchem Winkel ist Licht auf eine Grenzfläche zwischen Luft und Wasser eingefallen, wenn es sich im Wasser unter 30° zum Lot weiterbewegt und $n_{\text{Wasser}} \approx 1,333$? Fertigen Sie eine Skizze mit dem berechneten Einfallwinkel und dem gegebenen **Brechungswinkel** an.
- 2.3.08** Licht trifft, aus Luft kommend, unter 60° zum Lot auf eine Flüssigkeit, in der es sich mit rund 240 000 km/s fortbewegt. Unter welchem Winkel dringt es in die Flüssigkeit ein? Fertigen Sie eine Skizze mit dem gegebenen Einfallwinkel und dem berechneten **Brechungswinkel** an.
- 2.3.09** Licht breite sich in einem Kristall mit rund 180 000 km/s aus. Ab welchem Winkel tritt **Totalreflexion** auf? Fertigen Sie eine Skizze mit dem berechneten Grenzwinkel und einem selbst gewählten Winkel $\alpha > \alpha_{\text{Grenz}}$ an sowie mit einem weiteren Winkel $\alpha < \alpha_{\text{Grenz}}$, für den Sie auch den Brechungswinkel berechnen und eintragen.
- 2.3.10** Wie groß ist die **Parallelverschiebung** eines unter dem Winkel α zum Lot auf eine planparallele Platte einfallenden Lichtstrahls? Die Platte hat die Dicke d und die Brechzahl $n > 1,1$. Die Platte befindet sich in Luft. Interpretieren Sie Ihre abgeleitete Formel.



Die Skizze zeigt den Verlauf zweier Strahlen in einem Lichtleiter



Totalreflexion beim Übergang von Glas in Wasser

| Medium | Brechzahl |
|-------------------|-----------|
| Wasser | 1,333 |
| Äther | 1,353 |
| Leichtes Kronglas | 1,515 |
| Schweres Kronglas | 1,752 |

Einige Brechzahlen für Licht mit einer Wellenlänge von rund 590 nm



Die **Fraunhoferlinie D** für das Element Natrium hat eine Wellenlänge von 589,3 nm. Natriumdampflampen zeichnen sich durch warmes gelbes Licht aus.



Die **Fraunhoferlinie A** hat eine Wellenlänge von 759,3 nm und die **Fraunhoferlinie H** eine von 396,8 nm.

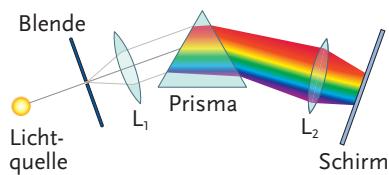


Bei einem Regenbogen kommt es zur Aufspaltung des weißen Sonnenlichts in seine **Spektralfarben**

Dispersus: lateinisch für zerstreut.



Haupt- und Nebenregenbogen



Dispersionsspektrum eines Prismas: Man erkennt sehr gut, dass rotes Licht am wenigsten und violettes am stärksten gebrochen wird. Damit gilt für die frequenzabhängigen Brechzahlen $n_{\text{rot}} < n_{\text{violett}}$.

Für Wasser werden folgende Werte verwendet:

$n_{\text{rot}} = 1,329$ und $n_{\text{violett}} = 1,343$.

Genauer ist mit Rot hier die Fraunhofer-Linie A (759,3 nm) und mit Violett die Fraunhoferlinie H (396,8 nm) gemeint.

| Wellenlänge/nm | Brechungsindex |
|----------------|----------------|
| 759,3 | 1,329 |
| 686,7 | 1,330 |
| 656,3 | 1,331 |
| 589,3 | 1,333 |
| 527,0 | 1,335 |
| 486,1 | 1,337 |
| 430,8 | 1,341 |
| 396,8 | 1,343 |

Ausschnitt aus der Dispersions-tabelle für Wasser

2.3.4 Dispersion

Im Vakuum ist die Lichtgeschwindigkeit für alle Frequenzen gleich. In durchsichtigen Körpern ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes hingegen frequenzabhängig. Damit ist die Entstehung von **Regenbögen** teilweise erkläbar.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Dispersionserscheinungen** im Alltag erklären;
- die **Dispersion** kommunizieren und für ein Prisma skizzieren;
- das **Dispersionsspektrum** einer Grenzfläche berechnen.

Dispersion

Die Abhängigkeit der Brechzahl n von der Frequenz heißt **Dispersion**: $n = n(f)$. Rotes Licht ist in durchsichtiger Materie schneller als violettes, weshalb bei normaler Dispersion $n_{\text{rot}} < n_{\text{violett}}$ ist.

In Glas liegt normale Dispersion vor, d. h., langwelliges Licht hat kleinere Brechungswinkel.

Beispiel 2.3.07: Rot und Violett

Wenn rotes Licht mit rund 760 nm und violettes Licht mit rund 397 nm von Luft (Brechzahl von 1,000 3) auf Wasser auftreffen, wird das violette stärker gebrochen.

Für einen Einfallswinkel von 60° zum Lot ergibt sich mit

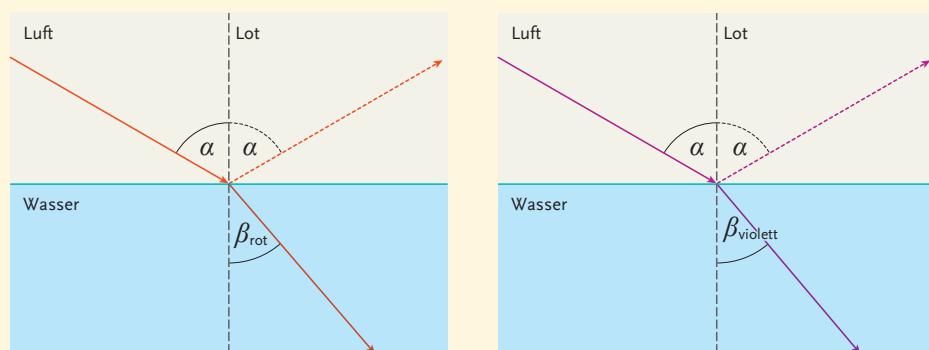
$$n_{\text{rot}} = 1,329 \text{ und } n_{\text{violett}} = 1,343, \text{ wegen } \frac{\sin \beta}{\sin 60^\circ} = \frac{1,000 \cdot 3}{n_2}$$

für den Brechungswinkel des roten Lichtes:

$$\beta_{\text{rot}} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1,000 \cdot 3}{1,329} \right) \approx 40,68^\circ$$

für den Brechungswinkel des violetten Lichtes:

$$\beta_{\text{violett}} = \arcsin \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{1,000 \cdot 3}{1,343} \right) \approx 40,17^\circ$$



Mit freiem Auge sind die unterschiedlichen Brechungswinkel (links Rot und rechts Violett) nicht zu erkennen.



Ziele erreicht? – „Dispersion“

- 2.3.11** Sortieren Sie die folgenden **Spektralfarben (Regenbogenfarben)** nach aufsteigender Brechzahl: Indigo, Gelb, Grün, Orange, Rot, Blau und Violett.
- 2.3.12** Berechnen Sie die maximale absolute und maximale relative Abweichung des **Brechungsindex** für sichtbares Licht mithilfe der Dispersionstabelle.
- 2.3.13** Licht mit einer Wellenlänge von rund 590 nm trete von Wasser unter 30° zum Lot in Luft über. Berechnen Sie den **Brechungswinkel** für rotes und violettes Licht und fertigen Sie eine Skizze an.
- 2.3.14** Unter welchem Winkel ist **rotes Licht** auf eine Grenzfläche zwischen Luft und Wasser eingefallen, wenn es sich im Wasser unter 30° zum Lot weiterbewegt und $n_{\text{Wasser, rot}} \approx 1,329$? Fertigen Sie eine Skizze mit dem berechneten Einfallwinkel und den gegebenen Brechungswinkeln.



Die **Dispersion** spielt auch bei der Unterscheidung von digitaler und analoger Signalübertragung eine wichtige Rolle.



Die **Regenbogenfarben** treten in der Natur auch bei Perlmutter (schillerndes Biomineral, das Weichtiere auf der Innenseite ihrer Schale bilden) auf. Perlmutt ist hart und elastisch zugleich, sodass es die Ausbreitung von Rissen in der Schale verhindert.

2.3.5 Spiegel

„Spieglein, Spieglein an der Wand ... ?“ Wissen Sie noch, wie die Frage weitergeht und wer sie stellte? Wir wachsen mit so vielen Spiegeln um uns herum auf, dass uns die Seitenvertauschung als Erwachsene meist kaum mehr erstaunt. Mithilfe der **geometrischen Optik** ist die Sache schnell erklärt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Spiegelung** im Alltag qualitativ beschreiben;
- **ebene Spiegel, Kugel- und Parabolospiegel** unterscheiden;
- **reelle und virtuelle Bilder** von Spiegeln auseinanderhalten und mit Strahlengängen konstruieren.

Ebener Spiegel

Der verspiegelte Teil einer Ebene wird **ebener Spiegel** genannt.

Er begegnet uns täglich in Badezimmern, Garderoben und anderen Räumlichkeiten sowie in optischen Geräten.

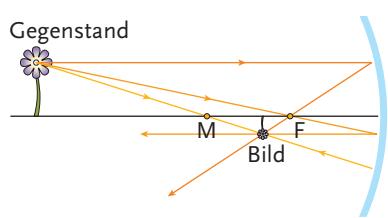
Sphärischer Hohl- und Wölbspiegel

- Der verspiegelte Teil einer Kugel (Sphäre) wird **sphärischer Hohl- oder Wölbspiegel** genannt, je nachdem welche Seite beleuchtet wird.
- Ein **sphärischer Hohlspiegel** lenkt parallel einfallende Lichtstrahlen zu einem gemeinsamen **Brennpunkt** (Fokus F) ab.
- Ein **sphärischer Wölbspiegel** zerstreut parallel einfallende Lichtstrahlen so, dass ihre gedachten Verlängerungen durch einen gemeinsamen Brennpunkt (Fokus F) hinter dem Wölbspiegel verlaufen.

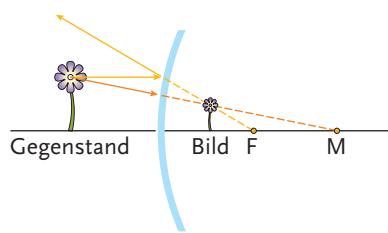
Sphärische Hohlspiegel werden beispielsweise im Straßenverkehr sowohl in Fahrzeugen als auch an unübersichtlichen Stellen, in vielen optischen Geräten sowie bei Solarkraftwerken eingesetzt.



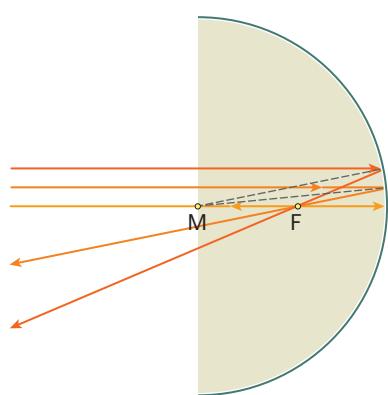
Seitenvertauschung beim ebenen Spiegel



Der eingezeichnete Parallel- und der Brennpunktstrahl legen nach der Reflexion am Hohlspiegel die Bildspitze fest. Hohlspiegel liefern reelle Bilder.



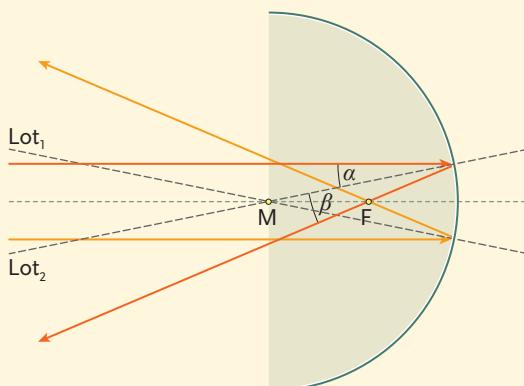
Erst die Verlängerungen des eingezeichneten Parallel- und Mittelpunktstrahls legen nach der Reflexion am Wölbspiegel die Bildspitze des **virtuellen Bildes** fest



Nur bei kleinen Einfallswinkeln, gemessen zum Lot, gilt die Sammlung der Parallelstrahlen im Brennpunkt bei $r/2$. Das Lot verläuft stets durch den Kugelmittelpunkt

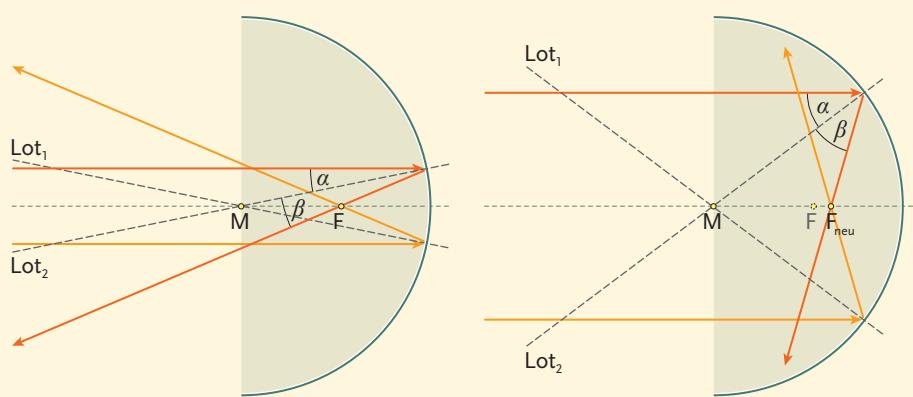
Beispiel 2.3.08: Sphärischer Hohlspiegel

Wir zeichnen einen Achsenschnitt durch eine verspiegelte Halbkugel mit 5 cm Radius und zeichnen zuerst zwei parallele Lichtstrahlen im Abstand von 2 cm ein. Das Lot verläuft stets durch den Mittelpunkt M.



Mit dem Reflexionsgesetz erhalten wir einen Brennpunkt F bei etwa 2,5 cm Abstand vom Mittelpunkt.

Tragen wir nun zwei Parallelstrahlen mit 6 cm Abstand ein (rechtes Bild), erhalten wir einen anderen Brennpunkt.



Es tritt ein Abbildungsfehler auf, der uns auch bei Linsen wieder begegnen wird und **sphärische Aberration** genannt wird.



Ziele erreicht? – „Spiegel“

- 2.3.15** Skizzieren Sie analog zum Beispiel 2.3.08 einen **sphärischen Wölbspiegel** mit 5 cm Radius und konstruieren Sie den Verlauf der vier Parallelstrahlen mit dem Reflexionsgesetz.
- 2.3.16** Konstruieren Sie die Bilder eines Gegenstandes mit einer Gegenstandsgröße $G = 3 \text{ cm}$, der sich einmal 2 cm links und ein andermal 2 cm rechts vom Mittelpunkt eines **sphärischen Hohlspiegels** mit 9 cm Radius befindet.
- 2.3.17** Konstruieren Sie das Bild eines Gegenstandes mit einer Gegenstandsgröße $G = 3 \text{ cm}$, der sich in einer Entfernung von 12 cm vom Mittelpunkt eines **sphärischen Wölbspiegels** mit 8 cm Radius befindet.
- 2.3.18** In welcher Entfernung vor einem **Hohlspiegel** mit 2 m Radius müssen wir einen Gegenstand positionieren, um **a)** ein reelles Bild mit Bildgröße $B = G/2$ bzw. um **b)** ein virtuelles, zweifach vergrößertes Bild zu erhalten?

2.3.6 Linsen

Kurzsichtige Spitzensportler tragen bei ihrer Sportausübung meist Linsen. In modernen Laptops ist eine Linse eingebaut, um das Skypen zu ermöglichen. Bildfähige Handys und Fotoapparate kommen ebenfalls nicht ohne Linsen aus. Also Linsen, soweit das Auge reicht.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Wirkung von Linsen im Alltag qualitativ erklären und **Sammel- und Zerstreuungslinsen** unterscheiden;
- reelle und **virtuelle Bilder** von Linsen auseinanderhalten und mit Strahlengängen konstruieren;
- die **Brechkraft** und ihre Einheit angeben;
- den **Abbildungsmassstab** definieren und berechnen sowie die **Abbildungsgleichung** für Linsen angeben und anwenden;
- **Linsenfehler** angeben.

Beim Spiegel haben wir die Reflexion von Lichtstrahlen an Grenzflächen genutzt. Bei Linsen legen wir das Augenmerk auf den gebrochenen und transmittierten Anteil des einfallenden Lichts.

Sammel- und Zerstreuungslinsen

- **Sammel- bzw. Konvexlinsen (Positivlinsen)** sind in der Mitte dicker als am Linsenrand.
- **Zerstreuungs- bzw. Konkavlinsen (Negativlinsen)** sind in der Mitte dünner als am Linsenrand.

Die Gerade durch die beiden Krümmungsmittelpunkte der beiden Linsenflächen und damit auch durch die beiden Brennpunkte einer Linse heißt **optische Achse**. Wir beschränken uns auf dünne Linsen, bei denen die Brechungen an den beiden Linsenflächen durch eine einzige Brechung in ihrer **Hauptebene** (bei symmetrischen Linsen der Mittelebene) ersetzt werden kann.

Die weitere Einschränkung bezieht sich auf **achsennahe Strahlen**.

Die wichtigste Kenngröße einer dünnen Linse ist ihre reziproke Brennweite, die **Brechkraft**.

Brechkraft und Dioptrie

Der Kehrwert der Brennweite f , also des Abstandes des Brennpunktes F von der Hauptebene einer dünnen Linse, heißt **Brechkraft: $D = 1/f$** .

Die Einheit der Brechkraft D ist daher $1/m = 1$ Dioptrie (1 dpt).

Beispiel 2.3.09: Dünne Linsen

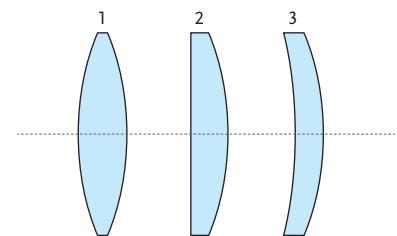
Eine dünne symmetrische Sammellinse hat eine Brechkraft von zwei Dioptrien. Ihre Brennweite ist daher $\frac{1}{2} m$, d. h., achsennahe Parallelstrahlen schneiden sich 50 cm hinter der Hauptebene der Sammellinse.



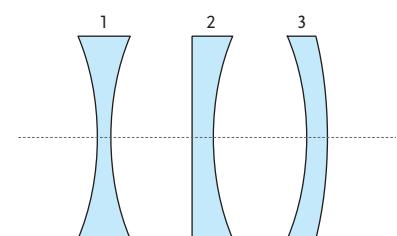
Fresnellinsen sind spezielle Linsen.



AUGUSTIN JEAN FRESNEL, 1788 BIS 1827, FRANZÖSISCHER PHYSIKER

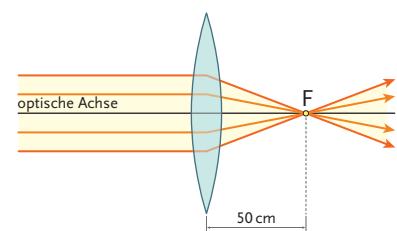


Drei Sammellinsen: eine biconvexe, eine plankonvexe und eine konkavkonvexe Sammellinse.

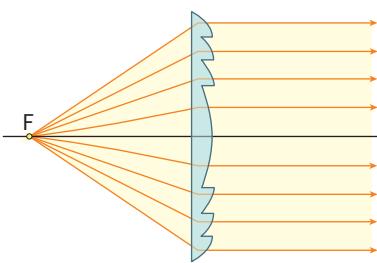


Drei Zerstreuungslinsen: eine biconcave, eine planconcave und eine konvexkoncave Zerstreuungslinse.

Convexus: lateinisch für gewölbt.
Concavus: lateinisch für hohl.



Eine **biconvexe Sammellinse** mit einer Brennweite von $\frac{1}{2} m$ bzw. mit einer Brechkraft von zwei Dioptrien sammelt das achsenparallel einfallende Licht $\frac{1}{2} m$ von der Hauptebene entfernt im Brennpunkt F



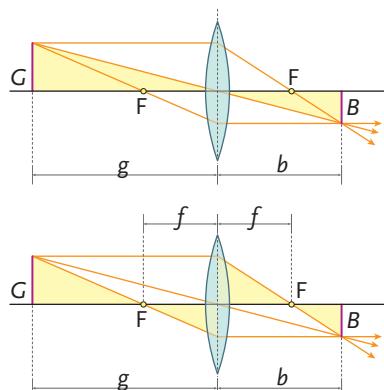
Eine Fresnellinse hat überall die richtige Neigung, um alle durch den Brennpunkt einfallenden Strahlen parallel zur optischen Achse auszurichten. Die Linse ist aber von überflüssigem Material befreit.



Schaltet man einen Overheadprojektor ein, kann man an der Projektionswand konzentrische Kreise erkennen, die eine Fresnellinse charakterisieren.



Zur Parallelverschiebung des Mittelpunktstrahls bei dicken Linsen vergleichen Sie die Aufgabe 2.3.10 zur Parallelverschiebung eines Lichtstrahls beim Durchgang durch eine planparallele Platte im Kap. 2.3.3.



Abbildungsmaßstab und Abbildungsgleichung folgen durch Anwendung des Strahlensatzes auf die gelb unterlegten ähnlichen rechtwinkeligen Dreiecke. Die Abbildungsgleichung können wir aus

$$\frac{G}{g-f} = \frac{B}{f}$$

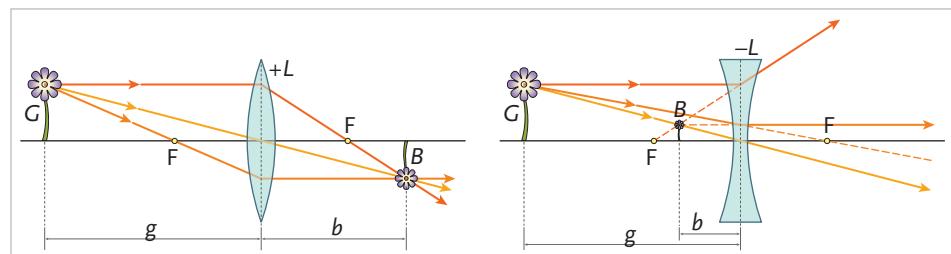
ableiten, indem wir den Abbildungsmaßstab verwenden.

Linsen mit großer Brechkraft und großem Durchmesser haben große Massen, sodass in der Praxis möglichst **Fresnel-** oder **Stufenlinsen** verwendet werden. Diese werden meist aus Glas oder Kunststoff gepresst und finden beispielsweise in Overheadprojektoren Verwendung.

Konstruktion von Linsenbildern

Für die Konstruktion der Abbildung eines Gegenstandes durch symmetrische Linsen eignen sich

- der **Haupt- oder Mittelpunktstrahl**,
 - der **Brennpunktstrahl** und
 - der **Parallelstrahl** zur optischen Achse am besten.
-
- Der **Mittelpunkt- oder Hauptstrahl** geht ungebrochen durch den Mittelpunkt der dünnen Linse.
 - Der durch den Brennpunkt auf die Linse fallende **Brennpunktstrahl** verläuft nach der Brechung parallel zur optischen Achse.
 - Der **Parallelstrahl** läuft nach der Brechung durch den Brennpunkt.



Bei dicken Linsen, die durch zwei Hauptebenen beschrieben werden können, kommt es zu einer Parallelverschiebung des Mittelpunktstrahls.

Gegenstandsweite, Gegenstandsgröße, Bildweite und Bildgröße

Für dünne Linsen mit einer Hauptebene gilt:

- Der Abstand des Gegenstandes mit der **Gegenstandsgröße G** von der Hauptebene heißt **Gegenstandsweite g**.
- Der Abstand des Bildes mit der **Bildgröße B** von der Hauptebene heißt **Bildweite b**.

Der Zusammenhang zwischen den vier Größen g , G , b und B wird durch den **Abbildungsmaßstab** und der zwischen f , g und b durch die **Abbildungsgleichung** beschrieben. Beide Beziehungen ergeben sich durch den Strahlensatz.

Abbildungsmaßstab und Abbildungsgleichung

Das Verhältnis von Bildgröße B zu Gegenstandsgröße G heißt **Abbildungsmaßstab**.

$$\text{Abbildungsmaßstab} = \frac{B}{G}$$

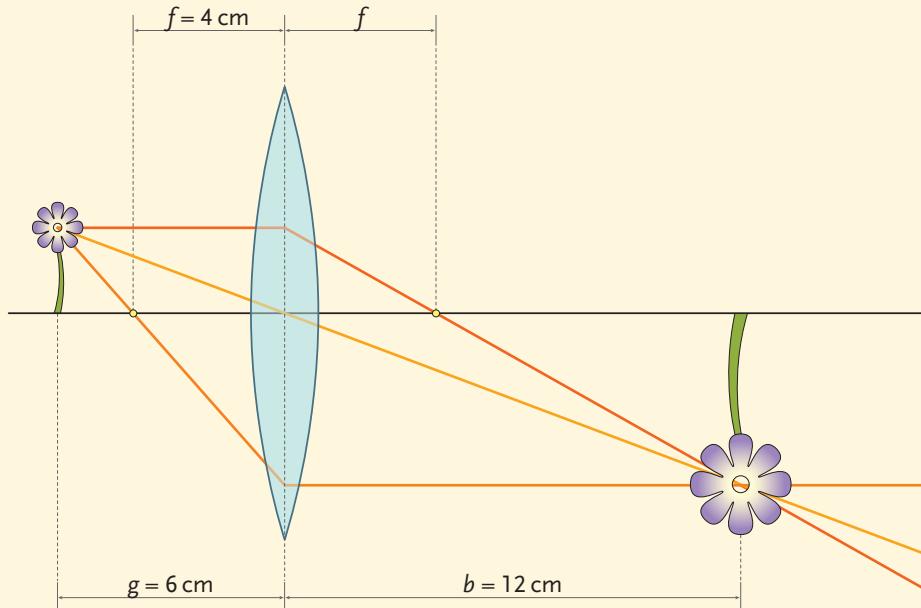
Die **Abbildungsgleichung** verbindet Bild- und Gegenstandsweite mit der Brennweite f .

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{g} + \frac{1}{b}$$

Beispiel 2.3.10: Sammellinsenbild

Wir konstruieren das Bild eines drei Zentimeter großen Gegenstandes, der 6 cm vor einer dünnen Sammellinse mit einer Brennweite von 4 cm steht.

$$G = 3 \text{ cm}, g = 6 \text{ cm}, f = 4 \text{ cm}.$$



Für die Bildweite gilt: $1/b = 1/f - 1/g$, also $1/b = (g-f)/(f \cdot g)$ und damit $b = f \cdot g / (g-f) = 4 \text{ cm} \cdot 6 \text{ cm} / (6 \text{ cm} - 4 \text{ cm}) = 12 \text{ cm}$.

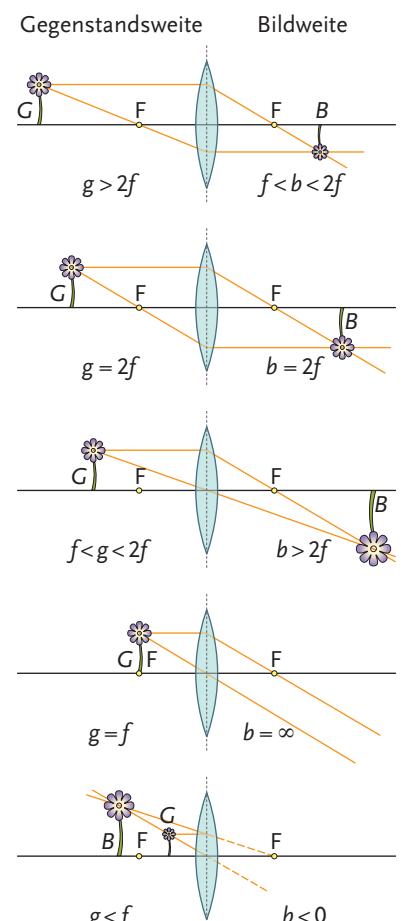
Die Bildgröße B ergibt sich zu $B = G \cdot b/g = 3 \text{ cm} \cdot 12 \text{ cm} / 6 \text{ cm} = 6 \text{ cm}$. Das Bild ist umgekehrt, reell und zweifach vergrößert.

Die Formel $b = \frac{f \cdot g}{g-f}$ für die Bildweite b zeigt, dass b für $g < f$ negativ wird, also ein virtuelles Bild entsteht. Die Sammellinse wirkt dann als Lupe.

Wir untersuchen die Gegenstandsweite g in Abhängigkeit von der Brennweite f für fünf Fälle:

1. $g > 2f$
2. $g = 2f$
3. $f < g < 2f$
4. $g = f$
5. $g < f$.

- Für den ersten Fall folgt $b < g$, und damit wegen $B/G = b/g$ ein verkleinertes, umgekehrtes und reelles Bild. Eine mögliche Anwendung ist der **Fotoapparat**.
- Im zweiten Fall $g = 2f$ erhalten wir $b = g$, also ein reelles, nicht vergrößertes auf dem Kopf stehendes Abbild des Gegenstandes; bei einer **Umkehrlinse** ist dies der Fall.
- Im Fall 3 ist das Bild vergrößert, umgekehrt und reell.
- Fall 4 ergibt eine unendliche Bildweite, weil der Parallel- und Mittelpunktstrahl nach der Brechung parallel verlaufen; eine mögliche Anwendung ist ein **Scheinwerfer**.
- Befindet sich der Gegenstand innerhalb der einfachen Brennweite der Sammellinse, ist das Bild aufrecht, vergrößert und virtuell; dies nutzt man bei einer **Lupe**.



Die Bilder und Bildweiten b einer Sammellinse ($f > 0 \text{ m}$) in Abhängigkeit von der Gegenstandsweite g



Ziele erreicht? – „Linsen“

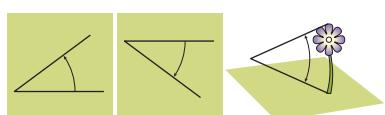
- 2.3.19** Skizzieren Sie eine **bi-**, eine **plan-** und eine **konkavkonvexe Linse** und skizzieren Sie (näherungsweise) die Hauptebene.
- 2.3.20** Skizzieren Sie eine **bi-**, eine **plan-** und eine **konvexkonkave Linse**. Skizzieren Sie (näherungsweise) die Hauptebene.
- 2.3.21** Ein Gegenstand befindet sich 30 cm vor der Hauptebene einer dünnen Linse. Wie groß ist die **Brechkraft** der Linse, wenn diese ein reelles, doppelt vergrößertes Bild des Gegenstandes produziert? Konstruieren Sie den Strahlengang.
- 2.3.22** Eine **Kleinbildkamera** besitzt ein Objektiv mit einer Brennweite von 50 mm und sei auf Unendlich eingestellt. Um welche Strecke müssen wir das Objektiv jeweils verschieben, wenn wir einen Gegenstand in 4 m bzw. in 1 m Entfernung fotografieren möchten?
- 2.3.23** Eine **Luftbildkamera** mit einer Brennweite von 30 cm wird in einer Höhe von 6 km eingesetzt. Welche Fläche der Erdoberfläche kann damit näherungsweise erfasst werden, wenn das Bildformat 15 mal 15 cm beträgt?
- 2.3.24** Leiten Sie die **Abbildungsgleichung** ab.



Gleich mehrere Teleskope auf engem Raum



In der Trigonometrie (Dreiecksvermessung) verwendet man zusätzlich zum Sehwinkel den Höhen- und den Tiefenwinkel.



Höhen-, Tiefen- und Sehwinkel.
Beim Höhen- und Tiefenwinkel verläuft einer der beiden Sehstrahlen horizontal und der zweite Sehstrahl bildet mit dem ersten eine Vertikalebene.

2.3.7 Optische Instrumente

Optische Instrumente sind in technologisch orientierten Gesellschaften unverzichtbar

- bei der Unterstützung des menschlichen Auges durch Luppen, Brillen oder Linsen;
- für Untersuchungen von mikroskopischen Proben durch Lichtmikroskope;
- für terrestrische (erdbezogene) und astronomische Beobachtungen;
- bei der fotografischen bzw. filmischen Dokumentation;
- bei Projektionen jeglicher Art.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den **Sehwinkel** eines Gegenstandes und die **Vergrößerung** optischer Instrumente definieren;
- **Lupe, Mikroskop, Fernrohr, Fotoapparat bzw. Kamera und Projektor** beschreiben und die **Vergrößerung** einer Lupe berechnen.

Sehwinkel

Der **Sehwinkel** ist jener Winkel, unter dem eine lineare Ausdehnung eines Gegenstandes in einer bestimmten Entfernung erscheint.

Zur Feststellung des Sehwinkels der Höhe eines Objekts denkt man sich vom Auge der beobachtenden Person einen Sehstrahl zum höchsten und einen zum tiefsten Punkt. Der von den beiden Sehstrahlen eingeschlossene Winkel ist der Sehwinkel.

Beispiel 2.3.11: Sehwinkel des Stephansdoms

Der Stephansdom – genauer die vertikale Ausdehnung seines Südturmes mit 136,4 m – erscheint uns in einer Entfernung von 50 m unter dem Sehwinkel

$$\alpha \approx \arctan\left(\frac{135 \text{ m}}{50 \text{ m}}\right) + \arctan\left(\frac{1,4 \text{ m}}{50 \text{ m}}\right) \approx 69,7^\circ + 1,6^\circ = 71,3^\circ,$$

wenn wir eine Augenhöhe von 1,4 m voraussetzen.

Nähern wir uns um 10 m an den Südturm an, steigt der Sehwinkel auf

$$\alpha \approx \arctan\left(\frac{135 \text{ m}}{40 \text{ m}}\right) + \arctan\left(\frac{1,4 \text{ m}}{40 \text{ m}}\right) \approx 73,5^\circ + 2,0^\circ = 75,5^\circ.$$

Wenn wir uns dem Fußpunkt der Turmkreuzspitze des Südturmes bis auf 20 m nähern, erscheint uns der Südturm unter einem Sehwinkel von

$$\alpha \approx \arctan\left(\frac{135 \text{ m}}{20 \text{ m}}\right) + \arctan\left(\frac{1,4 \text{ m}}{20 \text{ m}}\right) \approx 81,6^\circ + 4,0^\circ = 85,6^\circ.$$

Beispiel 2.3.12: Sehwinkel des vorliegenden Naturwissenschaftsbuches

Während wir beim Stephansdom den Sehwinkel aus zwei unterschiedlichen Höhen- und Tiefenwinkeln zusammengesetzt haben, können wir beim Buch den symmetrischen Fall annehmen, dass sich das betrachtende Auge in der Mittellotebene des Buches befindet. Für den Sehwinkel gilt dann:

$$\alpha = 2 \cdot \arctan\left(\frac{h}{2e}\right),$$

wobei h die Höhe des Buches und e die Entfernung des Auges vom Buch bezeichnet.

Für eine Entfernung von 75 cm (ausgestreckte Arme) ergibt sich

$$\alpha \approx 2 \cdot \arctan\left(\frac{29,7 \text{ cm}}{150 \text{ cm}}\right) \approx 22,4^\circ.$$

Halten wir das Buch in 25 cm Entfernung, also der Weite des deutlichen Sehens, vergrößern wir den Sehwinkel zu

$$\alpha \approx 2 \cdot \arctan\left(\frac{29,7 \text{ cm}}{50 \text{ cm}}\right) \approx 61,4^\circ.$$

Lupe

Eine **Lupe** bzw. ein **Vergrößerungsglas** ist eine Konvexlinse kleiner Brennweite. Befindet sich ein Gegenstand mit der Gegenstandsgröße G innerhalb der Brennweite f , also $g < f$, erzeugt die Lupe ein aufrechtes, vergrößertes und virtuelles Bild des Gegenstandes.

Die **Brennweite** einer Lupe bestimmt ihre **Vergrößerung** und ist damit ihre wichtigste Kenngröße. Sie lässt sich für den Alltag hinreichend genau bestimmen. Dazu wird mithilfe der Lupe der Durchmesser des kreisförmigen Lichtflecks einer möglichst weit entfernten Lichtquelle mit parallel einfallendem Licht (z. B. der Sonne) beim Abbilden z. B. auf ein Blatt Papier minimiert. Der Abstand zwischen Lupe und Papier ist dann ihre Brennweite.

Vergrößerung ν

Die Vergrößerung ist das Verhältnis vom Tangens des Sehwinkels mit optischem Instrument zum Tangens des größtmöglichen Sehwinkels ohne optisches Instrument.

$$\nu = \frac{\tan \alpha_v}{\tan \alpha}$$

Ableitung der Vergrößerung ν einer Lupe

Um die Vergrößerung einer Lupe abzuschätzen, wählt man die Weite des deutlichen Sehens $s_0 = 25 \text{ cm}$ als Bezugsgröße.

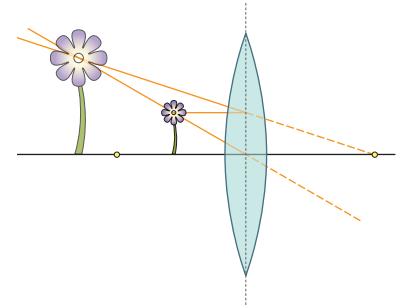
Ein Gegenstand mit Gegenstandsgröße bzw. Objektgröße G erscheint in dieser Entfernung s_0 unter dem Sehwinkel α mit $\tan \alpha = \frac{G}{s_0}$.



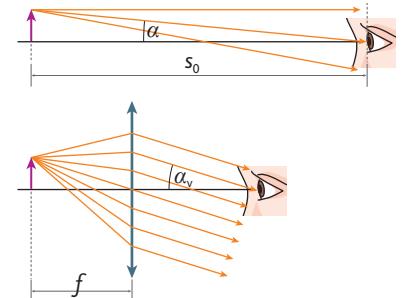
Das Auge ist entspannt, wenn es auf große Entfernung akkommodiert ist, wie es für eine große Bildweite b der Fall ist.



Das menschliche Auge kann seine Brennweite ändern; man spricht von Akkommodation. Siehe Kap. 2.3.8.



Strahlengang einer Lupe



Der Strahlengang macht die beiden rechtwinkeligen Dreiecke zur Berechnung der Vergrößerung einer Lupe sichtbar



Leselupe

Bei der **Ableitung der Vergrößerungsformel für die Lupe** sind wir davon ausgegangen, dass das Auge entspannt, also unendlich akkommodiert ist; dann entsteht auch kein virtuelles Bild.



Das Wort Mikroskop leitet sich aus dem Griechischen ab.
 μικρός: griechisch für klein.
 σκοπεῖν: griechisch für betrachten.

Für $g = f$ erscheint das vergrößerte Bild unter dem Winkel α_v :
 $\tan(\alpha_v) = G/f$.

Für die **Vergrößerung v einer Lupe** gilt daher:

$$v = \frac{\tan \alpha_v}{\tan \alpha} = \frac{\frac{G}{f}}{\frac{G}{s_0}} = \frac{s_0}{f} = \frac{250 \text{ mm}}{f}$$

Strenge unser Auge an, können wir den Gegenstand näher an die Lupe heranbringen, sodass ein virtuelles Bild in der Entfernung der Weite des deutlichen Sehens s_0 entsteht. Die Lupe müssen wir dazu nahe an unser Auge heranführen, damit sich die Brechkräfte von Lupe und nah akkommodiertem Auge addieren. Die maximale Vergrößerung beträgt dann $v_{\max} = \frac{s_0}{f} + 1$.

Beispiel 2.3.13: Lupe mit 5 cm Brennweite

Eine Lupe mit einer Brennweite von 5 cm erlaubt es, einen Gegenstand aus der Entfernung von 5 cm zu betrachten, statt aus der Entfernung der Weite des deutlichen Sehens von 25 cm.

Die Vergrößerung der Lupe ist gemäß
 $v = s_0/f = (25 \text{ cm})/(5 \text{ cm}) = 5$
 bei entspanntem Auge.

Mit nah akkommodiertem Auge ergibt sich eine sechsfache Vergrößerung.

Leselupen vergrößern meist zwei- bis sechsfach und haben aufgrund eines großen Linsendurchmessers ein relativ großes Sichtfeld.

Wegen eines zu kleinen Gesichtsfeldes und zu starker Abbildungsfehler ist die Vergrößerung von Lupen über das Fünfzehnfache nicht möglich.

Setzen wir in der Vergrößerungsformel der Lupe die Weite des deutlichen Sehens in Metern ein, so erhalten wir

$$v = (0,25 \text{ m})/f = 1 \text{ m}/(4f).$$

Wird die reziproke Brennweite $1/f$ durch die Brechkraft D der Linse ersetzt, erhalten wir die Vergrößerung der Lupe zu

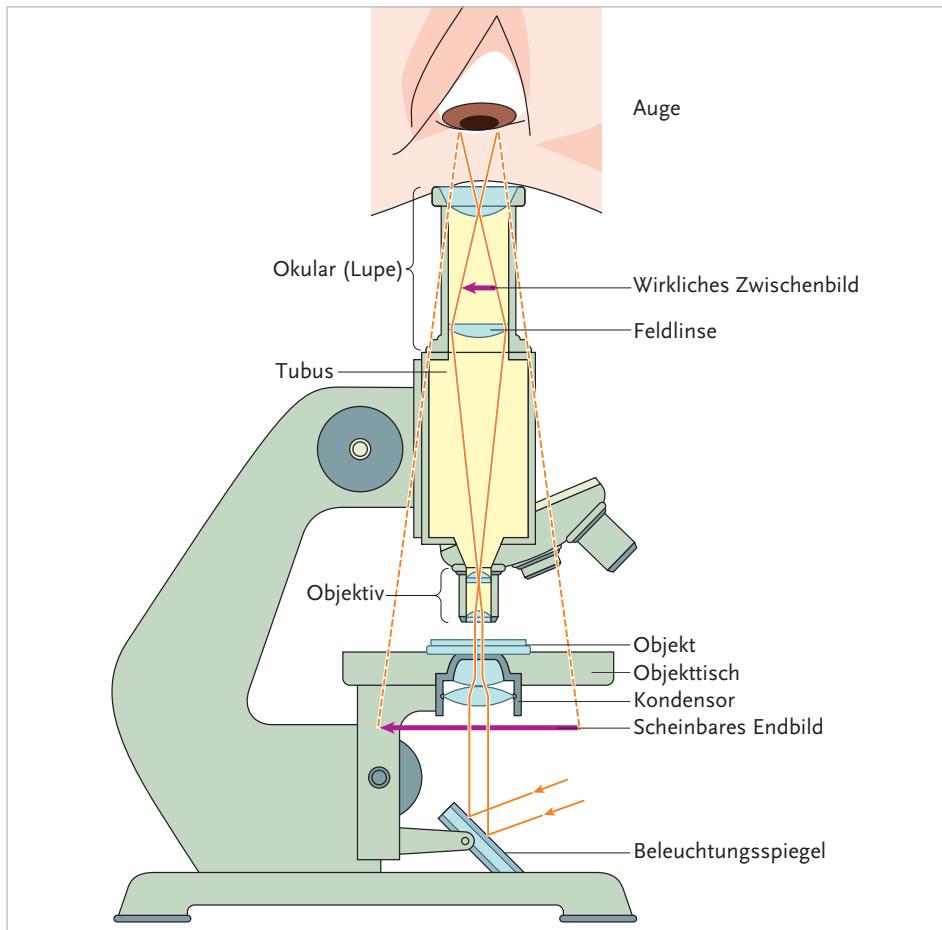
$$v = D/4.$$

Die Brechkraft der Lupe muss also größer sein als vier Dioptrien, um eine Vergrößerung zu bewirken.

Mikroskop

- Ein **Mikroskop** besteht aus zwei Sammellinsen(systemen) auf einer gemeinsamen optischen Achse.
- Die dem Objekt zugewandte Linse heißt **Objektiv**, die andere **Okular**.
- Der Abstand der inneren Brennpunkte heißt **Tubuslänge**.

Die älteste bekannte Mikroskopietechnik ist die Lichtmikroskopie, die zeitgleich mit der Herstellung der ersten handgeschliffenen Linsen etwa seit 1600 entwickelt wurde.



Das physikalisch maximal mögliche Auflösungsvermögen eines klassischen Lichtmikroskops ist von der Wellenlänge des verwendeten Lichts abhängig und auf etwa 0,2 Mikrometer beschränkt. Diese Grenze wird als **Abbelimit** bezeichnet.

Auflösungsvermögen

Als **Auflösungsvermögen** bezeichnet man den kleinsten noch wahrnehmbaren Abstand zweier punktförmiger Objekte.

Das menschliche Auge schafft unter idealen Bedingungen eine Auflösung von rund einer halben Bogenminute bis zu einer Bogenminute.

Beispiel 2.3.14: Das menschliche Auge

In einer Entfernung e von 25 cm kann das menschliche Auge bei einer Auflösung von einer Bogenminute zwei Punkte in einem Abstand von

$$d = 2 \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \cdot e = 2 \cdot \tan\left(\frac{1^\circ}{120}\right) \cdot 25 \text{ cm} \approx 0,07 \text{ mm}$$

noch als getrennt wahrnehmen.

Beträgt die Entfernung drei Meter, so können zwei Punkte nur mehr dann als getrennt wahrgenommen werden, wenn sie mindestens

$$d = 2 \cdot \tan\left(\frac{1^\circ}{120}\right) \cdot 3 \text{ m} \approx 0,87 \text{ mm}$$

voneinander entfernt sind.

Bei einer Auflösung von einer halben Bogenminute ergeben sich näherungsweise die halben Werte für die gerade noch aufzulösenden Distanzen bei gleichem Abstand.

Elektronenmikroskope ermöglichen eine höhere Auflösung als Lichtmikroskope, weil die Wellenlänge eines Elektrons wesentlich kleiner ist als die Wellenlänge von sichtbarem Licht.



ERNST ABBE, 1840 BIS 1905,
DEUTSCHER PHYSIKER



Das menschliche Auge (siehe Kap. 2.3.8) ist eines der Sinnesorgane und das Sehen wird auch der Leitsinn des Menschen genannt.

Bereits Aristoteles hat **fünf Sinne** beschrieben.

Sehen, die visuelle Wahrnehmung mit den Augen.

Hören, die auditive Wahrnehmung mit den Ohren.

Riechen, die olfaktorische Wahrnehmung mit der Nase.

Schmecken, die gustatorische Wahrnehmung mit der Zunge.

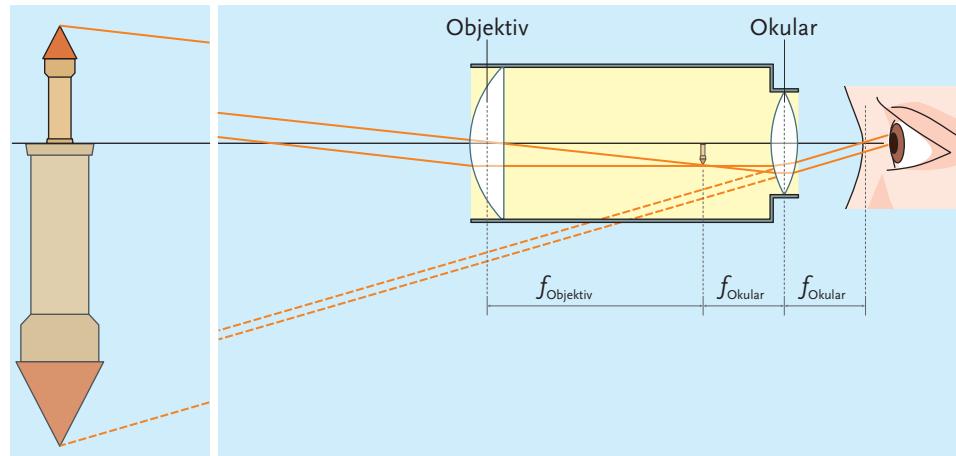
Tasten, die taktile Wahrnehmung mit der Haut.

Während bei Lufen die Vergrößerung mit ca. 15 begrenzt ist, schaffen Lichtmikroskope etwa 1 500-fache Vergrößerungen. Noch stärkere Vergrößerung wird hauptsächlich durch Beugung verhindert.

Fernrohr

- Ein **Fernrohr** vergrößert den Sehwinkel mit einer fernrohrabhängigen Optik.
- Die **Fernrohroptik** kann aus Linsen, Prismen oder Spiegeln bestehen.
- **Linsenfernrohre** bzw. **Refraktoren** nützen die **Brechung**.
- **Spiegelfernrohre**, **Spiegelteleskope** bzw. **Reflektoren** nützen die **Spiegelung**.

Das keplersche oder astronomische Fernrohr



Ein Fernglas ermöglicht weitreichende Beobachtungen

Wie das Bild zeigt, erzeugt das Objektiv von einem weit entfernten Objekt ein reelles, umgekehrtes Zwischenbild. Das Zwischenbild wird durch das Okular, das wie eine Lupe wirkt, betrachtet. Die ins Auge fallenden Strahlenbündel entsprechen einem winkelmäßig vergrößerten, umgekehrten virtuellen Bild.

Auf der Netzhaut entsteht ein aufrechtes reelles Bild, das das Gehirn als kopfstehendes Objekt in geringerer Entfernung interpretiert. Das röhrenförmige Gehäuse, das die Optik trägt, ist der Tubus des Fernrohrs.

Die Vergrößerung eines Fernrohrs ist durch das Verhältnis der Brennweiten von Objektiv und Okular gegeben:

$$v_{\text{Fernrohr}} = \frac{f_{\text{Objektiv}}}{f_{\text{Okular}}}.$$

Beispiel 2.3.15: Fernrohr

Ein Fernrohr mit einer Objektivbrennweite von 80 cm und einer Okularbrennweite von 4 cm hat eine 20-fache Vergrößerung.



Ein Teleskop, das auch auf öffentlichen Plätzen im Einsatz ist

Bei Teleskopen für die Astronomie kommt es für Lichtstärke und Auflösung auf den freien (optisch wirksamen) Durchmesser des Objektivs an, der Öffnung oder Apertur genannt wird. Für Aperturen ab etwa einem Meter sind Linsenobjektive ungeeignet, weshalb etwa ab dem 20. Jahrhundert alle größeren Teleskope als Reflektoren (Spiegelteleskope) ausgeführt werden. Diese haben meist einen oder mehrere Sekundärspiegel, die das Licht aus dem Strahlengang des Hauptspiegels herauslenken.

Für terrestrische Beobachtungen (z. B. Kultur [Oper], Sport, Ornithologie, Jagd und Militär) verwendet man Ferngläser. Man versteht darunter kompakte Refraktoren (Linsenfernrohre) kürzerer Brennweite mit Prismensystemen, die ein aufrechtes und seitenrichtiges Bild liefern.

Fotoapparat und Kamera

- Ein **Fotoapparat** dient zur Aufnahme und Speicherung eines einzelnen Bildes oder einer kurzen Serie von Einzelbildern.
- Eine **Kamera** bzw. genauer **Laufbildkamera** kann kontinuierliche Bildfolgen festhalten.

Im Alltag haben sich Digitalkameras durchgesetzt, die auch kurze Filmsequenzen aufnehmen können.

Das Objektiv eines Fotoapparats bzw. einer Kamera ist ein System von Linsen, das wie eine Sammellinse wirkt. Durch die Kombination verschiedener Linsen werden Farbfehler und Verzerrungen teilweise vermieden.

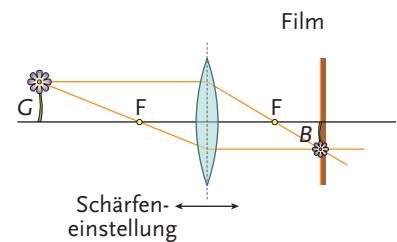
Die richtige Lichtmenge wird durch die Irisblende, meist als Kreisblende mit variabler Öffnung ausgeführt, und den Verschluss festgelegt. Die Verschlusszeit gibt für eine bestimmte, bei hochwertigen Geräten einstellbare Zeit den Lichtweg zum Belichten frei. Typische Verschlusszeiten variieren von einigen Sekunden bis zu Millisekunden.

Projektor

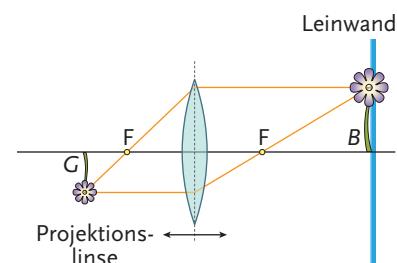
- Optische Projektoren haben ein sehr helles Leuchtmittel und ein Projektionsobjektiv (Projektionslinse).
- Durchlichtprojektoren (Diaskope) durchstrahlen ein Medium.

Die nebenstehende Abbildung zeigt, dass ein Projektor die Umkehrung einer Kamera in Bezug auf den Strahlengang darstellt. Dieser ist gleichsam bezüglich der optischen Achse gespiegelt. Weil das projizierte Bild aufrecht sein soll, muss der Gegenstand verkehrt (auf dem Kopf stehend) in den Projektor eingebracht werden.

Ein Tageslichtprojektor, mit dem bedruckte oder beschriebene Kunststofffolien projiziert werden, ist ein Durchlichtprojektor. Die Ausrichtung (Kollimation) der vom Leuchtmittel zunächst ungerichtet ausgehenden Lichtstrahlen wird von einem Kondensor übernommen.



Schematischer Strahlengang in einer Kamera. Die Linse kann zur Schärfeneinstellung (oft durch Autofokus) entlang der optischen Achse verschoben werden.



Schematischer Strahlengang in einem Projektor. Die Projektionslinse kann zur Schärfeneinstellung (oft durch Autofokus) entlang der optischen Achse verschoben werden.

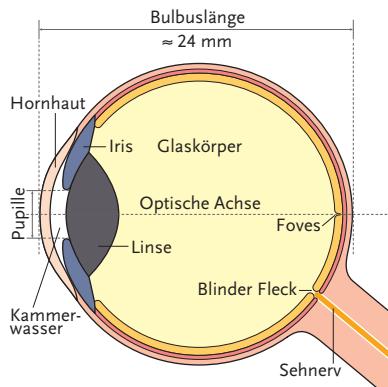
Proicere: lateinisch für hinwerfen.

Condensare: lateinisch für verdichten.



Ziele erreicht? – „Optische Instrumente“

- 2.3.25 Skizzieren Sie einen **Höhen-**, einen **Tiefen-** und einen **Sehwinkel**.
- 2.3.26 Berechnen Sie den **Sehwinkel**, unter dem ein Besatzungsmitglied der ISS (International Space Station) die Erde sieht.
- 2.3.27 Welche **Brechkraft** hat eine Lupe, mit der man bei entspanntem Auge eine Vergrößerung von 8 erreicht?
- 2.3.28 Skizzieren Sie die beiden Extremfälle, in denen ein Besatzungsmitglied der ISS den Erdmond unter einem möglichst großen bzw. möglichst kleinen **Sehwinkel** sieht. Recherchieren Sie dazu die nötigen Größen.



Vereinfachte Skizze des menschlichen Auges. Die Linse benötigt das Auge zum Akkomodieren.

Korrektur von Kurzsichtigkeit (Bild wird vor der Netzhaut erzeugt) durch **angepasste Zerstreuungslinsen**.

Korrektur von Weitsichtigkeit (Abbildung erfolgt hinter der Netzhaut) durch **angepasste Sammellinsen**.

2.3.8 Das menschliche Auge

Cineasten kennen sicherlich das Zitat „Ich seh' dir in die Augen, Kleines“, das Humphrey Bogart im Film Casablanca improvisiert zu Ingrid Bergman sagte. Brillen leisten nicht nur fehlsichtigen Menschen unschätzbare Dienste. Sie sind als Schutz-, Sonnenbrillen und solche mit speziellem UV-Schutz bei Arbeit, Sport und Freizeitbeschäftigung unverzichtbare Schutzmittel für unsere Augen. Die Beeinträchtigung der Sehleistung und Reaktionsgeschwindigkeit durch Übermüdung, Alkohol und andere Drogen hat leider immer wieder dramatische Folgen und gerichtliche Nachspiele.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Akkommodation** erläutern und erklären, zu welcher Gruppe von optischen Instrumenten das **Auge** vereinfachend gerechnet werden kann;
- die **Brechkraft** des menschlichen Auges berechnen.

Das Auge mit einem mittleren Durchmesser von rund 2,4 cm funktioniert prinzipiell wie eine zuvor beschriebene Kamera. Das **Linsensystem** besteht hauptsächlich aus **Hornhaut** und der bikonvexen **Augenlinse**. Wir können die beiden vereinfachend zu einer dicken Linse mit einer Brennweite von 17 mm zusammenfassen. Mit $D = 1/f$ ergibt sich eine Brechkraft von rund 58,8 dpt.

Wichtige Kennzahlen des menschlichen Auges:

- Die **Hornhaut** (Cornea) hat eine Brechzahl von rund 1,378 und eine Brechkraft von ca. 43 dpt.
- Die Brechkraft des **Kammerwassers** ($n = 1,336$) ist vernachlässigbar.
- Der Durchmesser der von der **Iris** gebildeten **Pupille** (kreisrunde Öffnung vor der Augenlinse) variiert je nach Beleuchtungsstärke zwischen 2 und 8 mm.
- Der Krümmungsradius und damit die **Brennweite** der Augenlinse kann durch einen Ringmuskel verändert werden. Dies bezeichnet man als **Akkommodation**.
- Der **Glaskörper** besteht aus einer wasserklaren gallertartigen Masse mit der gleichen Brechzahl wie das Kammerwasser.
- Die **Netzhaut** (Retina) ist eine mosaikartige Struktur aus sehr vielen Sehzellen, deren Empfindlichkeit 15 Zehnerpotenzen umspannt. Die größte Lichtempfindlichkeit besitzt die Netzhaut in der Sehgrube (Fovea centralis).
- Ein Auge heißt **kurzsichtig** (myop), wenn sich parallel zur optischen Achse eintretende Strahlen vor der Netzhaut schneiden. Die Brechkraft ist zu groß.
- Schneiden sich parallel zur optischen Achse eintretende Strahlen hinter der Netzhaut, heißt das Auge **weitsichtig** (hyperop). Die Brechkraft ist zu klein.



Ziele erreicht? – „Das menschliche Auge“

2.3.29 Erklären Sie die **Akkommodation**.

2.3.30 Berechnen Sie die **Brechkraft** des menschlichen Auges, wenn Sie eine Brennweite von 17 mm voraussetzen.

2.3.9 Interferenz von Lichtwellen

Lässt man einen Laserstrahl durch ein Beugungsgitter mit gekreuzten Linien fallen, ergibt sich ein faszinierendes Muster, das mithilfe der Interferenz einfach erklärt werden kann. Im Alltag kann man sich der Faszination von Regenbogenfarben am Himmel, auf Seifenblasen, auf CDs oder in Ölpfützen kaum entziehen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe **Gang-** und **Phasendifferenz** erklären und die Begriffe **Kohärenz** und **Interferenz** unterscheiden;
- den **optischen** und den **geometrischen Weg** auseinanderhalten;
- die **Bedingungen für konstruktive und destruktive Interferenz** angeben und anwenden.



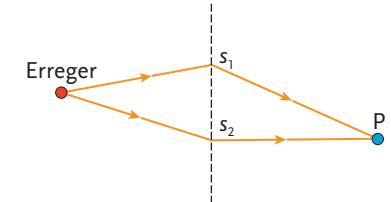
Regenbogenfarben auf einer CD

Gang- und Phasendifferenz

Gelangt eine Lichtwelle von einem Erreger auf zwei verschiedenen langen Wegen in einem homogenen Medium zu einem Punkt P, kommt es

- zu einer **Verstärkung** im Punkt P, wenn der **Gangunterschied** $s_2 - s_1$ ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge ist: $s_2 - s_1 = k \cdot \lambda$, k eine ganze Zahl;
- zu einer **Auslöschung** im Punkt P, wenn der Gangunterschied $s_2 - s_1$ ein ungerades ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge ist:

$$s_2 - s_1 = (2k + 1) \cdot \lambda/2, k \text{ eine ganze Zahl.}$$



Eine Welle gelangt auf zwei verschiedenen Wegen s_1 und s_2 zum Punkt P. Dadurch ist Kohärenz, also eine feste Phasenbeziehung, und damit die Voraussetzung für Interferenz gegeben. Ob eine Verstärkung oder eine Auslöschung in P stattfindet, hängt vom Gangunterschied $s_2 - s_1$ ab.

Kohärenz und Interferenz

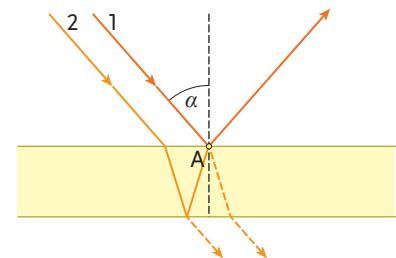
Kohärentes (interferenzfähiges) Licht besitzt eine konstante Phasenbeziehung. Laser können als Paradebeispiel für Quellen von kohärentem Licht angeführt werden. Zwei oder mehrere verschiedene Temperaturstrahler (Glühlampe, Kerze usw.) liefern kaum interferenzfähiges Licht.

Interferenzen an dünnen Schichten

Auf Seifenblasen kann man oft die schillerndsten Farben beobachten. Dasselbe gilt auch für einen Ölfilm auf Wasser, CDs, Oxidschichten auf Metallen, Perlmutt, Fischschuppen usw. Es handelt sich dabei jeweils um dünne Schichten aus durchsichtigen Stoffen. Die schillernden Farben entstehen durch Interferenz des an der Ober- und Unterseite der dünnen Schicht reflektierten Lichts.

Im Punkt A der Oberseite der dünnen Schicht vereinigen sich in der nebenstehenden Skizze zwei Lichtwellen. Die an der Unterseite der dünnen Schicht reflektierte Welle 2 legt, bevor sie mit der an der Oberseite der dünnen Schicht reflektierten Welle 1 vereinigt wird, einen weiteren optischen Weg (= geometrischer Weg · Brechungsindex) zurück. Dieser hängt von der Schichtdicke d , der Brechzahl n und dem Einfallswinkel α ab.

Für die optische Gangdifferenz $s_2 - s_1$ bei dünnen Schichten ist zu beachten, dass sich der optische Weg als geometrischer Weg, multipliziert mit dem Brechungsindex, ergibt. Zusätzlich tritt bei einer Reflexion an einer Grenzschicht zwischen einem optisch dünneren und einem optisch dichteren Medium ein Phasensprung um π auf, der einer Gangdifferenz einer halben Wellenlänge entspricht.



! Die beiden Bedingungen für Verstärkung

$$s_2 - s_1 = k \cdot \lambda \quad \text{und Auslöschung}$$

$$s_2 - s_1 = (2k + 1) \cdot \lambda/2 \quad \text{von Lichtwellen.}$$

Dabei ist k eine ganze Zahl.



Zum Phasensprung vgl.
Kap. D, 2.2.



Nur im Vakuum ($n = 1$) sind der optische und der geometrische Weg identisch.

Geometrischer und optischer Weg

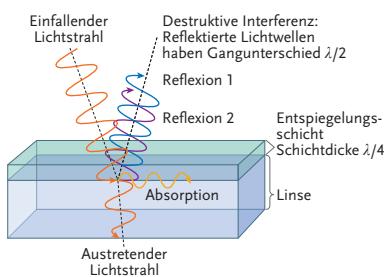
In einem homogenen Medium mit der Brechzahl n gilt für den **geometrischen** (also den tatsächlich zurückgelegten) **Weg** $s_{\text{geometrisch}}$ und den für die Berechnung entscheidenden **optischen Weg** s_{optisch} :

$$s_{\text{optisch}} = s_{\text{geometrisch}} \cdot n.$$



Öl auf Wasser kann zu sehr eindrucksvollen Farben führen

Prinzip der destruktiven Interferenz zur Entspiegelung von Gläsern



Die beiden reflektierten Strahlen löschen sich durch destruktive Interferenz aus



Viele Wellenphänomene kann man an dieser Seifenblase beobachten



Ein typisches Beugungsmuster

■ Zur Erinnerung:

$$\text{Brechzahl } n = \frac{\text{Vakuumlichtgeschwindigkeit}}{\text{Mediumlichtgeschwindigkeit}}.$$

Beispiel 2.3.16: Dünner Ölfilm

Wir berechnen die optische Gangdifferenz für senkrechten Lichteinfall auf einen Ölfilm der Dicke d mit der Brechzahl n .

$$s_2 - s_1 = 2 \cdot d \cdot n - \lambda/2$$

Trifft eine Welle der Wellenlänge λ auf diesen Ölfilm, tritt **Verstärkung** für eine Gangdifferenz $s_2 - s_1 = 2 \cdot d \cdot n - \lambda/2 = k \cdot \lambda$ auf.

Für $n = 4/3$ und $d = \frac{3}{4} \cdot 10^{-6}$ m gilt beispielsweise $2 \cdot 10^{-6}$ m = $(k + \frac{1}{2}) \cdot \lambda$ bzw. $\lambda = \{4/(2k+1)\} \cdot 10^{-6}$ m, wobei k eine natürliche Zahl (größer oder gleich 1) ist.

Beispiel 2.3.17: Entspiegelung durch eine Schicht mit der Dicke $\lambda/4$

Die Abbildung in der Randspalte zeigt, dass durch Aufbringen einer Entspiegelungsschicht mit der Dicke $\lambda/4$ genau jener Anteil des einfallenden Strahls mit der Wellenlänge λ ausgelöscht wird. Für seine Gangdifferenz gilt nämlich $s_2 - s_1 = 2\lambda/4 = \lambda/2$.



Ziele erreicht? – „Interferenz von Lichtwellen“

- 2.3.31** Skizzieren Sie einen **dünnen Film** und einen senkrecht einfallenden Lichtstrahl, der teilweise an der Filmoberfläche reflektiert wird. Der andere Teil dringt in den Film ein, wird an der Filmunterfläche reflektiert und tritt nach der Brechung vom Lot aus dem Film aus. Berechnen Sie die optische Gangdifferenz für eine Wellenlänge von 700 nm. Die Absorption kann vernachlässigt werden.
- 2.3.32** Leiten Sie die **optische Gangdifferenz** für einen unter dem Winkel α , gemessen zum Lot, auf einen dünnen Film auftreffenden Lichtstrahl ab. Nehmen Sie an, dass der Lichtstrahl teilweise an der Filmoberseite und an der Filmunterseite einmal reflektiert wird.

2.3.10 Beugung von Lichtwellen

Im Alltag ist die Beugung vor allem für Fotografen, Optiker und Techniker, die mit abbildenden Verfahren arbeiten, von großer Bedeutung. Wir haben schon im Kapitel 2.2 ein Beugungsexperiment angeführt. Jetzt wollen wir die Beugung quantitativ untersuchen und damit den Wellencharakter von Licht erneut nachweisen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Beugungsphänomene** im Alltag qualitativ beschreiben;
- die Begriffe **Beugung**, **Beugungsmaximum** und **Beugungsminimum** sowie **Gitterkonstante** erklären und interpretieren;
- die **Formel** für Helligkeitsminima beim Einzelpalt und die **Formel** für Helligkeitsmaxima beim Beugungsgitter ableiten und anwenden.

Beugung

Die Richtungsänderung von Wellen, die nicht durch Reflexion oder Brechung bedingt ist, heißt **Beugung**.

Bei Schallwellen bewirkt die Beugung, dass nicht sichtbare Schallquellen um die Ecke hörbar sind.

Beispiel 2.3.18: Beugung von Schall

Ein Ton mit einer Frequenz von 330 Hertz hat bei einer Schallgeschwindigkeit von 330 m/s eine Wellenlänge von einem Meter. Daher führen typische Alltagsgegenstände zu einer Beugung.

Bei sichtbarem Licht bewirkt die geringe Wellenlänge im Vergleich zu typischen Alltagsgegenständen, dass die Beugung im Alltag selten direkt wahrgenommen wird.

Beispiel 2.3.19: Beugung von sichtbarem Licht

Eine sichtbare Lichtwelle hat eine Wellenlänge zwischen etwa 400 und 800 nm, sodass nur sehr kleine Hindernisse zu einer merklichen Beugung führen.

Beugung von Licht am Einzelspalt

Für den Beugungswinkel α_n des n -ten **Beugungsminimums** gilt beim Einzelspalt der Breite b , wenn er mit monochromatischem Licht der Wellenlänge λ beleuchtet wird: $\sin(\alpha_n) = n \cdot \lambda/b$.

n ist eine natürliche Zahl und heißt **Ordnung der Beugung**.

Beispiel 2.3.20: Beugung von grünem Licht an einem Einzelspalt

Fällt grünes Licht mit 530 nm Wellenlänge auf einen Einzelspalt mit $6 \cdot 10^{-7}$ m Breite, beträgt der **Beugungswinkel** erster Ordnung $\alpha_1 = \arcsin(\lambda/b) \approx 62^\circ$.

Eine scharfe Trennung zwischen Beugungsminima und Beugungsmaxima erhält man mit Doppel- und Mehrfachspalten bzw. mit Beugungsgittern.

Beugung von Licht am Doppel- und Mehrfachspalt bzw. am Beugungsgitter

Für den Beugungswinkel α_n des n -ten **Beugungsmaximums** gilt bei einem Beugungsgitter mit Gitterkonstante a – Abstand der einzelnen Spalten: $\sin(\alpha_n) = n \cdot \lambda/a$.

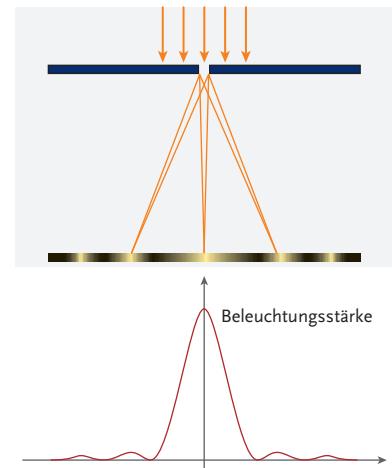
Die natürliche Zahl n ist wieder die **Ordnung der Beugung**.

Um die Formel $\sin(\alpha_n) = n \cdot \lambda/a$ besser zu verstehen, betrachten wir die nebenstehenden Abbildungen genauer. Beim Einzelspalt konnten wir zu jedem Strahl einen parallelen Strahl im Abstand $b/2$ betrachten. Beim Doppelspalt und beim Gitter können wir zu jedem Strahl $(0, 1, \dots)$ einen parallelen Strahl im Abstand a finden, deren Gangunterschied genau null, eine, ... ganze Wellenlänge beträgt.

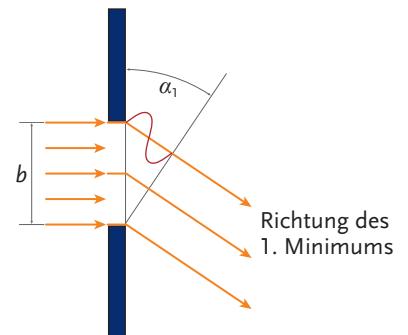
Beispiel 2.3.21: Beugung von gelbem Licht an einem Beugungsgitter

Gelbes Licht fällt mit 590 nm Wellenlänge auf ein Beugungsgitter mit 200 Linien pro Millimeter. Die Gitterkonstante ist $a = 1 \text{ mm}/200 = 5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$.

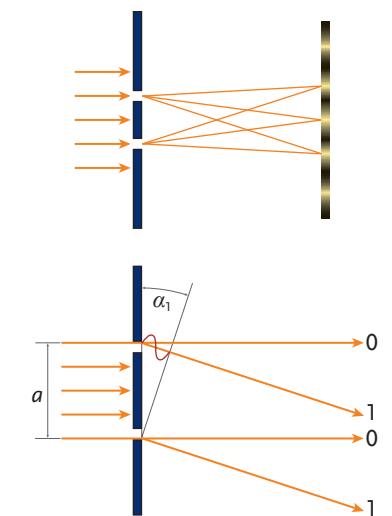
Der Beugungswinkel **erster Ordnung** ist $\alpha_1 = \arcsin(\lambda/a) = 6,8^\circ$.



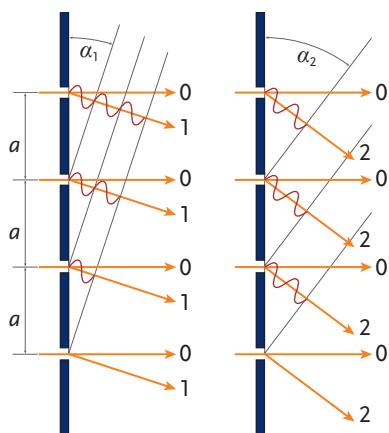
Beugung und Interferenz beim Einzelspalt: Die Beleuchtungsstärke ist in der Mitte am größten und fällt symmetrisch nach beiden Seiten bis zum ersten Beugungsmaximum (Helligkeitsmaximum) stark ab



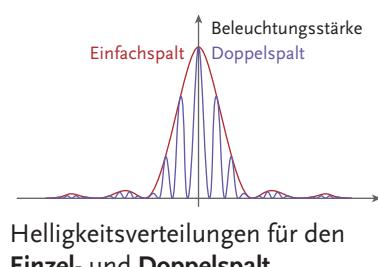
Das erste Minimum bei der Beugung am Einzelspalt: Weil es zu jedem Teilstrahl einen Strahl mit einer Gangdifferenz von einer halben Wellenlänge gibt, ergibt sich für den Winkel α_1 ein Beleuchtungsminimum



Beugung und Interferenz am Doppelspalt



Zur Entstehung des ersten und des zweiten Beugungsmaximums an einem **Beugungsgitter**



Helligkeitsverteilungen für den **Einzel-** und **Doppel-**spalt

Ein Beugungsgitter erzeugt ein Beugungsspektrum.

Polarisation siehe Kap. A, 6.

Der Beugungswinkel **zweiter Ordnung** ist $\alpha_2 = \arcsin(2\lambda/a) = 13,7^\circ$.

Für den größten beobachtbaren Beugungswinkel α_n ist $\sin(\alpha_n) < 1$, also $n \cdot \lambda/a < 1$, sodass $n < a/\lambda$.

$$n < (5 \cdot 10^{-6} \text{ m}) / (0,59 \cdot 10^{-6} \text{ m}) \approx 8,5$$

Damit sind links und rechts vom zentralen Helligkeitsmaximum **acht Nebenmaxima** sichtbar, wobei der Beugungswinkel des achten Helligkeitsmaximums $\alpha_8 = \arcsin(8 \cdot \lambda/a) = 70,7^\circ$ beträgt.



Ziele erreicht? – „Beugung von Lichtwellen“

2.3.33 Wie klein muss ein **Einzelpalt** mindestens sein, damit Beleuchtung mit blauem Licht mit 430 nm zwei Beugungsminima jeweils links und rechts vom zentralen Helligkeitsmaximum liefert? Berechnen Sie die Beugungswinkel und fertigen Sie eine beschriftete Skizze an.

2.3.34 Wie groß sind die **Beugungswinkel** der Helligkeitsnebenmaxima, wenn ein **Beugungsgitter** mit $a = 1,3 \mu\text{m}$ mit orangefarbigem Licht der Wellenlänge 660 nm beleuchtet wird? Fertigen Sie eine Grundrissskizze mit den von Ihnen berechneten Winkeln an.

2.3.35 Ein **Beugungsgitter** liefert auf einem zwei Meter entfernten Schirm einen Meter vom zentralen Helligkeitsmaximum entfernt das zweite Helligkeitsmaximum. Wie viele Helligkeitsmaxima kann man insgesamt mit dieser Anordnung beobachten, wenn rotes Licht mit 760 nm Wellenlänge verwendet wird? Wie viele sind es bei violettem Licht mit 400 nm?

2.3.11 Polarisation

Polarisationsfilter sind vor allem bei Kameras und Brillen bekannt. Im Kino erhält man Polarisationsbrillen, um 3D-Filme effektiv konsumieren zu können. Wir haben in den vorangegangenen Kapiteln nachgewiesen, dass Licht Wellencharakter hat. Mithilfe von Polarisationsexperimenten können wir feststellen, ob eine Welle eine Längs- (Longitudinal-) oder eine Querwelle (Transversalwelle) ist, weil Längswellen nicht polarisiert werden können.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- angeben, wo **Polarisation** im Alltag auftritt;
- die Wirkungsweise von **Polaroidbrillen** und die **Doppelbrechung** sowie die **optische Aktivität** beschreiben;
- das **Gesetz von Brewster** anwenden;
- das **brewstersche Gesetz** ableiten.

Die in den folgenden Versuchen beschriebenen Polarisationsfilter bestehen im Allgemeinen aus Kunststofffolien mit parallel orientierten fadenförmigen Molekülen, die die Vorzugsrichtung bzw. Durchlassrichtung festlegen. Die parallele Ausrichtung erfolgt durch mechanische Streckung.

Versuch 2.3.01: Polarisationsfilter

- Wir stellen uns in rund einem Meter Entfernung vor eine Mitschülerin und halten einen Polarisationsfilter so zwischen uns, dass wir einander durch den Filter sehen.
- Nun geben wir einen zweiten Polarisationsfilter senkrecht (gekreuzt) zum ersten Filter dazu und stellen fest, dass wir uns nicht mehr sehen können.
- Drehen wir nun einen der beiden Filter parallel zum anderen, können wir einander wieder sehen.

Wir folgern aus dem Versuch, dass beim Durchgang durch den ersten Polarisationsfilter nur mehr jener Anteil des auftreffenden Lichtes durchkommt, der in der durch den Polarisator vorgegebenen Ebene schwingt. Ist der zweite Polarisationsfilter (Analysator) parallel dazu ausgerichtet, kann das durch den ersten Filter durchgelassene Licht auch durch den zweiten dringen; wir sehen einander. Bei senkrechter Ausrichtung des zweiten Polarisationsfilters hingegen kann das durch den ersten Filter linear polarisierte Licht nicht hindurch, sodass wir einander nicht sehen.

Den Versuch 2.3.01 können wir auch mit einer Glühlampe und zwei Polarisationsfiltern durchführen. Bei einer Glühlampe ist sofort einsichtig, dass die Wellen, die von den einzelnen angeregten Atomen ausgesandt werden, völlig unabhängig voneinander sind und daher alle eine andere Polarisationsebene haben. Weil in einem Lichtstrahl eine so große Anzahl von Wellen auftritt, kommen im statistischen Mittel alle möglichen Polarisationsebenen gleich häufig vor: Das Licht erscheint nicht polarisiert (unpolarisiert).

Lineare Polarisation

Eine Welle ist **linear polarisiert**, wenn die Auslenkung nur mehr in einer Ebene senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt.

Weil Licht eine elektromagnetische Welle ist, variiert die elektrische Feldstärke periodisch nach Größe und Richtung. Die Ebene, in der sich die elektrische Feldstärke von linear polarisiertem Licht periodisch ändert, nennt man die Polarisations- oder Schwingungsebene.

Streuung

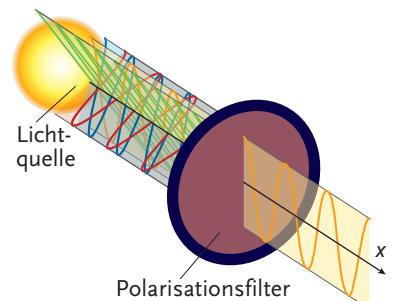
Ändert eine Lichtwelle beim Durchgang durch ein Medium lediglich seine Ausbreitungsrichtung, so heißt dieser Vorgang **Streuung**. Die Wahrscheinlichkeit für eine Streuung von Licht ist proportional zur vierten Potenz der Frequenz, also indirekt proportional zur vierten Potenz der Lichtwellenlänge.

Der Tageshimmel ist blau, weil das Sonnenlicht an den Luftmolekülen in alle Richtungen gestreut wird und der blaue (kurzwellige) Anteil wesentlich stärker gestreut wird.

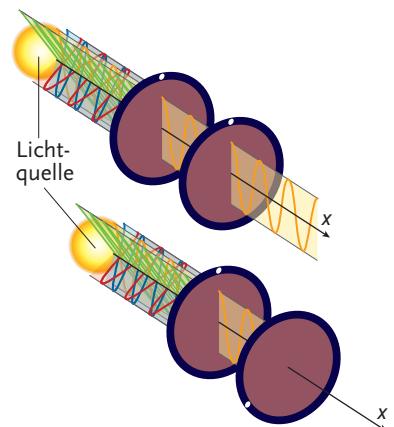
Versuch 2.3.02: Himmelsblau

Wir halten einen Polarisationsfilter gegen den blauen Himmel. Bei Drehung ergeben sich Helligkeitswechsel, die auf polarisiertes Licht hinweisen.

Erklärung des Versuchs: Durch **Streuung** (Ablenkung) von Licht an den Molekülen der Atmosphäre kommt es zur Polarisation.



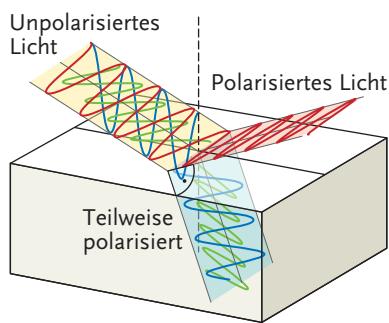
Durchgang von nicht polarisiertem Licht durch einen Polarisationsfilter: nur eine Schwingungsebene wird durchgelassen. Das Licht ist nach dem Polarisator linear polarisiert.



Skizze zu Versuch 2.3.01: Beachten Sie die weißen Punkte am Rand der Polarisationsfilter. Die Punkte legen gemeinsam mit dem Mittelpunkt des Filters die Polarisationsebene fest. Der Polarisationsfilter, der der Lichtquelle am nächsten ist, heißt **Polarisator**, der andere **Analysator**.



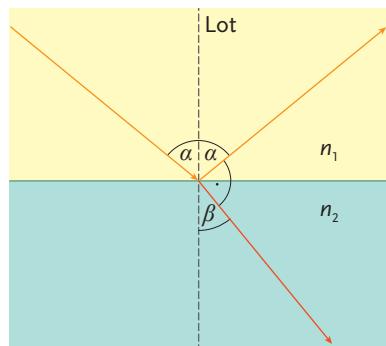
Zur Streuung von Licht siehe auch Kap. A, 9.



Zum brewsterschen Gesetz: Der reflektierte und vollständig linear polarisierte Strahl (rot) und der gebrochene teilweise polarisierte Strahl (blau) schließen einen rechten Winkel ein.



SIR DAVID BREWSTER,
1781 BIS 1868,
ENGLISCHER PHYSIKER



Zum brewsterschen Gesetz: Der reflektierte und der gebrochene Strahl schließen einen rechten Winkel ein

$\sin(90^\circ - \alpha) = \cos\alpha$.
90° - α ist der Komplementärwinkel (Ergänzungswinkel) von α.

Das brewstersche Gesetz

Wenn ein reflektierter Strahl mit dem gebrochenen Strahl einen Winkel von 90° einschließt, ist der reflektierte Strahl **vollständig linear polarisiert**.

Den zugehörigen Einfallwinkel – gemessen zum Lot – berechnet man als

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right).$$

Für den Sonderfall, dass eine Welle vom Vakuum ($n_1 = 1$) in ein homogenes Medium mit dem Brechungsindex n eintritt, vereinfacht sich das brewstersche Gesetz zu $\alpha = \arctan(n)$.

Ableitung des brewsterschen Gesetzes

Weil der reflektierte und der gebrochene Strahl einen Winkel von 90° einschließen müssen, können wir im Brechungsgesetz von Snellius

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}$$

β durch $90^\circ - \alpha$ ersetzen.

Weil der Sinus des Komplementärwinkels gleich dem Cosinus des Winkels ist, erhalten wir

$$\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = \frac{n_2}{n_1}$$

Das Verhältnis vom Sinus eines Winkels zum Cosinus des gleichen Winkels ist gleich dem Tangens dieses Winkels, sodass

$$\tan\alpha = \frac{n_2}{n_1}$$

Beispiel 2.3.22: Vollständige Polarisation beim Übergang von Luft in Wasser

Wir berechnen jenen Winkel, unter dem gelbes Licht mit einer Wellenlänge von rund 590 nm aus Luft ($n_1 = 1,0003$) in Wasser ($n_2 = 1,333$) übertreten muss, damit der reflektierte Strahl vollständig linear polarisiert ist.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \approx 53,11^\circ$$

Zur Probe berechnen wir den Brechungswinkel mit Snellius und bilden die Winkelsumme.

$$\beta = \arcsin\left(\frac{n_2}{n_1} \cdot \sin\left[\arctan\left(\frac{n_2}{n_1}\right)\right]\right) \approx 36,89^\circ \quad \alpha + \beta = 90,00^\circ$$

Der reflektierte und der gebrochene Strahl stehen senkrecht aufeinander, wenn der Einfallwinkel etwa 53,11° ist.

Wird Licht von einem durchsichtigen nicht metallischen Körper reflektiert, ist dieses meist zumindest teilweise polarisiert. Wenn diese Reflexe stören, etwa im Straßenverkehr oder beim Fotografieren (von Menschen mit Brillen, Bildern in Glasrahmen, von in Glasvitrinen geschützten wertvollen Gegenständen), können Polarisationsfilter (teilweise) Abhilfe schaffen. Polaroidbrillen sind eine Anwendung.

Zusammenfassend halten wir fest:

Polarisation von Wellen tritt bei Streuung, Reflexion und Brechung auf.

Einen Sonderfall der Polarisation stellt der Durchgang durch doppelbrechende Medien wie Kalkspat dar, weil die beiden Polarisationsrichtungen der gebrochenen Strahlen senkrecht aufeinander stehen.

Versuch 2.3.03: Doppelbrechung

Wir legen einen Kalkspatkristall auf einen Schriftzug.

Wir können den Schriftzug doppelt wahrnehmen, weil das auftreffende Licht im Kalkspat in zwei Strahlen aufgespalten wird: einen **ordentlichen** und einen **außerordentlichen**. Mithilfe von Analysatoren können wir die Polarisationssebenen der beiden Strahlen feststellen.

Doppelbrechung

Licht wird in doppelbrechenden Substanzen in zwei Teilstrahlen aufgespalten: einen **ordentlichen Strahl**, für den das Brechungsgesetz von Snellius gilt, und einen **außerordentlichen**. Ihre Schwingungsebenen sind senkrecht zueinander.

Beim **Nicolprisma**, benannt nach dem schottischen Physiker **William Nicol** (1768 bis 1851), wird einer der beiden Strahlen ausgeblendet. Dazu kittet man zwei Prismen so aneinander, dass der auszublendende Strahl an der Kittschicht total reflektiert wird.

Bei dichroitischen Stoffen wird einer der beiden gebrochenen Strahlen wesentlich stärker als der andere absorbiert. Dadurch bleibt ab einer bestimmten Schichtstärke des dichroitischen Stoffes nur mehr der andere linear polarisierte Strahl übrig. Ein dichroitischer Stoff ist Turmalin. Er ist auch der erste Kristall, bei dem der pyroelektrische Effekt – also Ladungstrennung durch Temperaturänderung – beobachtet wurde.

Weil isotrope Körper durch äußere Einflüsse – wie mechanische oder elektrische Spannung – doppelbrechend werden, findet die Polarisation zahlreiche technische Anwendungen.

Spannungsdoppelbrechung

Durch **mechanische Spannung** werden bestimmte sonst isotrope Körper **doppelbrechend**.

Versuch 2.3.04: Plexiglas zwischen Polarisator und Analysator – Spannungsoptik

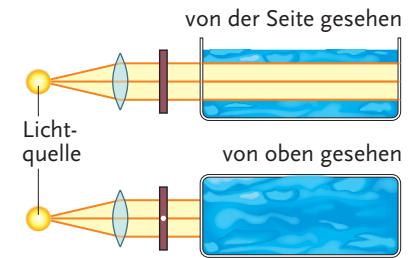
Wir geben ein Stück Plexiglas zwischen zwei gekreuzte Polarisationsfilter in den Strahlengang einer Lichtquelle.

Der zuerst dunkle Schirm wird bei mechanischer Belastung hell.

Durch die Doppelbrechung im belasteten Plexiglas entstehen zwei senkrecht zueinander linear polarisierte Strahlen, die nicht beide durch den Analysator zurückgehalten werden können.

Elektrische Doppelbrechung

Durch **elektrische Felder** werden bestimmte Flüssigkeiten – beispielsweise Nitrobenzol – **doppelbrechend**.



Polarisation durch Streuung:
Grund- und Aufriss sind dargestellt

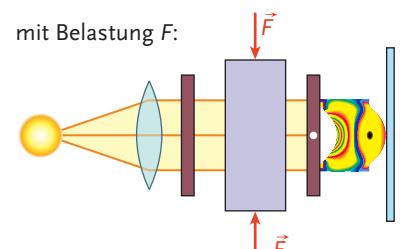
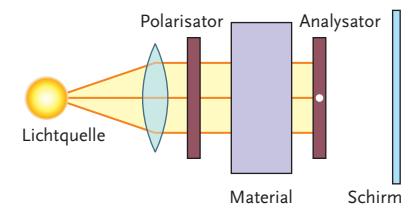


Bienen und andere Tiere können die Schwingungsebene von Licht feststellen, sodass sie sich am Himmelslicht auch orientieren können, ohne die Sonne direkt sehen zu können. Menschen haben diese Fähigkeit nicht.

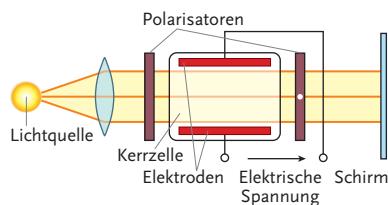


Schematischer Strahlengang
durch ein **Nicolprisma**. In diesem Fall wird der ordentliche Strahl an der Kittschicht total reflektiert, sodass der linear polarisierte außerordentliche Strahl für weitere Anwendungen zur Verfügung steht.

Dichroos: griechisch für zweifarbig.

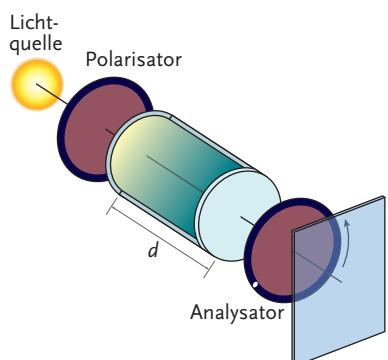


Spannungsdoppelbrechung: Ohne mechanische Belastung des Werkstücks bleibt der Schirm wegen der gekreuzten Stellung von Polarisator und Analysator dunkel

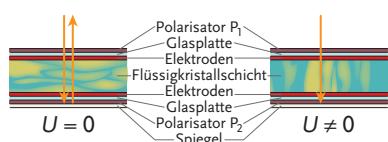


Die **Kerrzelle**, benannt nach dem schottischen Physiker John Kerr (1824 bis 1907). Bestimmte Flüssigkeiten werden in elektrischen Feldern doppelbrechend.

 Recherchieren Sie zum Thema Contergan.



Drehung der Polarisationsebene durch optisch aktive Stoffe



Lcd: Die beiden Polarisationsfilter sind gekreuzt. Links ist keine Spannung angelegt. Das einfallende Licht wird durch P_1 linear polarisiert. Die Flüssigkristallschicht dreht die Schwingungsrichtung um 90° ; P_2 lässt daher das Licht durch. Rechts ist eine Spannung angelegt. Die Drehung der Schwingungsebene entfällt, und P_2 lässt das Licht nicht mehr durch. Dieses Feld bleibt dunkel.

Rechts ist eine Spannung angelegt. Die Drehung der Schwingungsebene entfällt, und P_2 lässt das Licht nicht mehr durch. Dieses Feld bleibt dunkel.

Versuch 2.3.05: Die Kerrzelle

Wir geben einen Behälter mit Nitrobenzol zwischen zwei gekreuzte Polarisationsfilter in den Strahlengang einer Lichtquelle.

Der zuerst dunkle Schirm wird bei Anlegen einer elektrischen Spannung an die Elektroden und damit dem Aufbau eines elektrischen Feldes hell.

Mit einer **Kerrzelle** kann daher Licht sehr rasch (Anstiegszeit von ca. $0,01\mu\text{s}$) gesteuert werden, sodass sie bei schnellen Kameraverschlüssen Anwendung finden.

Optische Aktivität

Bestimmte Substanzen – beispielsweise Quarzplatten, Contergan (Arzneimittelskandal in den 1960er-Jahren) oder Zuckerrohrlösungen – drehen die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht. Diese Stoffe werden **optisch aktive Stoffe** genannt. Die Drehung ist wellenlängenabhängig: Man spricht von **Rotationsdispersion**.

Versuch 2.3.06: Rohrzucker

Wir geben zwei gekreuzte Polarisationsfilter in den Strahlengang einer Lichtquelle, sodass der nachfolgende Schirm dunkel bleibt. Positionieren wir einen Behälter mit Rohrzuckerlösung zwischen Polarisator und Analysator, wird der Schirm wieder hell.

Für die Drehung der Schwingungsebene sind nicht spiegelsymmetrische Strukturen verantwortlich. Beim Quarz ist es etwa der nicht spiegelsymmetrische Kristallgitteraufbau und bei den optisch aktiven Lösungen der nicht spiegelsymmetrische Molekülaufbau.

Lcd – Flüssigkristallanzeigen

Ein **Lcd** (Liquid crystal display) nutzt die Änderung der optischen Aktivität durch elektrische Felder.



Ziele erreicht? – „Polarisation“

2.3.36 Wodurch wird Licht **polarisiert**?

2.3.37 Wozu dient ein **Nicolprisma** und wie funktioniert es?

2.3.38 Was sind **dichroitische Stoffe**?

2.3.39 Wodurch kann ein Körper bzw. eine Substanz **doppelbrechend** gemacht werden?

2.3.40 Geben Sie das **brewstersche Gesetz** an.

2.3.41 Unter welchem **Winkel** muss Licht mit einer Wellenlänge von 500 nm auf ein Medium ($n_2 = 1,4$) aus Luft kommend auftreffen, damit der reflektierte Strahl vollständig linear polarisiert ist? Fertigen Sie eine beschriftete Skizze an.

2.3.42 Der **Brewsterwinkel**, jener Einfallsinkel zum Lot, bei dem der reflektierte Strahl vollständig linear polarisiert ist, betrage 60° . Was können Sie berechnen und welcher numerische Wert ergibt sich?

2.3.43 Licht von 700 nm Wellenlänge wird beim Übergang von einem homogenen Medium mit $n_1 = 1,2$ in ein anderes homogenes Medium teilweise reflektiert und teilweise gebrochen. Wie groß ist der **Brechungsindex** des zweiten Mediums, wenn der reflektierte Strahl bei einem Einfallwinkel von 50° vollständig linear polarisiert ist? Skizzieren Sie den Strahlengang zu Ihren Berechnungen.

2.3.44 Leiten Sie das **brewstersche Gesetz** ab und fertigen Sie den zugehörigen Strahlengang an.

Lcds verbrauchen sehr wenig elektrische Energie, weil sie eine passive Anzeige verwenden. Sie emittieren also selbst kein Licht, sondern nützen lediglich Kontraständerungen für reflektiertes Licht. Daher können Lcds im Dunkeln nicht abgelesen werden.

2.4 Akustik

Die akustische Erfassung der Umwelt ist nach dem Sehen die wichtigste Sinneswahrnehmung des Menschen. Personen, die Behinderungen des Sehsinnes haben, sind sogar in der Lage, dieses Defizit durch eine besondere Schärfung der akustischen Wahrnehmung zum Teil zu kompensieren. Die Informationsübertragung erfolgt bei beiden Wahrnehmungskanälen, Sehen und Hören, über die Ausbreitung von Wellen, nämlich Licht- bzw. Schallwellen.



Fledermäuse erfassen im Dunkeln ihre Umwelt fast ausschließlich durch akustische Wahrnehmung von ausgestoßenen und reflektierten Ultraschalllauten

2.4.1 Schallfeld und Schallausbreitung

Schall ist eine Druckwelle in Materie. Als Schallfeld wird der Bereich in elastischen Medien bezeichnet, in dem sich Schallwellen ausbreiten. Ohne Medium, also im Vakuum, ist keine Schallausbreitung möglich.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- Schall als eine **Druckwelle** angeben, die Materie zur Ausbreitung benötigt;
- die **Schallgeschwindigkeit** als eine Materieeigenschaft in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen erklären.



Transversalwellen auf einer Flüssigkeitsoberfläche

Versuch 2.4.01: Schallausbreitung

Unter eine Evakuierungsglocke wird ein läutender Wecker oder eine andere kompakte Geräuschquelle platziert. Bei Absaugung der Luft wird mit abnehmendem Luftdruck in der Glocke die Wahrnehmung des Weckergeräusches immer leiser.

Materie hat in **allen Aggregatzuständen** mehr oder weniger Volumselastizität. Materie ist **kompressibel**. Daher können in allen Aggregatzuständen **Longitudinalwellen** (Dichtewellen) auftreten. **Formelastizität** ist dagegen nur bei **Festkörpern** gegeben. Daher können Transversalwellen (Wellen der Verformung) nur in Festkörpern auftreten. Für diese Formelastizität ist eine anziehende Wechselwirkung zwischen den Atomen oder Molekülen eines Stoffes nötig. Eine **Ausnahme** von der obigen Regel stellt eine **Flüssigkeitsoberfläche** dar. Dort liefert die Oberflächenspannung die anziehende Wechselwirkung zwischen den Molekülen. Auf einer Flüssigkeitsoberfläche sind also auch **Transversalwellen** möglich.



Abbildung zu Versuch 2.4.01

Bei den gekoppelten Schwingungen haben wir gesehen, dass die Geschwindigkeit des Energietransportes von der Kopplungsstärke zwischen den Oszillatoren abhängt. Je stärker sie war, umso schneller erfolgte die Weitergabe der Schwingungsenergie. Aus diesen Überlegungen ergibt sich:



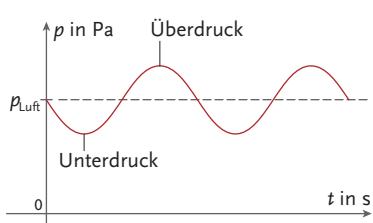
Geschwindigkeit der Wellenausbreitung siehe Kap. D, 2.2.

| Medium | $v_{\text{longitudinal}}$ in m/s | $v_{\text{transversal}}$ in m/s |
|--------|-------------------------------------|------------------------------------|
| Luft | 343 | --- |
| Wasser | 1 484 | --- |
| Blei | 1 200 | 360 |
| Kupfer | 4 700 | 2 260 |
| Stahl | 5 920 | 3 255 |

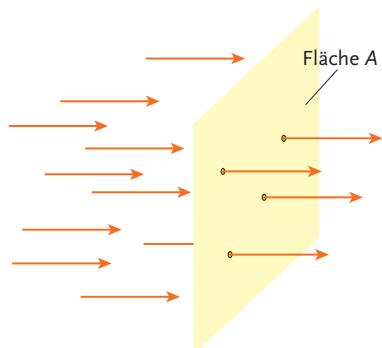
Schallgeschwindigkeiten in verschiedenen Medien unter Normbedingungen (20 °C)



Im Alltag sind wir immer irgendwelchen Schallquellen ausgesetzt. Ein schallleerer Raum existiert nirgends.



Druckverlauf einer Schallwelle



Schema: Schallintensität
(Energie pro Zeit und Fläche)

Die **Schallgeschwindigkeit** ist eine Größe, die von den mechanischen Eigenschaften der Materie und somit auch von den Umgebungsbedingungen (Druck, Temperatur) abhängt.



Ziele erreicht? – „Schallfeld und Schallausbreitung“

- 2.4.01** Geben Sie an, welche Form von Schallwellen in welchem Aggregatzustand von Materie auftreten kann. Begründen Sie dies auch.
- 2.4.02** Erläutern Sie, wovon die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall abhängt.

2.4.2 Schallfeldgrößen

Die physikalischen Größen zur Beschreibung des Schallfeldes werden als **Schallfeldgrößen** bezeichnet. Die gängigsten sind der **Schalldruck**, der Schalldruckpegel und die **Schallintensität**.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Schalldruck** und **Schallintensität** als physikalische Größen zur Beschreibung des Schallfeldes nennen und deren Einheiten angeben;
- die Mechanismen der **Abschwächung** von Schall erklären;
- die Abschwächungsmechanismen zur Berechnung des **Intensitätsverlaufes** bei Schallausbreitung anwenden.

Schalldruck

Schallwellen in der Luft sind Schwankungen des Luftdrucks um den aktuell herrschenden statischen Luftdruck p_{Luft} . Diese Schwankung nennt man den Schallwechseldruck. Den Mittelwert (Effektivwert) dieser Druckschwankung bezeichnen wir in der Folge einfach als den **Schalldruck p** .

Schalldruck = Normalkraft des Schallwechseldrucks pro Fläche

$$p = \frac{F}{A} \quad [p] = \left[\frac{F}{A} \right] = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pascal (1 Pa)}$$

Der insgesamt wirkende Druck der Luft ist eine Überlagerung des statischen Luftdrucks und des Schallwechseldrucks (kurz Schalldruck).

Schallintensität

Die **Schallintensität I** beschreibt den Energiefluss der Schallwelle, der in einer bestimmten Zeit durch eine gegebene Fläche hindurchgeht.

Schallintensität = mittlere Energie pro Zeit und Fläche

$$I = \frac{E}{t \cdot A} \quad [I] = \left[\frac{E}{t \cdot A} \right] = 1 \frac{\text{J}}{\text{s} \cdot \text{m}^2} = 1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Die Ausbreitungsrichtung des Schalls ist in Skizzen mittels des Wellenvektors \vec{k} oder auch mithilfe der Wellenflächen darstellbar.

Schalldruck und Schallintensität hängen über die **Schallkennimpedanz Z** (oder den Schallwellenwiderstand) des Mediums zusammen.

Es gilt für die **Schallkennimpedanz**:

$$p^2 = Z \cdot I \text{ und somit } Z = \frac{p^2}{I}; \quad [Z] = \left[\frac{p^2}{I} \right] = 1 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$$

Sie beschreibt die energetische Durchlässigkeit eines Materials für Schall. Die Bezeichnung leitet sich aus einer Analogie zum ohmschen Gesetz her, wobei das Quadrat des Schalldrucks der antreibenden Spannung gleichgesetzt wird.

Abnahme der Schallintensität durch kugelförmige Abstrahlung

Eine Schallquelle mit einer Schallleistung P verteilt diese Leistung bei Aussendung einer Kugelwelle über eine Kugeloberfläche von $A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$.

Für die **Schallintensität I** einer derartigen Schallquelle mit Leistung P in einer Entfernung r von der Schallquelle erhalten wir: $I(r) = \frac{P}{4\pi \cdot r^2}$

Die Schallintensität sinkt mit dem Quadrat der Entfernung zur Schallquelle. Ausreichende Distanz ist somit der beste Lärmschutz.

Beispiel 2.4.01: Schallintensität eines Lautsprechers

Ein Lautsprecher mit einer effektiven Schallleistung von 80 W sendet den Schall ideal kugelförmig aus. Welche Schallintensität tritt in einer Distanz von 20 m vom Lautsprecher auf?

$$I(r = 20 \text{ m}) = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{80 \text{ W}}{4\pi \cdot 20^2 \text{ m}^2} = 0,0159 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

Abnahme der Schallintensität durch Absorption von Energie im Medium

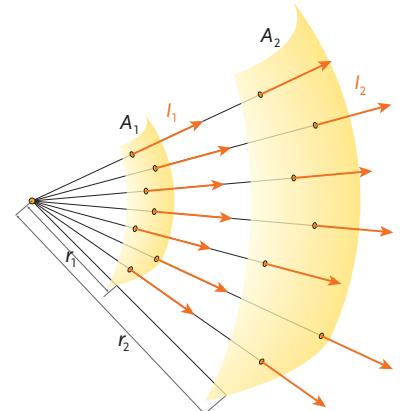
Nicht nur die Geometrie der Schallabstrahlung führt zu einer Abschwächung der Intensität. Auch die Absorption von Energie der Schallwelle im Ausbreitungsmedium führt zu einer Dämpfung. Wir nehmen für unsere weiteren Überlegungen eine ebene Schallwelle an. Auf gleichen Streckenlängen wird dabei immer der gleiche nur vom Ausbreitungsmedium abhängige Prozentsatz der aktuellen Anfangsintensität vom Medium aufgenommen. Mathematisch wird dies von einer Exponentialfunktion beschrieben.

Die Intensität einer Schallwelle mit **Anfangsintensität I_0** beträgt nach einer Distanz x : $I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot x}$

Dabei ist α der **Dämpfungskoeffizient** des Ausbreitungsmediums. $[\alpha] = \frac{1}{\text{m}}$

Der Dämpfungskoeffizient ist nicht nur vom Material, sondern auch von der Frequenz abhängig. Bei steigender Frequenz nimmt die Energieabsorption im Medium zu.

Die Schallkennimpedanz für **Luft** unter Normbedingungen (20°C) beträgt $416,6 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$. Für Wasser beträgt der Wert $1\,490\,000 \frac{\text{kg}}{\text{s} \cdot \text{m}^2}$.



Intensitätsabnahme mit steigendem Abstand beim kugelförmigen Abstrahlen einer Schallwelle



Lautsprecher wandeln elektrische Schwingungen mit einer in einem Magnetfeld befindlichen Spule, an der eine Membran befestigt ist, in Druckschwankungen der Luft um

| Medium | Fre-quenz | Dämpfungs-koeffizient |
|--------|-----------|-------------------------------------|
| Luft | 63 Hz | $0,27 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ |
| Luft | 1 kHz | $4,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ |
| Luft | 8 kHz | $86,3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ |
| Wasser | 50 Hz | $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$ |
| Wasser | 1 MHz | $5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ |

Tabelle von Dämpfungskoeffizienten



Wale kommunizieren mit tiefen Tönen, dem Walgesang, über erstaunliche Distanzen von Hunderten Kilometern. Tiefe Töne werden im Wasser nicht so stark absorbiert.

Das **menschliche Gehör** nimmt Frequenzen in einem Bereich von ca. **20 Hz bis 20 kHz** wahr. Die obere Grenze ist deutlich altersabhängig und verschiebt sich mit zunehmendem Alter zu tieferen Frequenzen.

Beispiel 2.4.02: Abnahme der Schallintensität in Luft

Welcher Prozentsatz der Anfangsintensität von Schall mit einer Frequenz von 63 Hz bzw. 8 kHz ist nach einer Laufstrecke von 1 000 m in Luft noch vorhanden? Eine Ausbreitung als ebene Welle wird vorausgesetzt.

$$\frac{I(1\ 000\text{ m})}{I_0} = e^{-0,27 \cdot 10^{-4}\text{ m}^{-1} \cdot 1\ 000\text{ m}} = 0,973 \text{ bei } 63\text{ Hz}$$

$$\frac{I(1\ 000\text{ m})}{I_0} = e^{-86,3 \cdot 10^{-4}\text{ m}^{-1} \cdot 1\ 000\text{ m}} = 0,000\ 179 \text{ bei } 8\text{ kHz}$$

Die niedrige Frequenz weist also noch immer 97,3 % der Anfangsintensität auf, während der Schall der hohen Frequenz auf dieser Laufstrecke praktisch zur Gänze absorbiert wurde.

Im allgemeinen Fall treten beide Arten der Abschwächung von Schallintensität auf (Abnahme durch kugelförmige Abstrahlung bzw. durch Absorption). Es sind dann die **beiden Effekte multiplikativ** zu kombinieren.



Ziele erreicht? – „Schallfeldgröße“

- 2.4.03** Ein Lautsprecher hat eine Schalleistung von 10 W und strahlt diese kugelförmig ab. Berechnen Sie die Schallintensität und den Schalldruck in einer Entfernung von 30 Metern.
- 2.4.04** Auf welcher Distanz wird ein Ton der Frequenz 50 Hz bei linearer Ausbreitung im Wasser auf die Hälfte seiner Anfangsintensität abgeschwächt?
- 2.4.05** Wie müssen Sie bei Vernachlässigung der Dämpfung Ihren Abstand zu einer Schallquelle, die kugelförmig abstrahlt, verändern, um die wahrgenommene Schallintensität auf 10 % des anfänglichen Wertes zu verkleinern?
- 2.4.06** Auf welchen Prozentsatz fällt die Schallintensität bei 50 Hz in Wasser nach einer Laufstrecke von 250 m ab, wenn man sowohl kugelförmige Abstrahlung als auch Absorption berücksichtigt?
- 2.4.07** Nach welcher Gesetzmäßigkeit fällt Schallintensität bei einer halbkugelförmigen Abstrahlung durch Verwendung eines Reflektors mit der Entfernung ab?

2.4.3 Schallintensitätspegel

Die Erfahrung, dass das Lautstärkeempfinden in gewissem Ausmaß subjektiv ist, kennt wohl jeder von uns. Und wenn wir nichts hören, heißt das nicht, dass keine Schallwellen vorhanden sind. Sie könnten auch zu leise sein.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- angeben, dass sich der hörbare Schall über **mehrere Zehnerpotenzen** von Intensität bzw. Druck erstreckt und der Lautstärkeindruck einer logarithmischen Skala entspricht;
- den **Schallintensitätspegel** als eine logarithmische Skala für einen Lautstärkevergleich nennen und Pegelwerte errechnen;
- den **Schallintensitätspegel** von mehreren inkohärenten Schallquellen **ermitteln** und **Lautstärkevergleiche** anstellen.

Der **Schallintensitätspegel L** ist definiert als

$$L = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Dabei ist I_0 die **Hörschwelle** ($I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ bei 1 kHz).

Mit dem vorher erwähnten Zusammenhang von Schallintensität und Schalldruck ist dies gleichwertig zu

$$L = 20 \cdot \lg\left(\frac{p}{p_0}\right)$$

p_0 ist dabei der **Schalldruck bei der Hörschwelle**.

$[L] = 1 \text{ (dB)}$ (Dezibel)

Das menschliche Hörvermögen erstreckt sich über zwölf Zehnerpotenzen der Intensität bzw. sechs Zehnerpotenzen des Schalldruckes (siehe Grafik in der Randspalte). Derartige Größenunterschiede sind am besten mit einer logarithmischen Skala darstellbar. Diese entspricht auch der Wahrnehmung von Lautstärke. So wird eine Verdopplung der Intensität oder des Druckes bei Weitem nicht als Verdopplung der Lautstärke empfunden. Unsere Lautstärkewahrnehmung ist daher größtenteils „logarithmisch“. Das Bel und somit das Dezibel ist eine nach Alexander **Graham Bell** benannte Hilfsmaßeinheit für einen **logarithmischen Vergleich** zweier physikalischer Größen.

Beispiel 2.4.03: Erhöhung des Schallintensitätspegels

Um wie viel Dezibel erhöht sich der Schallintensitätspegel, wenn die Schallintensität verdoppelt wird? Mit den Rechenregeln für Logarithmen erhalten wir:

$$L_2 = 10 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot I}{I_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \cdot \lg(2) = L_1 + 3,01 \text{ dB} = L_1 + \Delta L$$

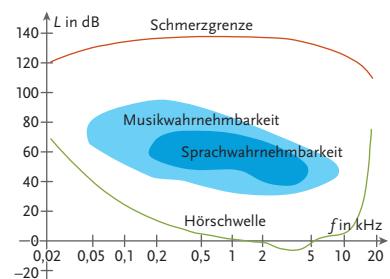
Eine **Verdopplung** der Schallintensität bedeutet also eine Erhöhung des Pegels um etwa **3 dB**.

Schallquellen, deren Schwingungen keine feste Frequenz- und Phasenbeziehung zueinander haben, bezeichnet man als **inkohärent**. Bei inkohärenten Schallquellen ergibt sich die Gesamtintensität aus der **Addition der Einzelintensitäten**. Bei kohärenten Schallquellen tritt Interferenz auf.

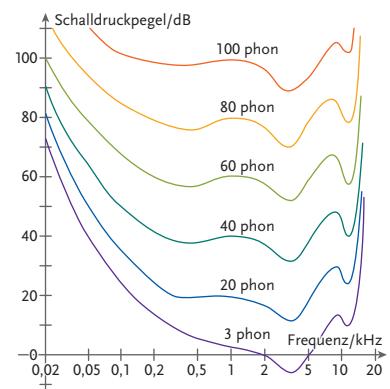
| | Schalldruck in N/m ² | Schallintensität in W/m ² |
|-----------------|---------------------------------|--------------------------------------|
| Hörschwelle | $2 \cdot 10^{-5}$ | 10^{-12} |
| Schmerzschwelle | 20 | 1 |

Druck- bzw. Intensitätswerte für Hörschwelle und Schmerzschwelle bei 1 000 Hz

Die **akustische Wahrnehmung** ist nicht nur **frequenz-**, sondern auch **intensitätsabhängig**. In der Literatur wird für die Schmerzschwelle ein Schallpegel von 120 bis 140 dB angegeben. Der obige Wert von Druck und Intensität entspricht 140 dB.



Der Wahrnehmungsbereich des menschlichen Ohres wird auch als **Hörfäche** bezeichnet

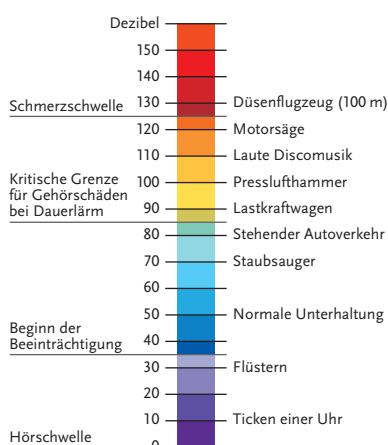


Kurven gleicher Lautstärkeempfindung

Das **Dezibel** ist eine **technische Maßeinheit**. Geräusche gleicher Intensität werden aber bei unterschiedlichen Frequenzen nicht als gleich laut empfunden. Die Stärke der **subjektiven Wahrnehmung** wird mit der **Phonskala** beschrieben. Bei 1 kHz stimmen die beiden Skalen überein.



Interferenz siehe Kap. D, 2.2.



Vergleichswerte für verschiedene Schalldruckpegel (in dBA). Die A-Bewertung der Dezibelskala berücksichtigt das unterschiedliche Lautstärkeempfinden des menschlichen Gehörs bei verschiedenen Frequenzen.

Beispiel 2.4.04: Schallpegel mehrerer gleich lauter Schallquellen

Eine Bandsäge in einer Tischlerei erreicht im Betrieb einen Schallpegel von 92 dB. Wie hoch wäre der Schallpegel, wenn vier weitere Sägen in gleichem Abstand in Betrieb wären?

$$L_5 = 10 \cdot \lg\left(\frac{5 \cdot I}{I_0}\right) = 10 \cdot \lg\left(\frac{I}{I_0}\right) + 10 \cdot \lg(5) = 92 \text{ dB} + 6,99 \text{ dB} = 98,99 \text{ dB} \approx 99 \text{ dB}$$



Ziele erreicht? – „Schallintensitätspegel“

- 2.4.08 Ein Lautsprecher erzeugt einen Schalldruck von $p = 420 \cdot 10^{-3} \text{ N/m}^2$. Wie groß ist der Schallpegel?
- 2.4.09 Welche Schallintensität und welcher Schalldruck herrschen bei einem Schallpegel von 72 dB?
- 2.4.10 Vier typengleiche Fräsmaschinen erzeugen einen Schallpegel von 97 dB. Welchen Schallpegel würde eine Maschine erzeugen?
- 2.4.11 Wie viele Kreissägen mit einem Einzelpegel von 95 dB müssten laufen, um die Schmerzschwelle von 120 dB zu erreichen?
- 2.4.12 Um welchen Wert erhöht sich der Schallpegel bei einer Zunahme der Schallintensität um 85 %? Könnte man die Pegelerhöhung ebenfalls prozentuell angeben?
- 2.4.13 Wie hoch ist der Schallpegel eines Motors in 10 m Entfernung, wenn er in 5 m Entfernung 75 dB beträgt? Eine kugelförmige Abstrahlung des Schalls und eine Vernachlässigung von Absorption dürfen vorausgesetzt werden.

2.4.4 Schallquellen

Unter Schallquellen versteht man Körper, die mechanische Schwingungen ausführen und dabei Druckschwankungen in der umgebenden Luft verursachen. Dies kann eine schwingende Saite einer Gitarre sein oder eine schwingende Luftsäule einer Orgelpfeife.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **Funktionsprinzipien** von Schallquellen nennen;
- die **Eigenfrequenzen** verschiedener Schallquellen **errechnen**;
- die **bestimmenden Parameter** für die Eigenfrequenzen von Schallquellen **angeben**.

Schallquellen stellen eine **Anwendung von stehenden Wellen** dar. Diese sind ein Sonderfall der Interferenz, bei der Wellen gleicher Frequenz und Amplitude gegeneinanderlaufen. Am einfachsten und häufigsten geschieht dies bei Reflexion einer Welle.



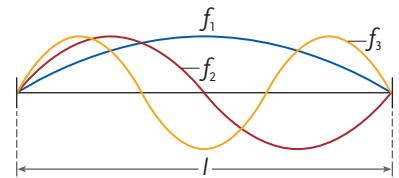
Die Orgel ist das Instrument, das den größten Tonumfang aufweist (nicht selten den gesamten Hörbereich)



Siehe Kap. D, 2.3 Geometrische- und Wellenoptik: Reflexion am losen und am festen Ende.

Schwingende Saite

Eine schwingende Saite ist an beiden Enden („festes Ende“) über eine Länge l eingespannt. Am festen Ende ist die Amplitude einer stehenden Welle null, sodass nur bestimmte Schwingungen der Saite möglich sind. Diese werden auch als „Eigen schwingungen“ bezeichnet.



Schwingende Saite und ihre drei ersten Eigenschwingungen

Auf der Länge l der Saite sind also nur **Vielfache von halben Wellenlängen** möglich. Mit dem Zählindex $n = 1, 2, 3 \dots$ erhalten wir $n \cdot \frac{\lambda_n}{2} = l$ oder $\lambda_n = \frac{2 \cdot l}{n}$

Daraus erhalten wir für die **Eigenfrequenzen f_n** :

$$f_n = \frac{c}{\lambda_n} = \frac{n \cdot c}{2l} \text{ mit } n = 1, 2, 3 \dots \quad (n=1: \text{Grundton}, n=2: 1. \text{ Oberton usw.})$$

Diese Eigenfrequenzen schwingen bei Anzupfen der Saite alle gleichzeitig, wobei gemessen an der Amplitude der Grundton dominiert.

Die Saiten eines Instrumentes lassen sich durch die Änderung der **Spannung** stimmen. Dies ändert nämlich die **Ausbreitungsgeschwindigkeit c** der Welle.

Wenn man die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Zugspannung und der Dichte der Saite beschreibt, ergibt sich für die Eigenfrequenzen:

$$f_n = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}} = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{A \cdot \rho}} = \frac{n}{2l} \cdot \sqrt{\frac{F}{m^*}}$$

Dabei ist **A** die Querschnittsfläche und **m^*** die Masse pro Länge der Saite.



Eine Gitarre wird durch Veränderung der Spannung der einzelnen Saiten gestimmt

Geschwindigkeit der Wellenausbreitung siehe Kap. D, 2.2.

Einseitig offene Luftsäule

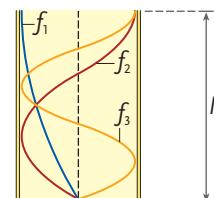
Die Situation einer einseitig offenen Luftsäule ist z. B. bei einer Panflöte oder „gedeckten“ Orgelpfeifen gegeben. Dabei kommt es am festen Ende der Luftsäule zu einem Schwingungsknoten und am losen Ende zu einem Schwingungsbauch.

Auf der Länge l der Luftsäule sind also nur **ungerade Vielfache des Viertels einer Wellenlänge** möglich. Mit dem Zählindex $n = 1, 2, 3 \dots$ erhalten wir

$$(2n-1) \cdot \frac{\lambda_n}{4} = l \text{ oder } \lambda_n = \frac{4 \cdot l}{2n-1}$$

Daraus erhalten wir für die **Eigenfrequenzen f_n** :

$$f_n = \frac{(2n-1) \cdot c}{4l} \text{ mit } n = 1, 2, 3 \dots \quad (n=1: \text{Grundton}, n=2: 1. \text{ Oberton usw.})$$



Einseitig offene Luftsäule und ihre drei ersten Eigenschwingungen

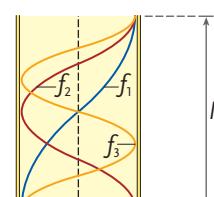
Beiderseits offene Luftsäule

Eine beiderseits offene Luftsäule ist z. B. bei „ungedeckten“ Orgelpfeifen gegeben. An den beiden losen Enden kann es nur Schwingungsbäuche geben.

Auf der Länge l der Luftsäule sind also nur **Vielfache einer halben Wellenlänge** möglich. Mit dem Zählindex $n = 1, 2, 3 \dots$ erhalten wir $n \cdot \frac{\lambda_n}{2} = l$ oder $\lambda_n = \frac{2 \cdot l}{n}$

Daraus erhalten wir für die **Eigenfrequenzen f_n** :

$$f_n = \frac{n \cdot c}{2l} \text{ mit } n = 1, 2, 3 \dots \quad (n=1: \text{Grundton}, n=2: 1. \text{ Oberton usw.})$$



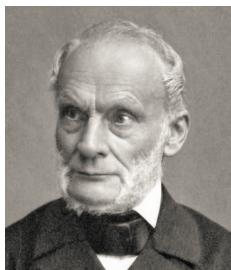
Beiderseits offene Luftsäule und ihre drei ersten Eigenschwingungen

Nach einem Vergleich erkennen wir, dass dies formal der gespannten Saite entspricht.

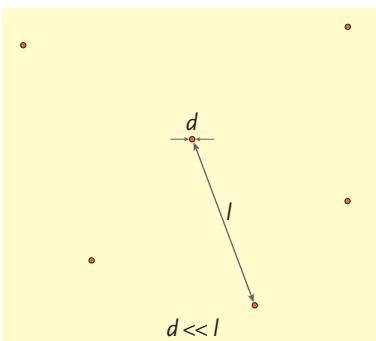


Ziele erreicht? – „Schallquellen“

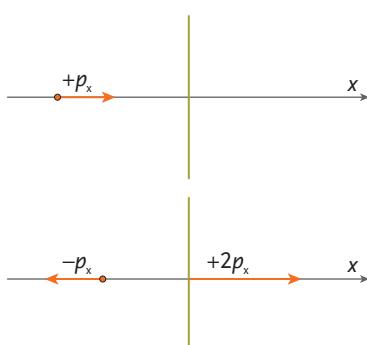
- 2.4.14** Berechnen Sie die Frequenz der dritten Oberschwingung einer einseitig offenen Luftsäule mit einer Länge von 30 cm.
- 2.4.15** Um wie viel Prozent ändert sich die Frequenz der Grundschwingung einer Saite, wenn man ihre Länge um 15 % erhöht und ihre Spannung um 10 % verringert?
- 2.4.16** In welchem Verhältnis stehen die Grundschwingungen einer einseitig und einer gleich langen beiderseits offenen Luftsäule?
- 2.4.17** Bei welcher Schallquelle können die Oktaven des Grundtones nicht als Obertöne mitschwingen? Unter einer Oktav versteht man ein Tonintervall, das einer Frequenzverdopplung entspricht.



RUDOLF CLAUSIUS, 1822 BIS 1888,
DEUTSCHER PHYSIKER



Beim idealen Gas sind die Abmessungen der Teilchen klein im Vergleich zu den Entfernungen zwischen den Teilchen



Impulsübertrag eines Teilchens beim elastischen Stoß gegen eine Gefäßwand

3 Thermodynamik

3.1 Kinetische Gastheorie

Die kinetische Gastheorie erklärt das Verhalten von Gasen durch die **Bewegungen der Atome und Moleküle**, aus denen das Gas besteht. Sie bietet eine Erklärung für die Gasgesetze und ein mikroskopisches Modell für die Begriffe Wärme und Temperatur. Bereits **Roger Bacon** vermutete, dass Wärme eine Form der Bewegung sei. Aber erst durch die Arbeiten von **Clausius, Maxwell** und **Boltzmann** wurde die kinetische Gastheorie ab etwa 1850 zu einer tragfähigen physikalischen Theorie.

3.1.1 Das ideale Gas

Das **ideale Gas** ist ein stark vereinfachtes Modell eines **realen Gases**. Dennoch lässt sich damit das thermodynamische Verhalten von Gasen gut beschreiben und berechnen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Eigenschaften eines idealen Gases** nennen;
- den **Gasdruck eines idealen Gases** aus den mikroskopischen Eigenschaften des Gases herleiten.

In Gasen sind die Atome oder Moleküle nicht aneinandergebunden und weisen einen großen Abstand voneinander auf.

Die folgenden **Eigenschaften** kennzeichnen ein **ideales Gas**:

- Seine Teilchen sind klein im Vergleich zu ihrem mittlerem Abstand voneinander;
- eine Wechselwirkung zwischen den Teilchen erfolgt nur durch elastische Stöße;
- die Teilchen wechselwirken mit begrenzenden Gefäßwänden nur über elastische Stöße (dies verursacht den Gasdruck).

Modell des Gasdrucks eines idealen Gases

Wir betrachten eine Anzahl von N Teilchen der Masse m mit jeweils einer Geschwindigkeit v eingesperrt in einem Volumen V . Die Teilchendichte beträgt also N/V . Der mittlere Impulsübertrag Δp in einer Zeit Δt auf eine Wandfläche der Größe A durch elastische Stoße ergibt sich aus

$$|\Delta \vec{p}| = \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{N}{V} \cdot A \cdot v \cdot \Delta t \right) \cdot 2mv = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot mv^2 \cdot A \cdot \Delta t$$

Dabei beschreibt der Term in der Klammer die Anzahl der Teilchen, die überhaupt mit der Wandfläche wechselwirken können, weil sie in der Lage sind, die Wand in einer Zeit Δt zu erreichen. Bei Gleichverteilung der Geschwindigkeitsrichtungen hat im Mittel nur ein Sechstel dieser Teilchen auch eine Geschwindigkeitsrichtung normal zur Fläche. Der Ausdruck hinter der Klammer ist der Impulsübertrag pro elastischen Stoß eines Teilchens auf die Fläche.

Die Kraftwirkung der Teilchen auf die Wand ist der Impulsübertrag pro Zeit

$$|\vec{F}| = \frac{|\Delta \vec{p}|}{\Delta t} = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot mv^2 \cdot A. \text{ Da der Druck als Kraft pro Fläche definiert ist, erhält man daraus } p = \frac{|\vec{F}|}{A} = \frac{1}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot mv^2.$$

Der Druck eines idealen Gases hängt also von seiner Teilchendichte sowie von der mittleren kinetischen Energie seiner Teilchen ab.

$$p = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \frac{m\bar{v}^2}{2} = \frac{2}{3} \cdot \frac{N}{V} \cdot \overline{E_{kin}}$$

$$\text{Zur Wiederholung: } [p] = 1 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Pascal (Pa)}$$

Eine in der Technik häufig verwendete Einheit für den Druck ist das Bar:

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 1000 \text{ hPa}$$

Beispiel 3.1.01: Mittlere Geschwindigkeit von Gasteilchen

Wie groß ist die mittlere Geschwindigkeit eines Neonatoms ($m = 3,3498 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$), wenn $6,022 \cdot 10^{23}$ Moleküle in einem Volumen von $22,4 \text{ dm}^3$ einen Druck von $1013,25 \text{ hPa}$ ausüben? (Anmerkung: diese Werte entsprechen einem idealen Gas bei Normluftdruck und 0°C .)

Mit $\overline{E_{kin}} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p \cdot V}{N} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \bar{v}^2$ folgt $\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot p \cdot V}{N \cdot m}}$ und daraus erhält man

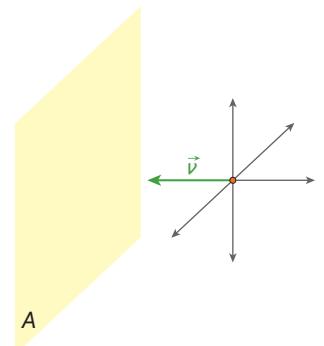
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,01325 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 2,24 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3}{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 3,3498 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}} = 580,98 \text{ m/s}$$

In NAWI I/II, Kap. 5.2 wurde dargelegt, dass die Temperatur ein Maß für die mittlere Bewegungsenergie der Teilchen ist. Daraus folgt, dass der Druck eines idealen Gases von Teilchenanzahl, Volumen und Temperatur abhängt.



Ziele erreicht? – „Das ideale Gas“

- 3.1.01** Was versteht man unter einem idealen Gas? Nennen Sie die entsprechenden Annahmen.
- 3.1.02** Stellen Sie die Gleichung der Impulserhaltung bei einem elastischen Stoß eines Teilchens gegen eine Wand auf. Ermitteln Sie daraus den Impulsübertrag auf die Wand.
- 3.1.03** Unter welchen Bedingungen wird die hergeleitete Formel für den Druck eines idealen Gases nicht mehr gültig sein und warum?



Nur eine der sechs Geschwindigkeitsrichtungen führt zu einem Stoß an die Wandfläche



Manometer mit einer Messskala in Bar

1 u (Unit) = $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Atomare Masseneinheit
≈ Masse eines Nukleons

Zu Beispiel 3.1.01:
Im Periodensystem der Elemente ersieht man

| |
|--------------|
| Ne 10 |
| 20.1797 |
| – 0 |
| Neon |

Daraus geht hervor, dass Neon die Ordnungszahl 10 hat, also 10 Protonen besitzt. Neon hat eine relative Atommasse von 20,1797 u. Das am häufigsten vorkommende Isotop hat eine Masse von 20 u, besteht also aus 10 Protonen und 10 Neutronen. Aus den Massen der in unterschiedlicher Häufigkeit vorkommenden Isotope ergibt sich die oben angegebene relative Atommasse.

3.1.2 Zustandsgleichung eines idealen Gases

Eine Herleitung der Zustandsgleichung des idealen Gases ist direkt aus der kinetischen Gastheorie oder aus den empirisch gefundenen **Gasgesetzen von Amontons und Gay-Lussac**, formuliert im Jahre 1802, möglich.



Die Boltzmannkonstante k ist nicht mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ aus NAWI I/II zu verwechseln!

Die **Boltzmannkonstante** wurde von Max Planck in der statistischen Mechanik eingeführt und ist nach dem österreichischen Physiker **Ludwig Boltzmann** benannt.



AMEDEO AVOGADRO,
1776 BIS 1856, ITALIENISCHER
PHYSIKER UND CHEMIKER



Die Anzahl der Teilchen in einem Mol wird auch als **Avogadrokonstante N_A** bezeichnet.

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

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts wurde hauptsächlich Kohlegas zu Beleuchtungszwecken in Großstädten verwendet.



Die vier Gasometer in Wien-Simmering wurden 1896 als Teleskopgasbehälter mit je 90 000 m³ für Kohlegas zur Versorgung der Straßenbeleuchtung errichtet



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Zustandsgleichung eines idealen Gases angeben;
- das **Gesetz von Avogadro** nennen und begründen;
- aus der Formel für den Druck eines idealen Gases und der mittleren Bewegungsenergie eines Teilchens die **Zustandsgleichung** herleiten.

Aus der statistischen Mechanik erhält man für die mittlere freie Bewegungsenergie eines Teilchens pro Freiheitsgrad $\frac{1}{2} \cdot k \cdot T$. Dabei ist k die Boltzmannkonstante und T die absolute Temperatur (in Kelvin).

$$\text{Boltzmannkonstante: } k = 1,380\,648\,8 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Ein Teilchen eines idealen Gases hat für seine Bewegung die drei Achsenrichtungen einer Translation zur Verfügung und hat somit drei Freiheitsgrade. Ein Teilchen eines idealen Gases weist daher eine mittlere kinetische Energie von $\overline{E_{kin}} = \frac{3}{2} k \cdot T$ auf. Fügt man dies in die Gleichung für den Druck eines idealen Gases ein, erhält man $p = \frac{N}{V} \cdot k \cdot T$.

Durch Umformung ergibt sich daraus die **Zustandsgleichung des idealen Gases**
 $p \cdot V = N \cdot k \cdot T$.

Diese oben formulierte Zustandsgleichung ist die Verallgemeinerung einer von Amedeo Avogadro im Jahre 1811 entdeckten Gesetzmäßigkeit.

Gesetz von Avogadro

Ein **Mol** ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$ Teilchen) eines **beliebigen Gases** nimmt bei einem Druck von $p_0 = 1\,013,25 \text{ hPa}$ und einer Temperatur von $T_0 = 273,15 \text{ K}$ ein Volumen von $V_m = 22,4 \text{ dm}^3$ ein. Dieses Volumen wird auch als Molvolumen bezeichnet.

Beispiel 3.1.02: Teilchenanzahl eines Gases

Wie viele Teilchen pro Kubikdezimeter enthält ein ideales Gas bei einem Druck von 3 bar und einer Temperatur von 100 °C?

$$N = \frac{p \cdot V}{k \cdot T} = \frac{3 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}{1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}} \cdot 373,15 \text{ K}} = 5,826 \cdot 10^{22} \text{ Teilchen} (= 0,0967 \text{ mol})$$

Für ein Mol eines Gases lässt sich das Produkt aus Teilchenanzahl N_A und Boltzmannkonstante k zu einer neuen Konstante, der universellen Gaskonstante R , zusammenfassen. Die Zustandsgleichung hat dann die Form $p \cdot V = R \cdot T$.

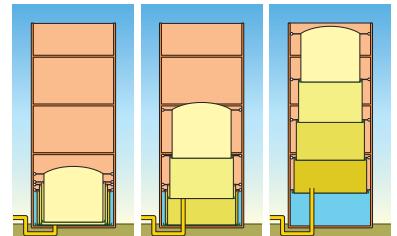
Für n Mol eines idealen Gases gilt dann $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$ mit der **universellen Gaskonstante** $R = N_A \cdot k = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{K} \cdot \text{mol}}$

Für die **Masse m** eines idealen Gases gilt $p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T$ mit der **spezifischen Gaskonstante** $R_s = \frac{R}{M}$ und der **Masse M** von einem Mol des speziellen Gases.



Ziele erreicht? – „Zustandsgleichung eines idealen Gases“

- 3.1.04** Nennen Sie die Normbedingungen für das Gesetz von Avogadro. Was versteht man unter einem Molvolumen?
- 3.1.05** Leiten Sie mit der Zustandsgleichung des idealen Gases das Gesetz von Avogadro her.
- 3.1.06** Welchen Druck übt ein Mol eines Gases in einem Volumen von 10 Litern bei 20 °C aus?
- 3.1.07** Welche Temperatur haben zwei Mol eines idealen Gases, wenn sie in einem Volumen von 10 Litern einen Druck von 5 bar ausüben?
- 3.1.08** Welche Eigenschaften von realen Gasteilchen könnten eine Abweichung von der Theorie des idealen Gases bewirken?



Beim Teleskopgasbehälter drückt das Gas je nach Füllstand eine Teleskopglocke, die in einem Wasserbassin steht, nach oben

3.1.3 Gasgesetze

Bei den als **Gasgesetzen** bezeichneten physikalischen Gesetzmäßigkeiten handelt es sich um **Spezialfälle** der Zustandsgleichung des idealen Gases. Empirisch wurden sie bereits vor der Formulierung der Zustandsgleichung gefunden. In diesem Buch leiten wir die Gasgesetze alleine aus dem Modellbild des idealen Gases her.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Aussagen und Randbedingungen der Gasgesetze in verschiedenen formalen Darstellungen nennen;
- die Gasgesetze aus der Zustandsgleichung herleiten;
- die Gasgesetze zu Berechnungen bei verschiedenen Anwendungen heranziehen;
- die Grenzen der Gültigkeit der Gasgesetze angeben.

Der Zustand eines idealen Gases ist bei fest vorgegebener Stoffmenge von **Druck**, **Volumen** und **Temperatur** bestimmt. Daher bezeichnet man diese Größen als **Zustandsgrößen** des idealen Gases.

Gesetz von Boyle-Mariotte

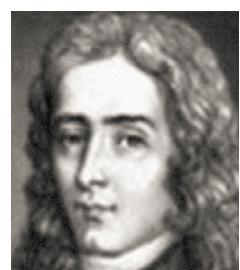
Bei konstanter Temperatur und gleichbleibender Gasmenge sind Druck und Volumen zueinander indirekt proportional. Aus der Zustandsgleichung ergibt sich unmittelbar für **T = konstant** und **n = konstant**.

$$p \sim \frac{1}{V} \quad \text{oder} \quad p \cdot V = \text{konstant} \quad \text{oder} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}.$$

Dieses Gesetz gilt nicht unbegrenzt, da bei hohem Druck der Teilchenabstand im Gas sehr gering wird. Damit sind die theoretischen Voraussetzungen des idealen Gases nicht mehr gegeben.



ROBERT BOYLE, 1627 BIS 1692,
IRISCHER NATURFORSCHER



EDME MARIOTTE, UM 1620 BIS
1684, FRANZÖSISCHER GEISTLICHER UND PHYSIKER, ENTDECKTE
KURZ NACH ROBERT BOYLE UND
VON IHM UNABHÄNGIG EBENFALLS DAS NACH DEN BEIDEN
BENANNTES GASGESETZ



JOSEPH LOUIS GAY-LUSSAC,
1778 BIS 1850, FRANZÖSISCHER
CHEMIKER UND PHYSIKER



Aufblasen eines Heißluftballons
durch einen Brenner



GUILLAUME AMONTONS, 1663 BIS
1705, FRANZÖSISCHER PHYSIKER
UND STATTHALTER VON LILLE

Beispiel 3.1.03: Entweichen von Gas bei Druckabfall

Wie viel Luft entweicht aus einem nicht gasdicht verschlossenen Glas, das ein Volumen von fünf Litern hat, wenn der Luftdruck von 1 020 hPa auf 995 hPa absinkt?

$$\frac{1\,020 \text{ hPa}}{995 \text{ hPa}} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{5 \text{ dm}^3} \quad \text{und somit } V_2 = \frac{1\,020 \text{ hPa}}{995 \text{ hPa}} \cdot 5 \text{ dm}^3 = 5,125 \text{ dm}^3$$

Es entweichen bei Druckabfall 125 cm³ Luft.

Gesetz von Gay-Lussac (auch erstes Gesetz von Gay-Lussac)

Bei gleichbleibendem Druck und gleichbleibender Gasmenge sind Volumen und Temperatur eines idealen Gases zueinander direkt proportional. Wieder ersieht man unmittelbar aus der Zustandsgleichung für $p = \text{konstant}$ und $n = \text{konstant}$.

$$V \sim T \quad \text{oder} \quad \frac{V}{T} = \text{konstant} \quad \text{oder} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Beispiel 3.1.04: Ausdehnung eines Ballons bei Erwärmung

Auf welche Größe dehnt sich ein Ballon, der bei einem Luftdruck von 1 013 hPa und einer Temperatur von 20 °C einen Durchmesser von 40 cm hat, bei einer Erwärmung um 30 °C aus? Wir nehmen vereinfachend an, dass der Ballon immer ideal kugelförmig ist und der Druck der Hülle vernachlässigt wird. Es soll also nur der Umgebungsdruck auf die Füllung wirken.

$$V_1 = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi \cdot 0,2^3}{3} = 0,033\,51 \text{ m}^3$$

$$\frac{0,033\,51 \text{ m}^3}{V_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{293,15 \text{ K}}{323,15 \text{ K}} \quad \text{d. h. } V_2 = \frac{323,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} \cdot 0,033\,51 \text{ m}^3 = 0,036\,94 \text{ m}^3$$

$$d_{\text{neu}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V_2}{4\pi}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 0,003\,694 \text{ m}^3}{4\pi}} = 0,413 \text{ m} = 41,3 \text{ cm}$$

Der Durchmesser wächst auf 41,3 cm.

Gesetz von Amontons (auch zweites Gesetz von Gay-Lussac)

Bei gleichbleibendem Volumen und gleichbleibender Stoffmenge sind Druck und Temperatur eines idealen Gases zueinander direkt proportional. Aus der Zustandsgleichung folgt für $V = \text{konst.}$ und $n = \text{konst.}$

$$p \sim T \quad \text{oder} \quad \frac{p}{T} = \text{konstant} \quad \text{oder} \quad \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}.$$

Bei zu hohem Druck versagt auch hier das Modell eines idealen Gases wegen der zu geringen Abstände der Gasteilchen.

Beispiel 3.1.05: Luftpumpe verschlossenes Glas

Ein bei einem Luftdruck von 1 000 hPa luftdicht verschlossenes Glas mit einem gasgefüllten Volumen von 1,5 dm³ wird in einem Kühlschrank von 20 °C auf 4 °C abgekühlt.

- Um wie viel Prozent fällt der Druck im abgekühlten Glas?
- Welche Kraft wird dann benötigt, um den Deckel (Fläche A = 75 cm²) vom Glas zu heben?

$$\text{a) } \frac{1\,000 \text{ hPa}}{p_2} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{293,15 \text{ K}}{277,15 \text{ K}} \quad p_2 = \frac{277,15 \text{ K}}{293,15 \text{ K}} \cdot 1\,000 \text{ hPa} = 945,42 \text{ hPa}$$

Der Druck sinkt bei Abkühlung um 5,458 %.

$$\text{b) } F = \Delta p \cdot A = (p_1 - p_2) \cdot A = (100\,000 \text{ Pa} - 94\,542 \text{ Pa}) \cdot 75 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 = 40,94 \text{ N}$$

Zum Abheben des Deckels wird eine Kraft von 40,9 N benötigt. Dies entspricht der Gewichtskraft von über 4 kg!



Gesetz der Gleichförmigkeit

Das Gesetz der Homogenität besagt, dass ein ideales Gas überall dieselbe Dichte aufweist. Bei gleichbleibendem Druck und gleichbleibender Temperatur ist das Volumen direkt proportional zur Teilchenanzahl. Die Zustandsgleichung ergibt für $p = \text{konstant}$ und $T = \text{konstant}$.

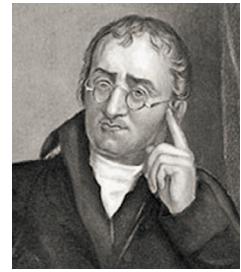
$$V \sim N \quad \text{oder} \quad \frac{N}{V} = \text{konstant} \quad \text{oder} \quad \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Gesetz von Dalton

Wenn Gase nicht chemisch miteinander reagieren, kann man sie beliebig vermischen. Dazu stellen wir uns vor, dass wir N_1 Teilchen eines Gases 1 und N_2 Teilchen eines Gases 2 vermischen, sodass wir dann N Teilchen in einem Volumen V haben. Aus der Zustandsgleichung ergibt sich:

$$p = \frac{N \cdot k \cdot T}{V} = \frac{(N_1 + N_2) \cdot k \cdot T}{V} = \frac{N_1 \cdot k \cdot T}{V} + \frac{N_2 \cdot k \cdot T}{V} = p_1 + p_2$$

Die **Summe der Partialdrücke** der einzelnen Gase ist gleich dem **Gesamtdruck** des Gasgemisches: $p = \sum_i p_i$



JOHN DALTON, 1766 BIS 1844,
ENGLISCHER NATURFORSCHER
UND LEHRER

Der Partialdruck ist der Druck, den einer der Gasbestandteile alleine im gesamten Volumen V ausüben würde.

Beispiel 3.1.06: Partialdrücke in einem Gasgemisch

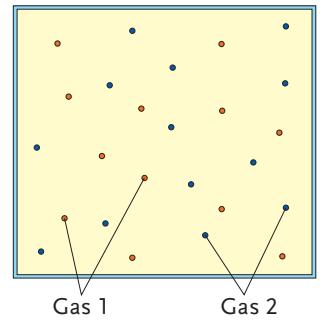
Normale Luft besteht aus 78 % Stickstoff, 21 % Sauerstoff sowie aus 1 % Argon und anderen Gasen in Spuren. Berechnen Sie den Partialdruck der einzelnen drei Komponenten bei einem Luftdruck von 1 013 hPa.

$$p = p_1 + p_2 + p_3 = 0,78p + 0,21p + 0,01p$$

$$p_1 = 0,78p = 0,78 \cdot 1\,013 \text{ hPa} = 790,14 \text{ hPa} \quad \text{Partialdruck des Stickstoffs}$$

$$p_2 = 0,21p = 0,21 \cdot 1\,013 \text{ hPa} = 212,73 \text{ hPa} \quad \text{Partialdruck des Sauerstoffs}$$

$$p_3 = 0,01p = 0,01 \cdot 1\,013 \text{ hPa} = 10,13 \text{ hPa} \quad \text{Partialdruck von Argon und Spurengasen}$$



In einem Gasgemisch reagieren die einzelnen Gasteilchen nicht miteinander zu neuen Molekülen

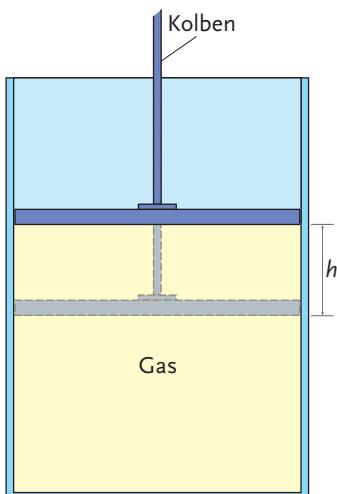
| Gas | Dichte/kg · m ⁻³ |
|----------------|-----------------------------|
| Wasserstoff | 0,089 88 |
| Helium | 0,178 |
| Neon | 0,840 |
| Luft bei 20 °C | 1,204 |
| Stickstoff | 1,251 |
| Sauerstoff | 1,429 |
| Kohlendioxid | 1,977 |
| Propan | 2,019 |



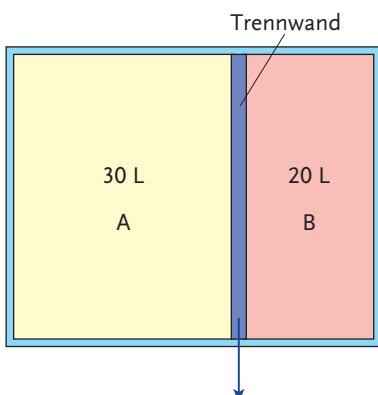
Ziele erreicht? – „Gasgesetze“

3.1.09 Geben Sie die Zustandsgrößen eines idealen Gases an.

3.1.10 Nennen Sie die Gasgesetze (Bezeichnung und Formel) und geben Sie die Randbedingungen für ihre Gültigkeit an.



Skizze zu Aufgabe 3.1.12



Skizze zu Aufgabe 3.1.20:
Die Trennwand wird einfach aus
dem gemeinsamen Volumen
herausgezogen.

Gasflaschen mit Ventilschutz-
kappen für die mechanisch
empfindlichen VentileVentil mit Druckminderer zum
Senken des Ausströmdruckes

- 3.1.11** Eine Gasflasche fasst ein Volumen von 100 L und steht unter einem Druck von 120 bar. Die wievielfache Gasmenge im Vergleich zu Bedingungen des Umgebungsluftdrucks (1 013 hPa) wird in diesem Volumen aufbewahrt?
- 3.1.12** In einem Zylinder, der mit einem frei beweglichen Kolben mit einem Durchmesser von 20 cm verschlossen ist, befinden sich 15 L eines Gases bei 15 °C. Um wie viel hebt sich der Kolben, wenn man das Gas um 50 °C erwärmt?
- 3.1.13** In einer Gasflasche, die bei 20 °C einen Druck von 95 bar aufweist, herrscht ein Druck von 125 bar. Welche Temperatur hat sie?
- 3.1.14** In einem Reifen (Annahme: ideal zylindrische Form mit Außendurchmesser $D = 61$ cm, Felgendurchmesser $d = 39$ cm und einer Breite $b = 18,5$ cm) herrscht bei 20 °C ein Druck von 2,2 bar. Welcher Druck baut sich auf, wenn die Temperatur des Reifens um 30 °C steigt?
- 3.1.15** Eine Gasflasche, deren Eigenmasse 25 kg beträgt, enthält 60 L Sauerstoff unter einem Druck von 70 bar. Wie groß ist ihre Gesamtmasse?
- 3.1.16** Wie viel Mol befinden sich in 30 L eines Gases bei einer Temperatur von 5 °C und einem Druck von 10 bar? Wie viele Gasteilchen sind das?
- 3.1.17** Welche Dichte hat CO₂ bei einer Temperatur von -5 °C und einem Druck von 1 013 hPa?
- 3.1.18** Berechnen Sie die Dichte des Sauerstoffs in der Gasflasche von Aufgabe 3.1.15.
- 3.1.19** Welche Temperatur haben 50 L He bei einem Druck von 90 bar, wenn sie unter diesen Bedingungen eine Masse von 17 kg haben?
- 3.1.20** 30 L eines Gases A unter einem Druck von 1 bar und 20 L eines zweiten Gases B unter einem Druck von 1,5 bar werden bei gleicher Temperatur im gemeinsamen Volumen von 50 L vermischt, ohne dass eine chemische Reaktion auftritt. Welcher Druck stellt sich ein, wie groß sind die jeweiligen Partialdrücke?

3.1.4 Zustandsänderungen des idealen Gases

Bisher haben wir als Zustandsänderung eines Stoffes immer die Änderung seines Aggregatzustandes verstanden. Im folgenden Kapitel betrachten wir Änderungen des Zustandes eines idealen Gases bei Änderung der verschiedenen Zustandsgrößen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Zustandsgrößen eines idealen Gases** nennen;
- die **Bezeichnungen der Zustandsänderungen** unter verschiedenen Zwangsbedingungen angeben;
- die formale Beschreibung dieser Zustandsänderungen aus der **Zustandsgleichung** herleiten.

Für eine **Wiederholung der Phasenübergänge eines Stoffes** und der **spezifischen Wärmen** sei auf **NAWI I/II**, Kap. 5, Grundlagen der Thermodynamik, verwiesen. Dort wurde die Darstellung von Zustandsänderungen in einem Phasendiagramm behandelt. Diese Grundlagen werden in den folgenden Kapiteln vorausgesetzt.

Innerhalb der Gasphase eines idealen Gases spricht man auch dann von einer Zustandsänderung, wenn sich nur die **Zustandsgrößen p, V, n oder T ändern**, aber kein Übergang in einen anderen Aggregatzustand eintritt. In der Praxis kann dies nicht beliebig erfolgen, sondern geht unter zwingenden Randbedingungen vor sich.

Übersicht über die Zustandsänderungen eines idealen Gases

| Bedingung | $p = \text{konst.}$ | $V = \text{konst.}$ | $T = \text{konst.}$ |
|------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Bezeichnung | isobare | isochore | isotherme |
| Zustandsänderung | | | |
| Formel | $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$ | $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$ | $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$ |
| Gesetz | 1. Gay-Lussac | 2. | Boyle-Mariotte |

In Unkenntnis der im vorigen Kapitel erwähnten Gasgesetze könnte man die Formeln in der Tabelle jeweils durch Division zweier Zustandsgleichungen mit den unterschiedlichen Zustandsgrößen erhalten.

Beispiel 3.1.07: Isochore Zustandsänderung

Ein Gas ist in einem konstanten Volumen verschlossen. Bei einer isochoren Erwärmung um 25°C verhält sich der Anfangsdruck zum erreichten Enddruck wie $2 : 3$. Welche Temperatur hatte das Gas vor bzw. nach der Erwärmung?

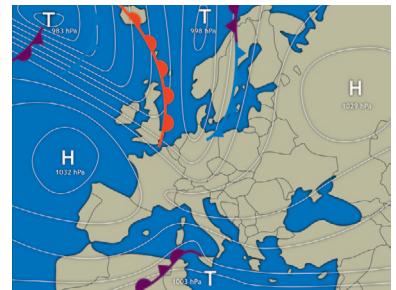
$$\frac{T_0}{T_0 + 25 \text{ K}} = \frac{2p}{3p} \Leftrightarrow 3T_0 = 2T_0 + 50 \text{ K} \Leftrightarrow T_0 = 50 \text{ K}$$

Das Gas hatte vor der Erwärmung eine Temperatur von $T_0 = 50 \text{ K} = -223,15^\circ\text{C}$ und danach $T_1 = 75 \text{ K} = -198,15^\circ\text{C}$.

Iso: griech. Präfix, gleich (in quantitativer Hinsicht).



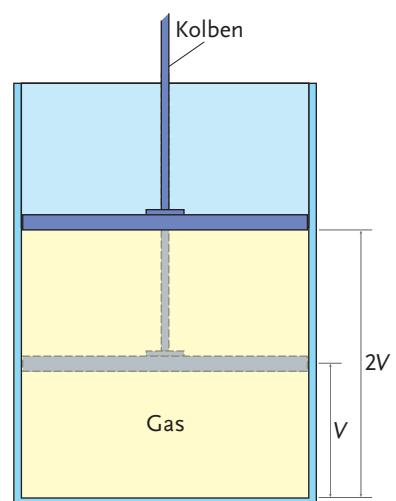
Die Begriffe Isobare bzw. Isotherme kommen auch in der Meteorologie vor. Sie bezeichnen dort Linien gleichen Drucks bzw. gleicher Temperatur auf einer Wetterkarte.



Wetterkarte von Europa mit Isobaren (Linien gleichen Luftdrucks)



Bei einer Luftpumpe erfolgt die Kompression der angesaugten Luft nur im Idealfall bei sehr langsamer Verdichtung isotherm. Man kann leicht durch Berührung der Pumpe überprüfen, wie sich die verdichtete Luft und somit die Pumpe erwärmt.



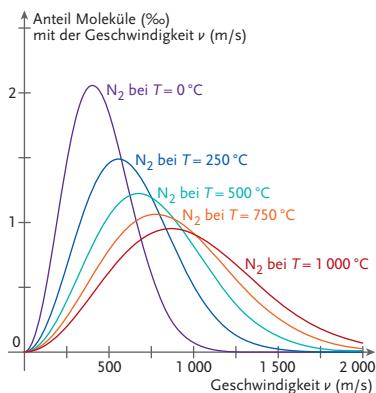
Skizze zu Aufgabe 3.1.25



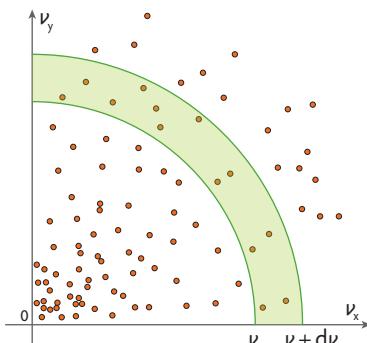
JAMES CLERK MAXWELL, 1831 BIS
1879, SCHOTTISCHER PHYSIKER,
ER ENTWICKELTE BEDEUTENDE
THEORIEN IM BEREICH DER
ELEKTRIZITÄTSLEHRE UND DER
KINETISCHEN GASTHEORIE



Zentraler Grenzverteilungssatz der Statistik: Ergibt sich eine Zufallsvariable aus einer Summe beliebiger anderer voneinander unabhängiger Zufallsvariablen, so ist sie normalverteilt.



Zweidimensionale Darstellung der Verteilung der Teilchengeschwindigkeiten. Die Teilchen mit einem Geschwindigkeitsbetrag zwischen v und $v + dv$ befinden sich in der skizzierten Kugelschale.



Verteilung der Teilchengeschwindigkeiten für N_2 bei verschiedenen Temperaturen

3.1.5 Kinetische Gastheorie: Maxwell-Boltzmann-Verteilung

Bei der Herleitung der Zustandsgleichung des idealen Gases wurden statistische Überlegungen der kinetischen Gastheorie umgangen, da ihre Komplexität den Anspruch dieses Buches übersteigen würde. Dieses Kapitel wird sich dennoch kurz mit diesem Themenbereich befassen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Grundideen der Statistik des idealen Gases** angeben;
- die **Maxwell-Boltzmann-Verteilung** als die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen des idealen Gases angeben und ihre Form skizzieren.

In einem idealen Gas bei vorgegebener Temperatur bewegen sich **nicht alle Teilchen mit derselben Geschwindigkeit**. Vielmehr entspricht der Temperatur eine mittlere Geschwindigkeit der Teilchen. Um diesen Mittelwert streuen dann die Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen. Bei dieser Bewegung wird allerdings keine Raumrichtung bevorzugt. Die Richtungen sind gleichmäßig verteilt. Mathematisch ist das dadurch beschreibbar, dass die Geschwindigkeit in jeder Dimension (in jeder Vektorkomponente) normalverteilt ist. Dass hier die Normalverteilung auftaucht, erstaunt nicht. Der zentrale Grenzverteilungssatz der Statistik besagt ja, dass Größen, die sich aus mehreren Zufallsvariablen additiv zusammensetzen, mathematisch beweisbar normalverteilt sind.

Hergeleitet wurde die Verteilung der Geschwindigkeit der Teilchen eines idealen Gases von **James Clerk Maxwell** und **Ludwig Boltzmann** im Jahre 1860. Da die Herleitung mathematisch anspruchsvoll ist, werden hier nur die **Grundideen** angesprochen und dann wird die Lösung präsentiert.

Betrachten wir zuerst nur einen **eindimensionalen Fall**. Bei einer mit der Temperatur zunehmenden ungeordneten Bewegung der Teilchen muss der Mittelwert null sein und die Standardabweichung mit der Temperatur zunehmen. Sonst würde sich ja das Gas geordnet in eine bestimmte Richtung bewegen. Man erhält also eine Wahrscheinlichkeitsverteilung $f(v) \sim e^{-\frac{E}{k \cdot T}}$.

Für den **dreidimensionalen Fall** erhält man die Verteilung des Betrags der Geschwindigkeit durch das Integral (Summe) über alle Geschwindigkeitsvektoren in einer Kugelschale mit Radius v und Dicke dv . Durch die Kugeloberfläche entsteht dabei ein Faktor v^2 in der Verteilungsfunktion der Geschwindigkeitsbeträge.

Die **Maxwell-Boltzmann-Verteilung** der Teilchengeschwindigkeiten lautet dann:

$$f(v) = 4\pi \cdot \left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$$

Diese Funktion liefert als mittlere quadratische Geschwindigkeit $\overline{v^2} = \frac{3kT}{m}$ was gleichbedeutend ist mit $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT$. Das ist der bisher ohne weitere Begründung verwendete **Zusammenhang** zwischen der **mittleren kinetischen Energie** der Teilchen eines idealen Gases und der **Temperatur**.



Ziele erreicht?

- 3.1.27** Nennen Sie die Grundideen der statistischen Beschreibung der Teilchen eines idealen Gases.
- 3.1.28** Skizzieren Sie den Verlauf der Maxwell-Boltzmann-Verteilung für verschiedene Temperaturen eines Gases.

3.2 Hauptsätze der Thermodynamik

Die Entwicklung der klassischen Thermodynamik zog sich zeitlich über das gesamte 19. Jahrhundert hin und war eng verwoben mit der Entwicklung des Wissens über chemische Reaktionen.

3.2.1 Temperatur

Der zentrale Begriff in der Thermodynamik ist die Temperatur. Dennoch ist schwer zu erfassen, was Temperatur eigentlich ist. Bereits in NAWI I/II haben wir die Existenz einer empirischen Temperaturskala behandelt. Wir haben auch gesehen, dass es anfänglich deutlich einfacher war, Temperatur zu messen, als zu erklären, was sie eigentlich ist.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den „nullten“ **Hauptsatz der Thermodynamik** nennen;
- die **Gesamtenergie eines Systems** in seine verschiedenen Anteile aufgliedern;
- die Möglichkeiten zur **Veränderung der Temperatur eines thermodynamischen Systems** erklären.

Mit dem Begriff der **Temperatur** verbunden ist der Begriff des **thermodynamischen Gleichgewichtes**. Darunter versteht man das Angleichen der Temperatur zweier Systeme, die miteinander in thermischen Kontakt gebracht werden. Das Gleichgewicht stellt sich unabhängig vom Material der Systeme und von der Art des thermischen Kontaktes nach langer Zeit des Kontaktes ein. Es existiert also eine Zustandsgröße, die Temperatur, die den thermischen Zustand von Systemen miteinander vergleichbar macht. Die Existenz einer solchen Temperaturskala wird im sogenannten nullten Hauptsatz der Thermodynamik formuliert.

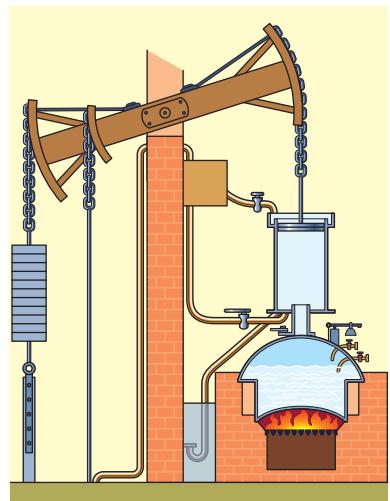
Nullter Hauptsatz der Thermodynamik

Wenn zwei Systeme A und B mit einem dritten System C im thermodynamischen Gleichgewicht stehen, stehen sie auch zueinander im Gleichgewicht.

Man könnte diesen Zusammenhang auch folgendermaßen formulieren:

Wenn zwei Systeme im thermodynamischen Gleichgewicht stehen, dann haben sie dieselbe **Temperatur T**.

In der kinetischen Gastheorie hat ein Teilchen drei Freiheitsgrade der Translation. Der Zusammenhang zwischen der mittleren Bewegungsenergie der Teilchen des Gases und der Temperatur lautet daher $\overline{E_{\text{kin}}} = \frac{3}{2} k \cdot T$. Diesen Zusammenhang haben wir schon bei der Herleitung der Zustandsgleichung des idealen Gases verwendet.

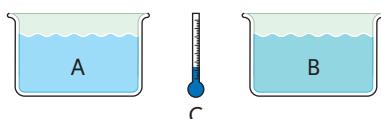


Skizze einer atmosphärischen Dampfmaschine nach **Thomas Newcomen** von 1712. Sie diente zum Umpumpen von Wasser in einem Bergwerk.

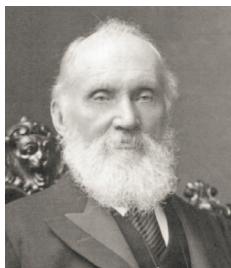
Im Zeitalter der Industrialisierung wurden diese Maschinen von Ingenieuren konstruiert, denen noch nicht der komplette dazu nötige theoretische Hintergrund zur Verfügung stand.



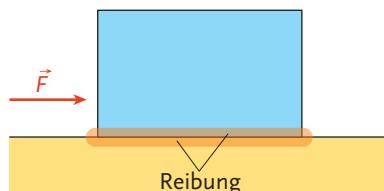
NICOLAS LÉONARD SADI CARNOT,
1796 BIS 1832, FRANZÖSISCHER
PHYSIKER UND INGENIEUR; MIT
SEINER THEORETISCHEM BETRACH-
TUNG VON DAMPFMASCHINEN
(CARNOT-PROZESS) BEGRÜNDETE
ER DIE HEUTIGE THERMODYNAMIK

Nullter Hauptsatz

Wenn das Thermometer C im Gleichgewicht mit dem Wärmebad A und mit dem Wärmebad B ist, dann sind die beiden Wärmebäder A und B zueinander im Gleichgewicht.



WILLIAM THOMSON,
ERSTER BARON KELVIN (AUCH
LORD KELVIN), 1824 BIS 1907,
BRITISCHER PHYSIKER



Ein auf einer Unterlage liegender Körper erfährt durch eine auf ihn wirkende Kraft eine gleichgerichtete Bewegung. Die Teilchen an der Berührungsfläche zur Unterlage werden durch **Reibung** zu einer **ungerichteten Bewegung** veranlasst.

Die Temperatur ist hier in der Kelvinskala anzugeben. Nur in dieser Skala besteht der wertmäßige Zusammenhang zwischen Temperatur und Teilchenbewegung so unmittelbar. Eine Temperatur von null Kelvin bedeutet also, dass keine Bewegungsenergie der Teilchen vorhanden ist. Man kann das System nicht mehr weiter abkühlen. Die Temperatur von 0 K oder $-273,15^{\circ}\text{C}$ bezeichnet man daher auch als **absoluten Nullpunkt der Temperatur**.

Bei Teilchen mit mehr Freiheitsgraden gilt eine analoge Proportionalität zwischen der Temperatur und der mittleren Energie, die mit der Bewegung der Teilchen verbunden ist. Somit ist die **Temperatur** ein Maß für die **mittlere mit der mikroskopischen Bewegung der Teilchen verbundene Energie**.

Im Zuge des erweiterten **Energieerhaltungssatzes** haben wir bereits gelernt, dass die Gesamtenergie eines makroskopischen Körpers in **mechanische Energie** (kinetische und potenzielle) und in **innere Energie** zu unterteilen ist. Die Temperatur stellt also ein Maß für einen Teil der inneren Energie, der mikroskopischen Bewegungsenergie, dar.

Erhöhung der Temperatur eines Systems

Auf welche Art kann man die Temperatur eines Systems erhöhen? Man hat dazu **zwei Möglichkeiten**:

- Eine **Zufuhr von Energie** war bisher immer mit dem **Verrichten von Arbeit** verbunden. Arbeit in Form von gleichgerichteter Bewegung erhöht allerdings nur die mechanische Energie des Systems. Betrachtet man den realen Fall einer Zufuhr von Arbeit, dann sieht man, dass Reibung immer eine Rolle spielt. Reibung verursacht eine Zufuhr von ungeordneter mikroskopischer Bewegung an den reibenden Grenzflächen. Dies erhöht die innere Energie und damit die Temperatur.

Tatsächlich wird bei jeder Zufuhr von Arbeit ein Teil dieser Arbeit durch Reibung in Wärmeenergie umgewandelt.

- Werden zwei Systeme mit unterschiedlicher Temperatur in thermischen Kontakt gebracht, stellt sich nach langer Zeit bei beiden Systemen dieselbe Temperatur ein. Die beiden Systeme sind im thermodynamischen Gleichgewicht. Vom wärmeren System ist innere Bewegungsenergie auf das kältere System übertragen worden. Das eine System wurde abgekühlt und das andere System wurde erwärmt, bis beide dieselbe Temperatur hatten. Mikroskopisch betrachtet wird dabei an der Grenzfläche des thermischen Kontaktes Bewegungsenergie von Teilchen des einen Systems durch Stöße auf Teilchen des anderen Systems übertragen.

Führt man einem System Wärme zu, so erhöht sich seine Temperatur. Wärme ist also eine Form des **Energieübertrags**.

Der Begriff Wärme wird häufig inkorrekt verwendet. In vielen Fällen wird er fälschlicherweise als Begriff für die **Energieform selbst** (innere Bewegungsenergie, Wärmeenergie) verwendet.



Ziele erreicht? – „Temperatur“

- 3.2.01** Nennen Sie den nullten Hauptsatz der Thermodynamik und erklären Sie, was unter dem thermodynamischen Gleichgewicht zu verstehen ist.
- 3.2.02** Was versteht man unter dem Begriff Wärme?
- 3.2.03** Nennen und erläutern Sie den erweiterten Energieerhaltungssatz unter Berücksichtigung der Temperatur eines Systems.
- 3.2.04** Erklären Sie Möglichkeiten zur Veränderung der Temperatur eines Systems.

3.2.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Die Überlegungen über die Möglichkeiten der Temperaturerhöhung eines Systems im vorigen Kapitel führen uns zum ersten Hauptsatz der Thermodynamik.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den ersten **Hauptsatz der Thermodynamik** als spezielle Formulierung der Energieerhaltung nennen;
- die **Volumenänderungsarbeit berechnen** und im ersten Hauptsatz anwenden;
- die **innere Energie und Enthalpie berechnen** und ihre Bedeutung für den Zustand eines Systems interpretieren.

Erster Hauptsatz der Thermodynamik

Die **Zufuhr von Wärme Q** oder von mechanischer **Arbeit W** vergrößert die **innere Energie U** eines Systems.

$$Q + W = \Delta U$$

In differenzierter Form lautet der erste Hauptsatz dann $dQ + dW = dU$

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik stellt nichts anderes dar als eine spezielle Formulierung des allgemeinen Energieerhaltungssatzes.

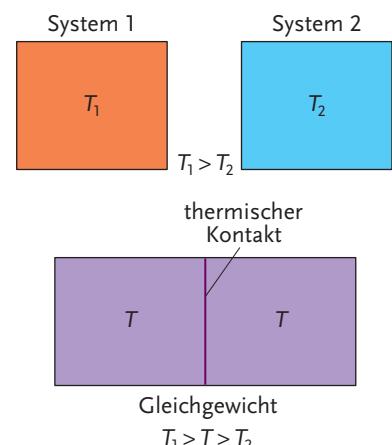
Für die Vorzeichen der Wärme und der mechanischen Arbeit gilt in diesem Buch die folgende Konvention: Dem System **zugeführte Wärmen** und **am System verrichtete Arbeit** sind **positiv** (**Energiezugewinn** des Systems). Dem System **entzogene Wärmen** und **vom System geleistete Arbeit** sind **negativ** (**Energieverlust** des Systems).

In der Folge betrachten wir Änderungen der inneren Energie eines idealen Gases aufgrund der Zufuhr von Wärme oder von Arbeit, also einer Änderung von jeweils einer der beiden obigen Summanden.

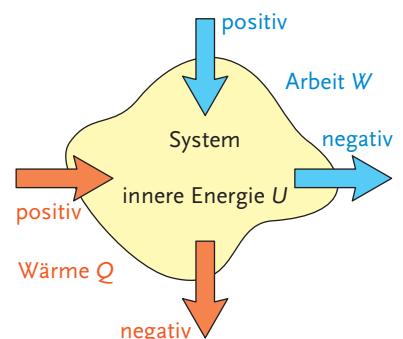
Volumenänderungsarbeit W

Die mechanische Arbeit zur Volumenänderung errechnet sich aus der aufgewendeten Kraft entlang des Weges zur Volumenänderung.

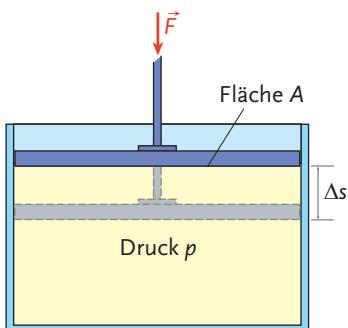
$$W = F \cdot \Delta s = p \cdot A \cdot \Delta s \Rightarrow W = -p \cdot \Delta V$$



Zwischen zwei unterschiedlich warmen Systemen stellt sich nach einem Wärmeübertrag eine gemeinsame Temperatur ein. Man bezeichnet dies als **thermisches Gleichgewicht**.



Schematische Darstellung des ersten Hauptsatzes: **Zugeführte Energien** werden **positiv**, **entzogene Energien** werden **negativ** gerechnet.



Skizze zur Volumenänderungsarbeit

Das negative Vorzeichen im Ergebnis ergibt sich aus folgender Überlegung: Bei Kompression ist die Volumenänderung negativ, es wird aber Arbeit zugeführt, also muss diese positiv sein. Bei einer Expansion ist die Volumenänderung positiv, das System verrichtet dabei aber Arbeit. Das System verliert Energie. Daher muss sie negativ sein. Der **erste Hauptsatz** hat dann die Form

$$Q = \Delta U + p \cdot \Delta V \quad \text{oder in differenzierter Form} \quad dQ = dU + p \cdot dV$$

Beispiel 3.2.01: Ausdehnungsarbeit eines Gases

Welche Ausdehnungsarbeit leistet 1 m^3 Luft, wenn sie sich bei konstantem Luftdruck von 1013 hPa um 15% ausdehnt?

$$W = -p \cdot \Delta V = -1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 0,15 \text{ m}^3 = -15195 \text{ Nm} \approx -15,2 \text{ kJ}$$

Innere Energie U

Unter der inneren Energie versteht man die Energie, die im **gesamten System** vorhanden ist. Sie lässt sich dadurch bestimmen, dass man bei einer Zufuhr oder Entnahme von Wärme keine Volumänderungsarbeit zulässt ($W = 0$). Dann lautet der erste Hauptsatz $Q = \Delta U$. Daher gilt $\Delta U = c_v \cdot m \cdot \Delta T (= Q)$ bzw.

$$U = c_v \cdot m \cdot T \quad \text{mit } c_v: \text{spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen}$$

Die innere Energie einer bestimmten Menge (Masse) eines Gases ist also nur von seiner Temperatur im aktuellen Zustand abhängig.

Beispiel 3.2.02: Innere Energie eines Gases

Wie groß ist die innere Energie von 3 kg Wasserstoff bei einer Temperatur von 20°C ?

$$U = c_v \cdot m \cdot T = 10,17 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 3 \text{ kg} \cdot 293,15 \text{ K} = 8944 \text{ kJ} = 8,944 \text{ MJ}$$

Enthalpie H

Viele chemische Reaktionen oder Vorgänge in der Natur laufen unter der Bedingung eines **konstant bleibenden Umgebungsdruckes** (z. B. Luftdruckes) ab. In diesem Fall ist die Menge der **zugeführten Wärmen** eines idealen Gases **nicht gleich** der **Zunahme der inneren Energie**, da sich bei gleichbleibendem Druck das Gas ausdehnt und somit Volumänderungsarbeit leistet.

Die Enthalpie ist definiert als

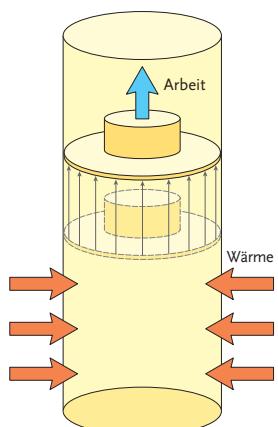
$$H = U + p \cdot V$$

In der Folge wird gezeigt, dass die Zunahme der Enthalpie eines idealen Gases gleich den zugeführten Wärmen ist.

$$dH = dU + d(p \cdot V) = dU + p \cdot dV + V \cdot dp = dQ + V \cdot dp$$

Für konstanten Druck ergibt sich hieraus unmittelbar $dH = dQ$. Trägt man die Enthalpie in einen Graphen über der Temperatur auf, so erhält man nahezu einen linearen Zusammenhang.

$$H = U + p \cdot V = c_v \cdot m \cdot T + p \cdot V$$



Bei **konstantem Druck** wird die einem System zugeführte Wärme zum Teil in Volumänderungsarbeit umgewandelt. Die Änderung der inneren Energie ist nicht gleich der zugeführten Wärme.

Daraus erhält man mit der Zustandsgleichung

$$H = c_v \cdot m \cdot T + m \cdot R_s \cdot T = m \cdot T \cdot (c_v + R_s)$$

Da die Werte in der Klammer konstant sind, ergibt sich für die **Enthalpie**

$$H = c_p \cdot m \cdot T \text{ mit der spezifischen Wärmekapazität } c_p \text{ bei konstantem Druck.}$$

Also gilt für ein ideales Gas $c_p = c_v + R_s$ und man erhält den Zusammenhang zwischen den spezifischen Wärmen bei konstantem Druck bzw. Volumen $c_p - c_v = R_s$.

Beispiel 3.2.03: Ausdehnungsarbeit und Enthalpie eines Gases

Welche Ausdehnungsarbeit leistet 1 kg Sauerstoff, wenn er bei konstantem Druck um 10 K erwärmt wird? Wie groß ist die Enthalpie bei 30 °C?

Da die Zufuhr von Wärme sofort zur Ausdehnung des Gases führt, gilt für die Volumenausdehnungsarbeit:

$$\begin{aligned} W &= Q = m \cdot R_s \cdot \Delta T = m \cdot (c_p - c_v) \cdot \Delta T = \\ &= 1 \text{ kg} \cdot \left(0,917 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} - 0,656 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \right) \cdot 10 \text{ K} = 2,61 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Die Enthalpie beträgt

$$H = c_p \cdot m \cdot T = 0,917 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1 \text{ kg} \cdot 303,15 \text{ K} = 277,00 \text{ kJ}$$

Bei **offenen** (nicht geschlossenen) Systemen, bei denen ein Strom von Teilchen auftreten kann, stellt man die **Energiebilanz** mittels der **Enthalpie** auf.

Zu Aufgabe 3.2.06:
Hitzeeinwirkung auf Gasflaschen kann zu sehr gefährlichem Druckanstieg führen.



DIN-Schild: Warnung vor Gasflaschen



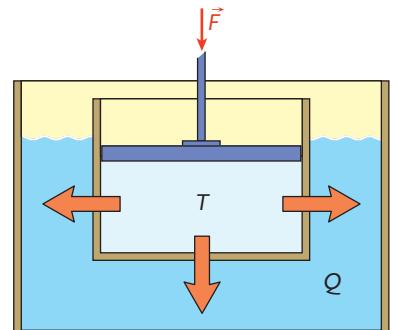
Ziele erreicht? – „Erster Hauptsatz der Thermodynamik“

- 3.2.05** Ein Kilogramm eines Gases mit den spezifischen Wärmekapazitäten $c_p = 3,2 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ und $c_v = 2,3 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ wird bei konstantem Druck um 10 K erwärmt. Welche Ausdehnungsarbeit leistet es dabei?
- 3.2.06** Welche Wärmemenge nimmt eine Gasflasche mit 15 Litern Sauerstoff auf, wenn der Druck von 4 bar auf 6 bar steigt?
- 3.2.07** Welche Menge an Kohle mit einem Heizwert von 2,5 MJ/kg müsste man theoretisch verfeuern, um die Temperatur eines Saales mit 4 000 m³ Luft von 8 °C auf 20 °C zu erhöhen. Anmerkung: Um einen nachhaltigen Heizeffekt zu erzielen, müssten natürlich auch die Wände auf die angegebene Temperatur erwärmt werden.
- 3.2.08** Welche Wärmemenge entsteht beim Bremsvorgang eines Autos mit 1 300 kg Masse in den Bremsen, wenn es aus einer Anfangsgeschwindigkeit von 100 km/h zum Stillstand gebracht wird?
- 3.2.09** 10 m³ Luft (20 °C, 1 013 hPa) werden unter Wasserkühlung mit einem Aufwand von 600 kN · m komprimiert. Es wird dabei eine Temperatur von 60 °C erreicht. Welche Wärmemenge hat das Kühlwasser aufgenommen?
- 3.2.10** Ein Wasserfall hat eine Sturzhöhe von acht Metern. Um wie viel Grad müsste die Wassertemperatur steigen, wenn die gesamte potenzielle Energie des Wassers in Wärme umgewandelt würde?

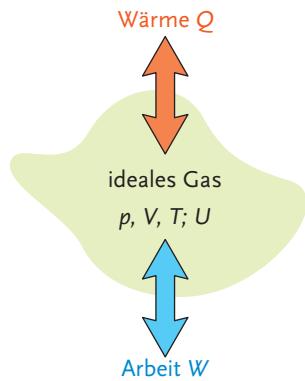
Abbildung zu Aufgabe 3.2.08:



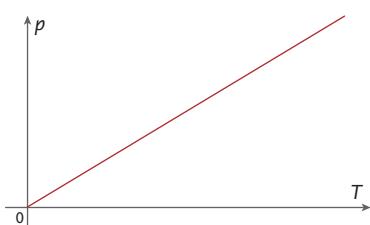
Bremsscheibe und -backen eines Pkw; die Bremsscheibe ist zur besseren Ableitung der Wärme innen belüftet



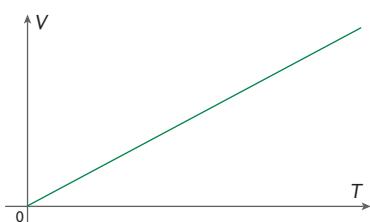
Skizze zu Aufgabe 3.2.09



Nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik kann ein ideales Gas durch **Austausch von Wärme oder über Volumenarbeit** mit seiner Umgebung **wechselwirken**. Dies hat Auswirkungen auf den Zustand des Gases und die beschreibenden Zustandsgrößen **Druck p , Volumen V und Temperatur T** .



Druck-Temperatur-Diagramm einer isochoren Zustandsänderung, das Volumen bleibt konstant



Volumen-Temperatur-Diagramm einer isobaren Zustandsänderung, der Druck bleibt konstant

3.2.3 Zustandsänderung des idealen Gases und erster Hauptsatz

Im Rahmen der Zustandsgleichung eines idealen Gases wurden Zustandsänderungen bereits behandelt. In diesem Kapitel werden sie unter dem Aspekt des ersten Hauptsatzes noch einmal genauer behandelt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Begriffe der **isobaren, isochoren, isothermen und adiabatischen Zustandsänderung eines Gases** mit den Zustandsgrößen des Gases erklären;
- die **Änderungen der Zustandsgrößen** bei obigen Zustandsänderungen des Gases berechnen;
- den **ersten Hauptsatz für die Zustandsänderungen anwenden** und interpretieren.

Zur genaueren Betrachtung dieser Zustandsänderung werden die Kenntnisse über die Volumenänderungsarbeit und über die innere Energie aus dem vorigen Unterkapitel verwendet. Dabei wird jeweils von der differenziellen Form $dQ + dW = dU$ des ersten Hauptsatzes ausgegangen. Man beachte auch hier, dass der erste Hauptsatz nichts anderes als der Energieerhaltungssatz ist. Bei einer gleichbleibenden Gasmenge sind der Druck p , das Volumen V und die Temperatur T die beschreibenden Zustandsgrößen des idealen Gases.

Isochore Zustandsänderung

Eine isochore Zustandsänderung bedeutet, dass sich das **Volumen nicht verändert ($\Delta V = 0$)**. Da es keine Volumenänderungsarbeit gibt, erfolgt dabei die gesamte Änderung der inneren Energie über den Austausch von Wärme. Es gilt in der Folge

$$Q = \Delta U = c_v \cdot m \cdot \Delta T \quad \text{bzw. differenziell} \quad dQ = dU = c_v \cdot m \cdot dT$$

Dabei ist c_v die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen. Aus der Zustandsgleichung erhält man in dieser Situation einen **linearen Zusammenhang zwischen Druck p und Temperatur T** (vgl. 2. Gesetz von Gay-Lussac, Kap. 3.1.3).

Beispiel 3.2.04: Erwärmung von Sauerstoff bei gleichbleibendem Volumen

Um wie viel Grad steigt die Temperatur von 2 kg Sauerstoff in einem Druckgefäß, wenn eine Wärmemenge von 10 kJ zugeführt wird?

$$Q = \Delta U = c_v \cdot m \cdot \Delta T \Leftrightarrow \Delta T = \frac{Q}{c_v \cdot m} = \frac{10^4 \text{ J}}{656 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2 \text{ kg}} = 7,62 \text{ K}$$

Die Temperatur erhöht sich um 7,62 Kelvin.

Isobare Zustandsänderung

Bei einer isobaren Zustandsänderung bleibt der **Druck konstant ($\Delta p = 0$)**. Nach dem ersten Gesetz von Gay-Lussac herrscht zwischen den beiden Zustandsgrößen **Volumen V und Temperatur T** ein **linearer Zusammenhang**.

Die innere Energie in differenzieller Form ergibt sich dann aus

$$dQ = dU = c_p \cdot m \cdot dT$$

Dabei ist c_p die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck. Für die Volumenänderungsarbeit erhält man $W = -p \cdot \Delta V = -m \cdot R_s \cdot \Delta T$.

Beispiel 3.2.05: Isobare Ausdehnung von Luft

Welches Luftvolumen wird aus einem Heißluftballon mit $3\,000\text{ m}^3$ Volumen unter Standardbedingungen (25°C , $1\,013\text{ hPa}$) verdrängt, wenn die Luft ($\rho = 1,184\text{ kg/m}^3$) im Inneren durch Verbrennung von 5 kg Propangas ohne Wärmeverlust erhitzt wird? Welche Temperatur hat dann die Luft im Ballon? Propangas hat unter Standardbedingungen einen Heizwert von $46,3\text{ MJ/kg}$.

$$\Delta T = \frac{Q}{c_p \cdot m} = \frac{Q}{c_p \cdot \rho \cdot V} = \frac{5\text{ kg} \cdot 46,3 \cdot 10^6\text{ J/kg}}{1\,005 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot 3\,000\text{ m}^3} = 64,85\text{ K}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1} \Leftrightarrow V_2 = \frac{T_2}{T_1} \cdot V_1 = \frac{363\text{ K}}{298,15\text{ K}} \cdot 3\,000\text{ m}^3 = 3\,652,5\text{ m}^3$$

Die Temperatur der Luft im Ballon beträgt $89,85^\circ\text{C}$. Aus dem Ballon werden $625,5\text{ m}^3$ Luft verdrängt.

| Brennstoff | Heizwert / $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ |
|----------------|---|
| Holz, trocken | 14,4 – 15,8 |
| Steinkohle | 27 – 32 |
| Steinkohlekoks | 28,7 |
| Benzin | 40 – 42 |
| Dieselöl | 42,5 |
| Wasserstoff | 120 |
| Erdgas | 32 – 45 |
| Propan | 46,3 |

Heizwerte bei 25°C

Isotherme Zustandsänderung

Eine isotherme Zustandsänderung erfolgt bei konstanter Temperatur ($\Delta T = 0$). Nach dem Gesetz von Boyle-Mariotte verhalten sich **Druck p und Volumen V zueinander indirekt proportional**. Da sich in diesem Fall die Temperatur und somit die innere Energie des Systems nicht verändern, erfolgt eine restlose Umwandlung der zugeführten Wärmen in mechanische Arbeit.

Schon im Kapitel 3.1.4. haben wir erfahren, dass Kompression eines Gases zu einer Erwärmung aufgrund einer inneren Reibung führt. Dies geht umso stärker vor sich, je schneller der Kompressionsvorgang ist. Umgekehrt gilt für den Grenzfall einer sehr langsamen Verdichtung, dass es nur zu einer Volumenverkleinerung und nicht zu einer Temperaturerhöhung ($\Delta T = 0$) kommt. Diesen Vorgang bezeichnet man als **quasistatisch**.

Für die Volumenänderungsarbeit ergibt sich daraus $W = -\int_{V_1}^{V_2} p \cdot dV$. Mit $p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T$ erhält man

$$W = -\int_{V_1}^{V_2} m \cdot R_s \cdot T \cdot \frac{dV}{V} = m \cdot R_s \cdot T \cdot \ln(V_1/V_2) = p \cdot V \cdot \ln(V_1/V_2)$$

dabei sind p und V zwei zusammengehörende Werte eines Zustands. In Drücken angegeben, lautet der Zusammenhang

$$W = m \cdot R_s \cdot T \cdot \ln(p_2/p_1) = p \cdot V \cdot \ln(p_2/p_1)$$

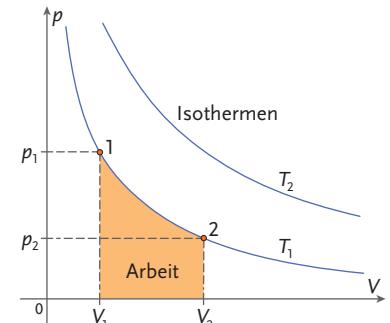
Beispiel 3.2.06: Isotherme Kompression von Luft

Wie viel Kubikmeter Luft mit einem Druck von 50 bar liefert ein Kompressor pro Stunde, wenn er bei einer effektiven Kompressionsleistung von 10 kW Umgebungsluft mit einem Druck von 1 bar ansaugt.

$$W = P \cdot t = 10\text{ kW} \cdot 3\,600\text{ s} = 36\,000\text{ kJ} = 36\text{ MJ}$$

Diese Arbeit von 36 MJ pro Stunde wird nun zur Verdichtung verwendet.

$$W = p_2 \cdot V_2 \cdot \ln(p_2/p_1) \Leftrightarrow V_2 = \frac{W}{p_2 \cdot \ln(p_2/p_1)}$$



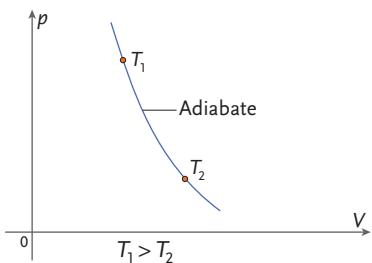
Druck-Volumen-Diagramm für isotherme Zustandsänderungen. Die Kurven gleicher Temperatur werden auch als Isothermen bezeichnet. Isothermen höherer Temperatur sind im Diagramm weiter oben.



Elektrischer **Kolbenkompressor** mit Kessel zur Speicherung der erzeugten Druckluft



Turbokompressor (vorderer Teil des Bildes) eines Flugzeugstrahltriebwerkes. Im Gegensatz zum Kolbenkompressor wird mit Schaufelrädern verdichtet. Im Aufbau ähnelt der Turbokompressor einer Kreiselpumpe.



Adiabate (Isentrope) in einem Druck-Volumen-Diagramm: Eine Zustandsänderung eines idealen Gases ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung verläuft immer entlang einer derartigen Kurve. Weiter oben liegende Punkte weisen die höhere Temperatur auf.

$$V_2 = \frac{36 \cdot 10^6 \text{ J}}{50 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot \ln(50 \cdot 10^5 \text{ Pa} / 1 \cdot 10^5 \text{ Pa})} = 4,47 \text{ m}^3$$

Es werden bei der angegebenen Leistung $4,47 \text{ m}^3$ Luft mit einem Druck von 50 bar pro Stunde generiert. Erwähnt sei, dass im Realfall der Kompressor diesen Vorgang nicht isotherm ausführt.

Adiabatische (isentrope) Zustandsänderung

Eine Zustandsänderung, die **ohne Austausch von Wärme ($\Delta Q = 0$)** verläuft, bezeichnet man als adiabatische oder isentrope Zustandsänderung. Für diesen Fall lautet der erste Hauptsatz $dU + p \cdot dV = 0$. In den Zustandsvariablen T und V ausgedrückt, lautet dieser nun: $c_v \cdot m \cdot dT + \frac{m \cdot R_s \cdot T}{V} \cdot dV = 0$. Eine Trennung der Variablen und Einsetzen für R_s liefert $-c_v \cdot \frac{dT}{T} = (c_p - c_v) \cdot \frac{dV}{V}$.

Ein Übergang von einem Zustand 1 in einen Zustand 2 ist wie folgt berechenbar:

$$\begin{aligned} -c_v \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} &= (c_p - c_v) \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} \quad \Leftrightarrow \quad -c_v \cdot \ln(T_2/T_1) = (c_p - c_v) \cdot \ln(V_2/V_1) \quad \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \quad \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{c_v} &= \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{c_p - c_v} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\frac{c_p - c_v}{c_v}} = \left(\frac{p_1 \cdot T_2}{p_2 \cdot T_1}\right)^{\frac{c_p - c_v}{c_v}} \end{aligned}$$

Die daraus resultierenden Gleichungen werden als **poissonsche Gleichungen** mit dem **Isentropenexponenten** $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$ bezeichnet.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\kappa-1} \quad \text{oder} \quad T \cdot V^{\kappa-1} = \text{konst.}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{1}{\kappa}} \quad \text{oder} \quad T \cdot p^{1-\kappa} = \text{konst.}$$

Setzt man diese beiden poissonschen Gleichungen zusammen, ergibt sich das **poissonsche Gesetz**:

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\kappa \quad \text{oder} \quad p \cdot V^\kappa = \text{konst.}$$

Der Isentropenexponent κ ist eine Materialkonstante.

Beispiel 3.2.07: Adiabatische Ausdehnung von CO₂

Eine CO₂-Patrone mit einem Druck von 60 bar bei 20 °C wird plötzlich geöffnet. Durch die Expansion des Gases auf Umgebungsdruck von 1 bar kühlt das CO₂ in der Kapsel adiabatisch (ohne Wärmeaustausch mit der Umgebung) ab. Welche Temperatur wird erreicht?

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v} = \frac{0,837}{0,647} = 1,294$$

Die Werte wurden der Tabelle der spezifischen Wärmnen aus Kap. 3.2.2 entnommen.

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \Leftrightarrow \quad T_2 = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \cdot T_1$$

$$T_2 = \left(\frac{1 \cdot 10^5 \text{ Pa}}{60 \cdot 10^5 \text{ Pa}}\right)^{0,227} \cdot 293,15 \text{ K} = 114,72 \text{ K}$$

Die Temperatur beträgt 115,73 K oder –157,4 °C.

Abbildung zu Beispiel 3.2.07:



CO₂-Patronen werden als Druckquelle beim Getränkeausschank und zum Anreichern von Getränken mit Kohlensäure verwendet. Auch zum bequemen Aufpumpen von Fahrradreifen bei einer Panne finden sie Verwendung. Zur Herstellung von Schlagobers werden 8-g-Patronen mit N₂O verwendet.

Anmerkung zu Beispiel 3.2.07: Ein rein adiabatischer Vorgang ist bei dieser erreichten Temperaturdifferenz und der Entweichdauer des Gases nicht mehr realistisch, da die Wärmeleitung proportional zum Temperaturunterschied ist. Weiters ist die Abkühlungswärme der Kapsel zu berücksichtigen.

Die **Annahme**, dass eine Volumen- oder Druckänderung eines Gases **adiabatisch** verläuft, ist nur für den Fall einer sehr guten Isolation des Reaktionsgefäßes oder bei **sehr schnellem Ablauf** der Zustandsänderung realistisch.



Ziele erreicht? – „Zustandsänderung des idealen Gases ...“

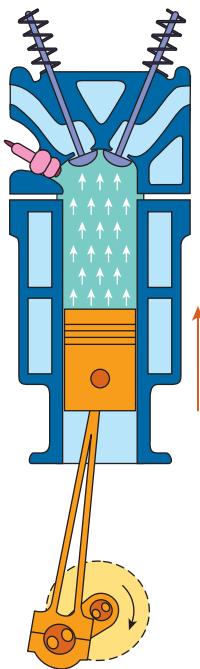
- 3.2.11 Nennen und erklären Sie die Veränderungen in den Zustandsgrößen eines idealen Gases bei isobarer, isothermer, isochorer und isentroper Zustandsänderung.
- 3.2.12 Welche Arbeit muss man aufbringen, um 20 m^3 Druckluft mit 10 bar bereitzustellen, wenn der Anfangsdruck 1 bar beträgt und die Temperatur der Luft konstant bleibt?
- 3.2.13 10 kg Luft werden isotherm auf den doppelten Anfangsdruck verdichtet. Welche Arbeit ist dazu nötig?
- 3.2.14 Aus einer 30 L fassenden Gasflasche, die unter einem Druck von 8 MPa steht, werden bei einem äußeren Luftdruck von 1 000 hPa 50 Liter Gas entnommen. Auf welchen Betrag sinkt der Druck in der Flasche?
- 3.2.15 Die Temperatur eines Gases in Grad Celsius fällt auf ein Drittel des anfänglichen Wertes, wenn sich das Volumen durch adiabatische Expansion ($\kappa = 1,3$) verdreifacht. Wie hoch sind Anfangs- und Endtemperatur?
- 3.2.16 10 kg Luft (20°C , 3 bar) werden bei konstantem Volumen erwärmt. Danach kann sich die erwärmte Luft adiabatisch ausdehnen. Dabei erreicht sie wieder die Anfangstemperatur und einen Druck von 1,5 bar. a) Wie hoch sind Druck und Temperatur nach der Erwärmung? b) Welche Wärmemenge ist zu Beginn zuzuführen?
- 3.2.17 Kohlendioxid mit einer Temperatur von 283 K wird zweistufig adiabatisch komprimiert, wobei sich der Druck jeweils verdoppelt. Welche Endtemperatur stellt sich ein?
- 3.2.18 Im Zylinder eines Ottomotors wird das angesaugte Treibstoff-Luft-Gemisch (30°C , 1 bar) auf ein Zehntel seines Volumens zusammengedrückt. Wie hoch sind der Enddruck und die Endtemperatur, wenn man eine adiabatische Verdichtung ($\kappa = 1,4$) annimmt?
- 3.2.19 Welche Leistungsaufnahme muss ein Kompressor mit einem Wirkungsgrad von 70 % aufweisen, damit er aus angesaugter Luft unter Standardbedingungen (20°C , 1 013 hPa) durch isotherme Verdichtung pro Stunde 15 m^3 Druckluft von 20 000 hPa bereitstellt?
- 3.2.20 Welche Wärmemenge muss einem Heißluftballon mit einem Volumen von $3\,200 \text{ m}^3$ unter Standardbedingungen (20°C , 1 013 hPa) mindestens zugeführt werden, damit er seine Gesamtlast von 150 kg tragen kann.
- 3.2.21 Ein nach außen wärmeisolierter Gasbehälter wird durch eine wärmeleitende Wand in zwei Volumina geteilt. Das Gas im Volumen $V_1 = 4 \text{ L}$ (molare Wärmekapazität $C_{mV_1} = 10 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$) befindet sich anfänglich bei einem Druck von $p_1 = 4 \text{ bar}$ und einer Temperatur von $T_1 = 300 \text{ K}$, das Gas im Volumen $V_2 = 2 \text{ L}$ ($C_{mV_2} = 20 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$) bei $p_2 = 2 \text{ bar}$ und



Abbildung zu Aufgabe 3.2.13:
Gasflaschen mit Manometer

Mit jeder Entnahme von Gas aus einer Druckflasche sinkt der Druck ab.

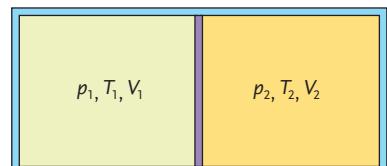
Abbildung zu Aufgabe 3.2.17:



Im Zylinder eines Verbrennungsmotors wird das Treibstoff-Luft-Gemisch durch einen Kolben verdichtet.

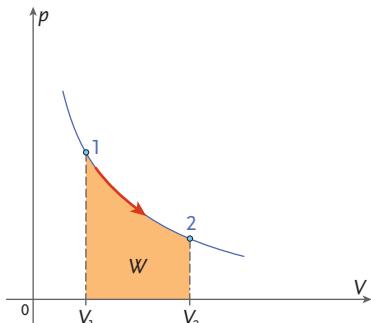
Benzinmotoren verdichten das angesaugte Gas auf etwa ein Zehntel des Anfangsvolumens.

Dieselmotoren weisen eine Verdichtung auf ein Zwanzigstel auf; die Zündung des Gemisches erfolgt durch den dabei entstehenden Temperaturanstieg.

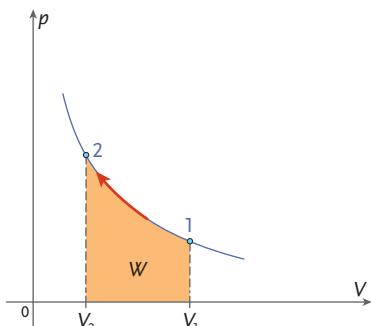


Behälterskizze zu Aufgabe 3.2.20

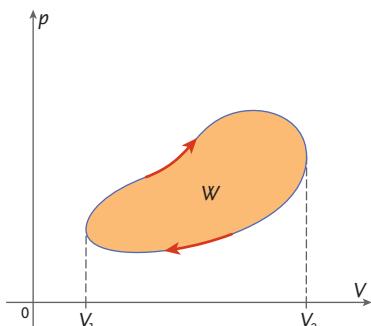
$T_2 = 600 \text{ K}$. a) Welche Temperatur stellt sich bei festgehaltener Wand ein? Wie groß sind die Drücke nach dem Temperaturausgleich? b) Welche Temperatur und welcher Druck stellen sich bei beweglicher Wand ein? Wie groß sind dann die Volumina?



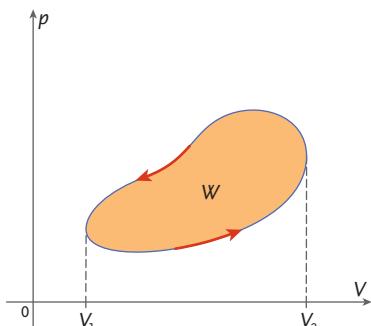
Eine Zunahme des Volumens bedeutet, dass vom System **Arbeit geleistet** wird. Diese ist gleich der Fläche unter der Kurve.



Bei Abnahme des Volumens wird vom System **Arbeit aufgenommen**



Beim Durchlauf im **Uhrzeigersinn** wird **Wärme in Arbeit** umgewandelt



Der Durchlauf im **Gegenuhzeigersinn** wandelt **Arbeit in Wärme** um

3.2.4 Kreisprozesse

Thermodynamische Kreisprozesse wurden auf theoretische Art zum ersten Mal vom französischen Offizier, Ingenieur und Physiker **Sadi Carnot** analysiert. Daher gilt er als der Begründer der Thermodynamik.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- angeben, was man unter einem **Kreisprozess** versteht;
- die von einem Kreisprozess verrichtete **Arbeit** berechnen;
- in Abhängigkeit von der **Umlaufrichtung** des Kreisprozesses die Art der Energieumwandlung erläutern.

Unter einem **Kreisprozess** verstehen wir in der Thermodynamik eine **Reihe von Zustandsänderungen**, die wieder zum ursprünglichen **Ausgangszustand** zurückführen. Dieser ist eindeutig gekennzeichnet durch die Werte der Zustandsgrößen Druck, Temperatur und Volumen. Im Kapitel 3.2.2 haben wir verschiedene Zustandsänderungen kennengelernt und in Grafiken dargestellt. Zur Visualisierung eines Kreisprozesses eignet sich aber am besten ein **Druck-Volumen-Diagramm**. In diesem Diagramm ist die vom System verrichtete Arbeit als Fläche unter der Verlaufskurve dargestellt.

Die **Volumenänderungsarbeit** ist definiert als $W = \int_{V_2}^{V_1} p(V) \cdot dV$.

Betrachten wir nun die Diagramme in der Randspalte, so sieht man, dass bei einem **Anstieg des Volumens** vom System **Arbeit verrichtet** wird (W ist **negativ**). Sinkt dagegen **das Volumen**, dann wird mechanische **Arbeit** in das System **investiert** (W ist **positiv**). Zeichnet man einen beliebig verlaufenden Kreisprozess in diesem Diagramm, dann ergibt sich die Möglichkeit, den gezeichneten Prozessverlauf auf zwei unterschiedliche Arten zu durchlaufen. Aus den vorigen Überlegungen erkennen wir, dass beim **Durchlauf im Uhrzeigersinn (rechts)** vom System **Arbeit verrichtet** wird. Beim **Durchlauf gegen den Uhrzeigersinn (links)** wird in das System mechanische **Arbeit investiert**.

Da Kreisprozesse wieder im Ausgangszustand enden, hat das System nach einem Durchlauf genau **dieselbe innere Energie wie zu Beginn**. Nach dem 1. Hauptsatz bedeutet dies, dass bei einem solchen Kreisprozess **Wärmen** mit dem System ausgetauscht werden müssen, damit die **Energiebilanz stimmt**. Die Summe der Änderungen der Wärmen und der Volumenänderungsarbeit ist die Änderung der inneren Energie. Und diese ist nach obiger Überlegung null.

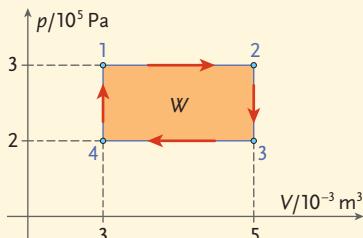
Vorrichtungen, die wiederholt solche Kreisprozesse durchlaufen, werden als **Wärmekraftmaschinen** bezeichnet. Die von der Maschine aufgenommene Wärme verursacht somit ein Verrichten von Arbeit. Es wird Wärme in Arbeit umgewandelt (z. B. Motor, Dampfmaschine). Im anderen Fall des Durchlaufs wandelt man Arbeit in Wärme um (z. B. Kühlschrank, Wärmepumpe). Es wird in den folgenden Kapiteln eine interessante Frage sein, ob diese Umwandlungen vollständig erfolgen können, d. h., ob die ganze Wärme in Arbeit wandelbar ist oder umgekehrt.

Beispiel 3.2.08: Kreisprozess eines idealen Gases

Ein ideales Gas expandiert isobar bei einem Druck von 3 000 hPa von 3 dm^3 auf 5 dm^3 . Danach erfolgt isochor eine Druckabnahme um 1 000 hPa. Dann wird wieder isobar auf 3 dm^3 komprimiert. Eine isochore Druckzunahme führt wieder zum Ausgangszustand zurück.

Wird in diesem Zyklus Arbeit aufgenommen oder verrichtet? Wie groß ist diese Arbeit?

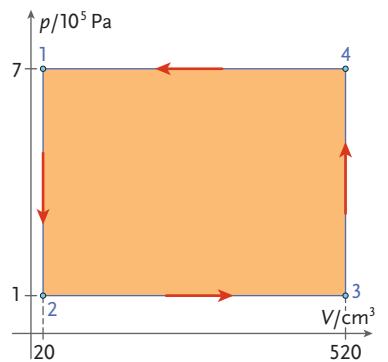
Zur Beantwortung dieser Fragen zeichnen wir zuerst das p-V-Diagramm:



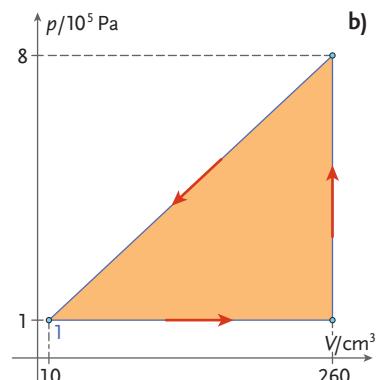
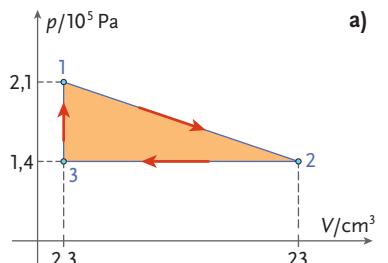
Da der Kreisprozess im Uhrzeigersinn durchlaufen wird, nimmt das Gas Wärme auf und verrichtet Arbeit. Diese entspricht der schraffierte Fläche.

$$W = 10^5 \text{ Pa} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2 \cdot 10^2 \text{ J} = 0,2 \text{ kJ}$$

Pro Durchlauf des Zyklus werden 0,2 kJ an mechanischer Arbeit geleistet.



p-V-Diagramm zur Aufgabe 3.2.22



p-V-Diagramme zur Aufgabe 3.2.23 a und b



Ziele erreicht? – „Kreisprozesse“

- 3.2.22** Skizzieren Sie einen Kreisprozess im p-V-Diagramm. Geben Sie an, was bei den beiden unterschiedlichen Umlaufrichtungen passiert.
- 3.2.23** Welche Umwandlung von Energie erfolgt im Kreisprozess in der Randspalte? Welche Leistung wird umgesetzt, wenn der Kreisprozess dreimal in fünf Sekunden durchlaufen wird?
- 3.2.24** Welche Umwandlung von Energie erfolgt in den Kreisprozessen a und b in der Randspalte? Geben Sie die Arbeit pro Umlaufzyklus an.
- 3.2.25** Berechnen Sie die Arbeit einer adiabatischen Abkühlung von Sauerstoff von 100°C auf 20°C . Der Isentropenexponent beträgt $\kappa = 1,4$.



Zu Aufgabe 3.2.24:
Für die Berechnungen zu den Zustandsänderungen siehe Kap. D, 3.2.3.

3.2.5 Carnotscher Kreisprozess

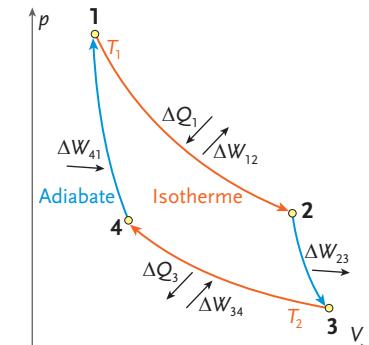
Im vorigen Kapitel wurde gezeigt, wie mithilfe eines thermodynamischen Kreisprozesses Wärme in Arbeit umwandelbar ist. Aus diesen theoretischen Überlegungen heraus lassen sich verschiedene Wärmekraftmaschinen konstruieren. Für die Optimierung einer solchen Maschine, möchte man, dass ein größtmöglicher Anteil an hineingesteckter Wärme in Arbeit umgesetzt wird.



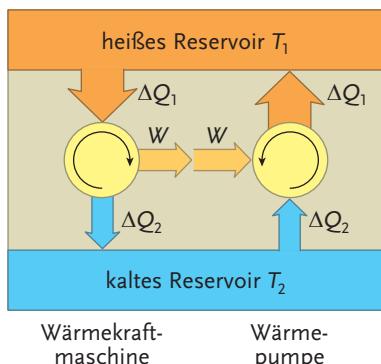
Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den schrittweisen **Ablauf** des carnotschen Kreisprozesses nennen;
- den **Wirkungsgrad** eines carnotschen Kreisprozesses errechnen;
- den Begriff eines **reversiblen** Prozesses aus der Energiebilanz des carnotschen Prozesses heraus erklären.

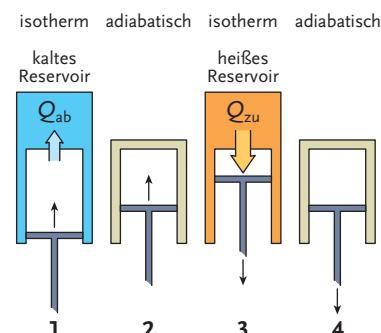


p-V-Diagramm des Carnotprozesses



Wärmebaddarstellung des Carnotprozesses.

Als **Wärmekraftmaschine** entzieht der Prozess einem heißen Reservoir Wärme, leistet Arbeit und gibt Abwärme an ein kaltes Reservoir ab. Bei einer **Wärmepumpe** wird einem kalten Reservoir unter Aufbringung von Arbeit Wärme entzogen und an ein heißes Reservoir abgegeben.



Die vier Schritte des carnotschen Kreisprozesses in einer theoretischen Realisierung mittels einer Kolbenmaschine

Der folgende Kreisprozess wurde vom französischen Physiker **Nicolas Léonard Sadi Carnot** erdacht. Er hat die Eigenschaft, dass er von allen möglichen Kreisprozessen zwischen zwei gegebenen Temperaturen des Arbeitsmediums der Prozess ist, der den höchsten Wirkungsgrad aufweist. Allerdings ist er ein rein theoretischer Prozess, der in der Praxis nur näherungsweise realisierbar ist. Unser Arbeitsmedium wird dabei wieder ein ideales Gas sein.

Der **carnotsche Kreisprozess** besteht aus einer **Abfolge von vier Zustandsänderungen**.

Erste Zustandsänderung ($1 \Rightarrow 2$): isotherme Expansion

Bei einer isothermen Zustandsänderung bleibt die Temperatur T_1 und somit auch die innere Energie konstant ($\Delta T = \Delta U = 0$). Bei der Ausdehnung muss folgende Wärme aufgenommen werden, damit das Gas nicht abkühlt:

$$Q_{zu} = m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

Da die innere Energie des Gases nicht zunimmt, muss es also Ausdehnungsarbeit im Ausmaß der zugeführten Wärme verrichten: $W_{ab} = -Q_{zu}$.

Zweite Zustandsänderung ($2 \Rightarrow 3$): adiabatische Expansion

Eine adiabatische Zustandsänderung ist dadurch gekennzeichnet, dass vom Gas keine Wärme aufgenommen wird ($\Delta Q = 0$). Somit gilt: $Q_{zu} = 0$.

Beim Verrichten von Ausdehnungsarbeit kühlt jedoch das Gas ab. Wegen

$$W_{ab} = \Delta U = c_v \cdot m \cdot \Delta T = \frac{c_p - c_v}{c_p - c_v} \cdot c_v \cdot m \cdot \Delta T = \frac{m \cdot R \cdot \Delta T}{\kappa - 1} \text{ mit } \kappa = \frac{c_p}{c_v} \text{ ergibt sich}$$

$$W_{ab} = \frac{m \cdot R}{\kappa - 1} \cdot (T_2 - T_1)$$

Dritte Zustandsänderung ($3 \Rightarrow 4$): isotherme Kompression

Dieser Schritt verläuft bei einer Temperatur T_2 analog zum Schritt von 1 nach 2 ($\Delta T = \Delta U = 0$). Diesmal gibt das Gas bei Kompression Wärme ab.

$$Q_{ab} = m \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right) \quad (\text{dieser Wert ist negativ!})$$

$$W_{zu} = -Q_{ab} \quad (\text{dieser Wert ist positiv!})$$

Vierte Zustandsänderung ($4 \Rightarrow 1$): adiabatische Kompression

Beim letzten Schritt wird das Gas ohne Wärmeabgabe ($\Delta Q = 0$) komprimiert. Es erhöht daher seine Temperatur bei einer Zufuhr von Volumenänderungsarbeit.

$$Q_{ab} = 0$$

$$W_{zu} = \frac{m \cdot R}{\kappa - 1} \cdot (T_1 - T_2)$$

Betrachtet man nun den **Übertrag von Wärmen innerhalb des gesamten Kreisprozesses**, so sieht man $|Q_{zu}| > |Q_{ab}|$ wegen $\left|m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right| > \left|m \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_4}{V_3}\right)\right|$.

Die Quotienten der Volumina in den beiden Logarithmen sind zueinander der Kehrwert (vgl. **poissonsche Gleichungen**). Gemäß der Energieerhaltung (Erster Hauptsatz) wird also ein **Teil der zugeführten Wärme in Arbeit umgewandelt**. Es tritt aber auch eine Abwärme auf, die eine restlose Umwandlung verhindert.

Wirkungsgrad des carnotschen Kreisprozesses

Der Wirkungsgrad η des Kreisprozesses (als Wärmekraftmaschine) errechnet sich aus dem Quotienten von geleisteter Arbeit und zugeführter Wärme.

$$\eta = \frac{W}{Q_{zu}} = \frac{Q_{zu} + Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right) - m \cdot R \cdot T_2 \cdot \ln\left(\frac{V_3}{V_4}\right)}{m \cdot R \cdot T_1 \cdot \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)}$$

Mit $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{\kappa-1}$ und $\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\kappa-1}$ folgt $\frac{V_3}{V_2} = \frac{V_4}{V_1}$ und $\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}$.

Setzt man dies in die obige Formel ein, erhält man für den **Wirkungsgrad des Carnotprozesses**:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Der Wirkungsgrad ist also umso höher, je niedriger die Temperatur der Abwärme und je höher die Temperatur der zugeführten Wärme ist. Würde die Abwärmtemperatur den Nullpunkt erreichen, dann hätte man einen Wirkungsgrad von 100 %.

Beispiel 3.2.09: Wirkungsgrad einer Carnotmaschine

Bei einem Verbrennungsmotor hat das zugeführte Treibstoffgemisch Umgebungstemperatur (nehmen wir 20 °C an) und die Verbrennungsabgase sind ca. 800 °C heiß. Welchen Wirkungsgrad hätte eine Carnotmaschine, die zwischen diesen beiden Temperaturen arbeitet?

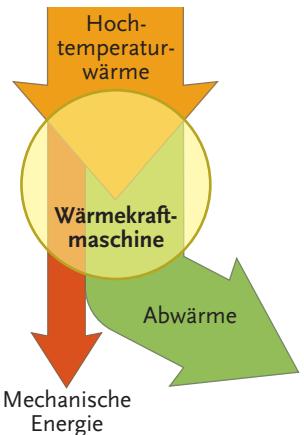
$$\eta = 1 - \frac{293,15 \text{ K}}{1\,073,15 \text{ K}} = 0,7268$$

Eine derartige Carnotmaschine hätte einen Wirkungsgrad von etwa 73 %.

Der **Carnotprozess** ist als **ideale Wärmekraftmaschine** (Umlaufsinn im p-V-Diagramm nach **rechts**) oder als **ideale Wärmepumpe** (Kältemaschine; Umlaufsinn im p-V-Diagramm nach **links**) denkbar. Bei realen Maschinen ist eine Volumenänderung mit einem gleichzeitigen vollständigen Wärmeübertrag (isotherme Zustandsänderung) in einem einzigen Arbeitsschritt nicht realisierbar.

Wir betrachten zwei in unterschiedlicher Richtung durchlaufene Carnotprozesse (Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe) zwischen den beiden gleichen Temperaturen. Dabei sehen wir, dass die Zu- und Abwärmen bzw. die Arbeit jeweils gleich sind und nur unterschiedliche Vorzeichen haben. Das bedeutet, dass man mit einer Wärmepumpe die von der Wärmekraftmaschine verursachte Veränderung des Systems restlos umkehren kann, ohne noch weiter Energie von außen zu benötigen.

Alle Vorgänge, die in einem **geschlossenen System** ablaufen und **ohne Energiezufuhr rückgängig** gemacht werden können, bezeichnet man als **reversible Prozesse**.



Energiefluss einer Wärmekraftmaschine: Je höher das Verhältnis von geleisteter Arbeit und zugeführter Wärme, desto größer ist ihr Wirkungsgrad

Eine **Wärmepumpe** entzieht unter Aufwand von Arbeit einem Medium Wärme und gibt einen Teil davon an ein System mit höherer Temperatur ab. Ein Abwärmeanteil geht ins kalte Medium zurück. Wärmepumpen werden zum Heizen verwendet.

Kältemaschinen sind auch Wärmepumpen. Dabei wird allerdings ein so gut wie möglich isoliertes System immer weiter abgekühlt und die Wärme an die wärmere Umgebung abgegeben.



Ein Kühlschrank ist eine Kältemaschine



Ziele erreicht? – „Carnotscher Kreisprozess“

3.2.26 Wie lässt sich der Wirkungsgrad einer Carnotmaschine maximieren?

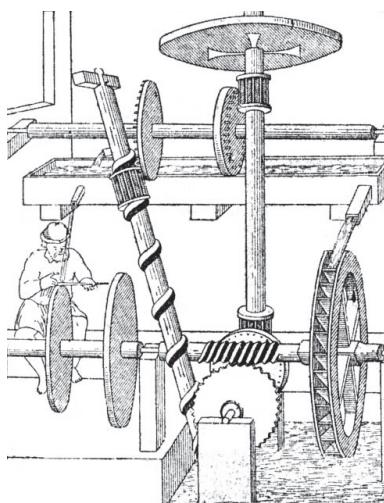
3.2.27 Berechnen Sie den Wirkungsgrad einer Carnotmaschine, die zwischen den Temperaturen von 0 °C und 1 000 °C (-100 °C und 500 °C; 10 K und 1 000 K) arbeitet.

3.2.28 Ein Carnotprozess habe einen Wirkungsgrad von 65 %. Bei 700 °C wird eine Wärmemenge von 1,8 kJ pro Zyklus zugeführt. Wie groß ist die abgegebene Wärmemenge und bei welcher Temperatur geschieht das?

3.2.29 Eine Wärmepumpe zum Heizen arbeitet mit einem umgekehrten Carnotprozess zwischen der Außentemperatur von -5 °C und der Innen-temperatur von 21 °C. Berechnen Sie den Wirkungsgrad. Errechnen Sie außerdem pro Durchlaufzyklus die Wärmemenge, die der kalten Umgebung entzogen wird, die Wärmemenge, die der warmen Umgebung zugeführt wird, und die nötige Arbeit.

3.2.6 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Perpetuum mobile: lat. „sich ständig bewegend“



Eine aus dem Mittelalter stammende Darstellung eines **Perpetuum mobile** mit Wasserrädern zum Schleifen von Werkzeugen

Seit jeher beschäftigt den Menschen die Vorstellung einer Maschine, die, einmal in Bewegung versetzt, ständig weiterläuft und dabei Arbeit verrichtet. Dieser Konstruktion wurde der Name **Perpetuum mobile erster Art** gegeben. Aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik (Energieerhaltung) wissen wir, dass in einem geschlossenen System die Energie konstant bleiben muss. Die oben beschriebene Maschine kann aufgrund der Energieerhaltung nicht funktionieren. Sie würde ja aus dem Nichts heraus ständig Arbeit leisten, also Energie produzieren.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **verschiedene Formulierungen** des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik angeben;
- die **Zustandsgröße Entropie** nennen und ihren Zusammenhang mit dem zweiten Hauptsatz und dem spontanen **Ablauen eines thermodynamischen Vorganges** erklären;
- **Temperatur-Entropie-Diagramme** interpretieren und daraus den **Wirkungsgrad eines Prozesses** berechnen.

Wesentlich interessanter ist für uns nun die Frage, ob es eine Maschine geben kann, die **Wärme vollständig in Arbeit umwandelt**. Diese Maschine wird in den Naturwissenschaften als **Perpetuum mobile zweiter Art** bezeichnet. Eine solche Maschine könnte zum Beispiel ein Fahrzeug antreiben, indem es die Umgebungsluft abkühlt, ohne Abwärme zu produzieren.

Vom zweiten Hauptsatz der Thermodynamik existieren verschiedene Formulierungen, die alle die gleiche Bedeutung haben. Im Wesentlichen schränkt der zweite Hauptsatz die nach dem ersten Hauptsatz beliebig mögliche Umwandlung von Wärme und Arbeit ein.

Aus den Überlegungen zum Perpetuum mobile zweiter Art formulierte **Lord Kelvin** das folgende **Postulat**:

Es gibt keine Maschine, die einen Kreisprozess durchläuft und dabei nichts anderes macht als ihrer Umgebung **Wärme** zu entziehen und diese **vollständig in Arbeit umzuwandeln**.

Mit dem Postulat von Kelvin gleichwertig ist das **Postulat von Clausius**:

Es gibt keine Maschine, die einen Kreisprozess durchläuft und dabei nichts anderes macht als **Wärme** einem Wärmebad zu entziehen und **an ein Wärmebad höherer Temperatur** abzugeben.



Die Tischuhr Atmos-Reutter ist ein **Schein-Perpetuum-mobile**. Schwankungen des Luftdrucks bzw. der Temperatur werden verwendet, um die Feder der Uhr aufzuziehen. Die Uhr läuft scheinbar ohne weiteres Zutun von außen.

Diese Formulierung macht deutlich, dass manche Vorgänge nur in eine Richtung ablaufen können. Wärme fließt nur von Orten hoher Temperatur zu solchen mit niedriger Temperatur und nicht umgekehrt.

Beide Formulierungen könnte man als **zweiten Hauptsatz** bezeichnen. Es gibt noch eine Reihe weiterer dazu äquivalenter Aussagen:

- Alle Carnotprozesse zwischen zwei Temperaturen T_1 und T_2 haben den gleichen Wirkungsgrad. Sonstige Kreisprozesse zwischen diesen beiden Temperaturen weisen einen **niedrigeren Wirkungsgrad** auf.
- In der Umgebung eines beliebigen thermodynamischen Zustandes existieren andere Zustände, die nicht über einen adiabatischen Prozess erreichbar sind (adiabatische Unerreichbarkeit, **Postulat von Carathéodory**).
- Es gibt eine **Zustandsgröße**, die sogenannte **Entropie**, die bei adiabatischen Prozessen nicht kleiner wird.

Alle diese Aussagen bringen letztlich zum Ausdruck, dass es in der Thermodynamik spontan ablaufende Prozesse gibt, die man nicht ohne weiteren Einsatz von Energie rückgängig machen kann.

Die letzte obige Aussage mit dem neuen Begriff Entropie soll hier noch etwas vertieft und zu einer weiteren Formulierung des zweiten Hauptsatzes ausgebaut werden.

Die Entropie

Nach den bisherigen Überlegungen lassen sich alle in einem geschlossenen System ablaufenden Vorgänge in zwei Klassen einteilen. In Prozesse die **ohne Energiezufuhr** umkehrbar sind (**reversible** Prozesse), und Prozesse, die **von selbst nur in eine Richtung** ablaufen und somit nicht umkehrbar sind (**irreversible** Prozesse). Für den Carnotprozess haben wir bereits dargelegt, dass es sich um einen reversiblen Prozess handelt. Für seinen Wirkungsgrad gilt $\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ mit den Wärmen Q_1 und Q_2 , die bei den Temperaturen T_1 und T_2 mit der Umgebung ausgetauscht werden. Daraus ergibt sich:

$$1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \Leftrightarrow \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Bei **reversiblen Kreisprozessen** ist die Summe der sogenannten reduzierten Wärmen Q/T null.

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0 \quad \text{oder infinitesimal: } \oint \frac{dQ}{T} = 0$$

Diese Erkenntnis legt die Definition einer neuen Zustandsgröße nahe.

Die **Entropie S** ist definiert als

$$S = \int \frac{dQ}{T} \quad [S] = 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Eine Änderung der Entropie lässt sich also berechnen und ausdrücken entweder differenziell als $dS = \frac{dQ}{T}$ oder als Differenz $\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$.

Der Wert der Entropie ist charakteristisch für den Zustand eines thermodynamischen Systems. Für **Zustandsänderungen des Systems** gilt:

- Bei **reversiblen** Prozessen ist $\Delta S = 0$.
- Bei **irreversiblen** Prozessen ist $\Delta S > 0$.
- ein Prozess mit $\Delta S < 0$ ist **von alleine unmöglich**. Er kann nur unter Zufuhr von Energie vorstatten gehen.

Eine der **möglichen Formulierungen des zweiten Hauptsatzes** lautet:

Der **Carnotprozess** ist der Kreisprozess mit dem **größtmöglichen Wirkungsgrad**.

Mit einem **T-S-Diagramm** lässt sich leicht zeigen, dass der Carnotprozess den optimal möglichen Wirkungsgrad aufweist. Der Wirkungsgrad eines Kreisprozesses ist definiert als

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1}$$

Die **Wärmen sind die Fläche unter den Kurven im T-S-Diagramm**, da in differenzieller Schreibweise gilt:

$$T \cdot dS = dQ$$

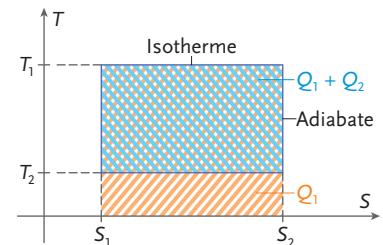
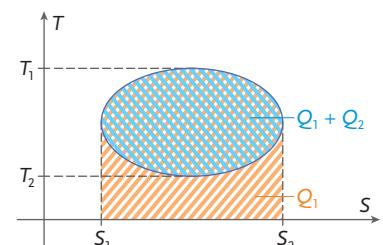


Diagramm eines Carnotprozesses mit Isothermen und Adiabaten. Entlang einer Adiabate bleibt die **Entropie konstant**, da keine Wärme ausgetauscht wird ($\Delta Q = 0$). Der resultierende Wirkungsgrad ist der Quotient aus der blau und der rot gefärbten Fläche.

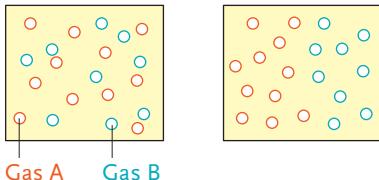


Ein Diagramm eines beliebigen Kreisprozesses zwischen denselben Temperaturen. Der Flächenquotient ist geringer als bei einem rechteckigen Verlauf. Somit hat ein rechteckiger Prozessverlauf (Carnotprozess) immer einen günstigeren Wirkungsgrad als jeder beliebige andere Kreisprozess.

Diese Erkenntnisse ermöglichen eine **weitere Formulierung des zweiten Hauptsatzes**.

Für **geschlossene** Systeme gilt: $\Delta S \geq 0$ oder
In einem abgeschlossenen System kann die Entropie **niemals abnehmen**.

Entropie und Wahrscheinlichkeit



Der links dargestellte Zustand des Gasgemisches ist **wesentlich wahrscheinlicher** als der rechts dargestellte Zustand.

Betrachten wir nun ein Gemisch aus zwei Gasen A und B auf mikroskopischer Ebene und nehmen wir an, dass für jedes Atom nur ein bestimmter Platz vorhanden wäre. Es könnte nun der Zustand eintreten, dass alle Atome A auf der linken Seite und alle Atome B ausschließlich auf der rechten Seite des Behälters wären. Es ist uns klar, dass dieser Zustand relativ unwahrscheinlich, wenn auch möglich wäre. Wesentlich wahrscheinlicher ist ein **Zustand der Unordnung**, in dem alle Atome A und B zufällig durchmischt sind.

Wir haben im vorigen Abschnitt erfahren, dass bei thermodynamischen Prozessen, die von selbst ablaufen, die **Entropie zunimmt**. Ein System nimmt aber statistisch gesehen von selbst eher einen Zustand ein, der wahrscheinlicher ist. Also ist die Entropie nicht nur ein Maß für die Ungeordnetheit eines Systems, sondern auch ein Maß für die Wahrscheinlichkeit dieses Zustandes.

Der österreichische Physiker Ludwig Boltzmann fand dafür den folgenden Zusammenhang:



LUDWIG BOLTZMANN,
1844 BIS 1906,
ÖSTERREICHISCHER PHYSIKER



Verwechseln Sie die Boltzmannkonstante k nicht mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ (siehe NAWI I/II: Wärmestrahlung)!

$$S = k \cdot \ln(W)$$

In dieser **Boltzmann-Gleichung** ist S die Entropie und W die Wahrscheinlichkeit des thermodynamischen Zustandes eines Systems. Die Konstante k hat den Wert $k = 1,380\,648\,8 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

Die Konstante k wurde von Max Planck gefunden und wird zu Ehren von **Ludwig Boltzmann** als **Boltzmannkonstante** bezeichnet. Nach dieser Sicht eines thermodynamischen Systems verlaufen irreversible Prozesse nur so lange von alleine ab, bis das System den Zustand größter Wahrscheinlichkeit erreicht hat, also den Zustand maximaler Entropie.

Für die Änderung der Entropie gilt dann:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = k \cdot \ln(W_2) - k \cdot \ln(W_1) = k \cdot \ln\left(\frac{W_2}{W_1}\right)$$

Dritter Hauptsatz der Thermodynamik

Dieser Hauptsatz wird auch als **Nernsttheorem** bezeichnet, weil er von Walther Nernst im Jahre 1906 formuliert wurde. Er besagt, dass es **nicht möglich** ist, ein **quantenmechanisches System** bis zum **absoluten Nullpunkt abzukühlen**. Er ist somit gleichwertig zur Aussage, dass der Nullpunkt der absoluten Temperatur nicht erreicht werden kann. Mit **statistischen Überlegungen** zu diesen Quantenteilchen ist diese Behauptung von Nernst nachweisbar.

Beispiel 3.2.10: Entropie von Wasser

Um welchen Wert hat die Entropie von 2 L Wasser zugenommen, wenn es von 0 °C auf 20 °C erwärmt wurde? Die spezifische Wärmekapazität von Wasser bei konstantem Druck beträgt $c_p = 4,182 \text{ kJ/(kg · K)}$.

$$\Delta S = \int_{T_1}^{T_2} \frac{dQ}{T} = c_p \cdot m \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T} = c_p \cdot m \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$$

WALThER NERNST, 1864 BIS 1941,
DEUTSCHER PHYSIKER
UND CHEMIKER

$$\Delta S = 4,182 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot 2 \text{ kg} \cdot \ln\left(\frac{293,15 \text{ K}}{273,15 \text{ K}}\right) = 591 \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

Die Entropiezunahme bei der Erwärmung beträgt 591 J/K.



Ziele erreicht? – „Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik“

- 3.2.30 Nennen Sie verschiedene Formulierungen des zweiten Hauptsatzes.
- 3.2.31 Geben Sie die Definition sowie die Einheit der Entropie an.
- 3.2.32 Welchen Zusammenhang gibt es zwischen der Änderung der Entropie und dem Verlauf der Zustandsänderung eines thermodynamischen Systems?
- 3.2.33 Berechnen Sie die Entropieänderung bei isochorer Erwärmung von 5 kg Luft von 0 °C auf 50 °C. Die spezifische Wärmekapazität von Luft beträgt $c_v = 720 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.
- 3.2.34 Erläutern Sie den Zusammenhang zwischen Entropie und Wahrscheinlichkeit des Zustandes eines Systems.
- 3.2.35 Berechnen Sie die Anfangstemperatur von Wasser, dessen Entropie sich verdoppelt, wenn die absolute Temperatur bei konstantem Druck um 30 % steigt.
- 3.2.36 Welche Menge an Wasser mit einer Temperatur von 60 °C hat bei konstantem Druck dieselbe Entropie wie 1 L Wasser bei 20 °C?
- 3.2.37 Zeigen Sie, wie der Wirkungsgrad eines thermodynamischen Kreisprozesses aus einem T-S-Diagramm grafisch ablesbar ist.
- 3.2.38 Zeigen Sie anhand eines T-S-Diagramms, warum der carnotsche Kreisprozess unter allen möglichen thermodynamischen Kreisprozessen den optimalen Wirkungsgrad aufweist.



Der zweite Hauptsatz scheint auch für die Ordnung im Kinderzimmer seine Gültigkeit zu haben. Ohne Zufuhr von Energie (Aufräumen) kann die Unordnung eines Systems (das Maß dafür ist die Entropie) nur größer werden.

3.2.7 Wärmekraftmaschinen

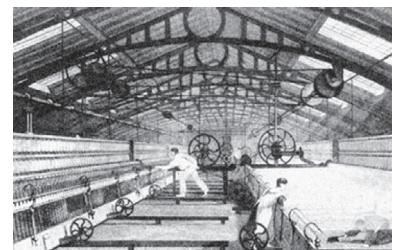
Die industrielle Revolution im 18. und 19. Jahrhundert wäre ohne die Erfindung der Dampfmaschine nicht denkbar gewesen. Maschinen übernahmen mechanische Arbeiten, die zuvor nur von menschlicher Hand verrichtet werden konnten. Die dazu nötige Arbeit lieferten Wärmekraftmaschinen, allen voran die Dampfmaschine. In der Mitte des 19. Jahrhunderts entwickelte **Nicolaus Otto** den ersten verwendungsauglichen Verbrennungsmotor.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

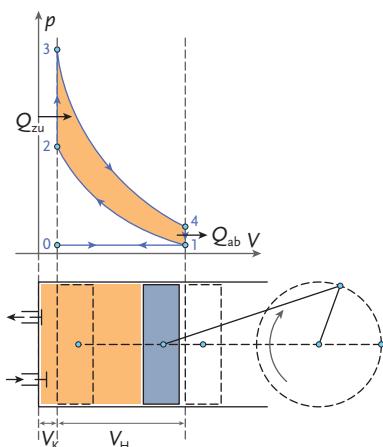
- die Begriffe **Wärmekraftmaschine** und **Kraftwärmemaschine** sowie den Umlaufsinn der thermodynamischen Prozesse dieser Maschinen erläutern;
- verschiedene **Wärmekraftmaschinen** nennen und ihre **Arbeitszyklen** detailliert erklären;
- den **Wirkungsgrad eines Ottomotors** herleiten und berechnen.



Englische Baumwollspinnerei um 1835. Die Industrialisierung ermöglichte es, dass weniger Menschen in kürzerer Zeit mehr Waren erzeugten.



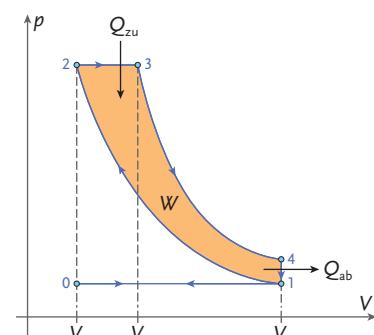
Fertigung eines Verbrennungsmotors für ein Kraftfahrzeug



Arbeitsprozess eines Ottomotors (p-V-Diagramm und Kolbenweg)



Zündkerze für einen Ottomotor. Ein Hochspannungsimpuls lässt einen Funken zwischen den Elektroden rechts unten überspringen, der das Gemisch zündet.



Arbeitsprozess eines Dieselmotors

Als **Wärmekraftmaschine** bezeichnet man jede Art von Maschine, die Wärme in mechanische Arbeit umwandelt. Alle Formen von Verbrennungsmotoren und Turbinen sind Beispiele für Wärmekraftmaschinen. Im p-V-Diagramm sind die Kreisprozesse solcher Maschinen **rechtslaufend**, also Prozesse, die im Uhrzeigersinn durchlaufen werden.

Maschinen, die unter einem Aufwand von mechanischer Arbeit Wärme von einem Bereich niedriger zu einem Bereich hoher Temperatur transportieren, werden als **Kraftwärmemaschinen** bezeichnet. Dies sind alle Arten von Wärmepumpen und Kältemaschinen. Kraftwärmemaschinen haben im p-V-Diagramm einen **linkslaufenden** Kreisprozess.

Häufig wird aber auf die oben erklärte Unterscheidung nicht so sehr geachtet und alle diese Maschinen, die eine Umwandlung von Wärme in Arbeit und umgekehrt bewerkstelligen, werden pauschal Wärmekraftmaschinen genannt.

Der Ottomotor

Dieser Verbrennungsmotor wurde von **Nicolaus Otto** entwickelt und 1876 patentiert. Er verwendet zu seinem Betrieb in **vier Arbeitstakten** ein Gemisch aus Luft und Treibstoff, das in einem Zylinder gezündet und verbrannt wird. Der Prozess des **idealen Ottomotors** läuft wie folgt ab:

- **Erster Takt:** Der Zylinder füllt sich in einem Kolbenhub mit Luft, der über den Vergaser Treibstoff zugemischt wird (0 – 1). In modernen Motoren wird der Treibstoff in der richtigen Menge in die zugeführte Luft eingespritzt.
- **Zweiter Takt:** Das Gemisch wird **adiabatisch** im Zylinder **verdichtet** (1 – 2) und **isochor** über eine Zündkerze elektrisch **gezündet** (2 – 3).
- **Dritter Takt:** **adiabatische Ausdehnung** des gezündeten Gemisches in einem Kolbenhub (3 – 4; Arbeitstakt).
- **Vierter Takt:** Öffnen des Auslassventils (4 – 1; **isochorer Gasausstoß**) und Ausstoßen der restlichen Verbrennungsgase durch einen Kolbendruck (1 – 0; Auspufftakt).

Für die zu- bzw. abgeföhrten Wärmen bei den isochoren Zustandsänderungen gilt $Q_{zu} = m \cdot c_v (T_3 - T_2) > 0$ und $Q_{ab} = m \cdot c_v \cdot (T_1 - T_4) > 0$. Dabei ist c_v die spezifische Wärmekapazität des Treibstoffgemisches bei konstantem Volumen. Für den Wirkungsgrad η des Motors ergibt sich daraus:

$$\eta = \frac{Q_{zu} + Q_{ab}}{Q_{zu}} = \frac{T_3 - T_2 + T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

Mit dem Verdichtungsverhältnis r des Motors gilt für die Temperaturen auf den Adiabaten $T_1 \cdot (r \cdot V)^{\kappa-1} = T_2 \cdot V^{\kappa-1}$ sowie $T_4 \cdot (r \cdot V)^{\kappa-1} = T_3 \cdot V^{\kappa-1}$. Setzt man dies in die obige Formel ein, so ergibt sich daraus für den Wirkungsgrad:

$$\eta = \frac{T_4 \cdot r^{\kappa-1} - T_1 \cdot r^{\kappa-1} + T_1 - T_4}{T_4 \cdot r^{\kappa-1} - T_1 \cdot r^{\kappa-1}} = \frac{(T_4 - T_1) \cdot (r^{\kappa-1} - 1)}{(T_4 - T_1) \cdot r^{\kappa-1}} = \frac{r^{\kappa-1} - 1}{r^{\kappa-1}} = 1 - \frac{1}{r^{\kappa-1}}$$

Mit den realistischen Werten $r = 8$ und $\kappa = 1,4$ (Luft) erhält man für einen Ottomotor einen idealen Wirkungsgrad von $\eta = 0,56 = 56\%$. Der reale Wirkungsgrad eines Ottomotors beträgt jedoch maximal 40 %.

Der Dieselmotor

Dieser Verbrennungsmotor arbeitet nach einem von **Rudolf Diesel** 1892 entwickelten Prozess. Der Unterschied zum Ottomotor ist die Selbstzündung des in die Luft eingespritzten Treibstoffes durch Verdichtung des Gemisches. Der Prozess des **idealen Dieselmotors** läuft wie folgt ab:

- **Erster Takt:** Der Zylinder füllt sich in einem Kolbenhub mit Luft (0 – 1), der Treibstoff wird eingespritzt.

- **Zweiter Takt:** Das Gemisch wird adiabatisch im Zylinder verdichtet (1 – 2). Die Zündung erfolgt durch die hohe Verdichtung des Gemisches bei hohen Temperaturen im Zylinder. Die Glühkerze dient nur zum Heizen des Zylinders beim Kaltstart, eine Zündkerze wie beim Ottomotor ist nicht nötig.
- **Dritter Takt:** isobare Verbrennung (2 – 3) und adiabatische Ausdehnung in einem Kolbenhub (3 – 4; Arbeitstakt).
- **Vierter Takt:** Öffnen des Auslassventils (4 – 1) und Ausstoßen der Verbrennungsgase durch einen Kolbendruck (1 – 0; Auspufftakt).

Eine Berechnung des Wirkungsgrades eines idealen Dieselmotors ist deutlich aufwendiger als beim Ottomotor. Führt man diese Berechnungen durch und nimmt ein Verdichtungsverhältnis r von 15 bis 20 an sowie $\kappa = 1,4$ (Luft) an, dann erhält man einen Wirkungsgrad η von 65 % bis 70 %. Der Wirkungsgrad eines realen Dieselmotors beträgt jedoch maximal 50 %. Die Konstruktion eines Dieselmotors ist jedoch aufwendiger als die eines Ottomotors und daher kommen seine Anschaffung und Wartung teurer.



Für Nutzfahrzeuge werden meist Dieselmotoren aufgrund der Wirtschaftlichkeit bei hoher Kilometerleistung verwendet

Die Wärmepumpe

Ideale Wärmepumpen verwenden zum Wärmetransport den umgekehrten carnotschen Kreisprozess. Das reale Gerät kann jedoch die Kompression und Ausdehnung des Arbeitsfluids nicht rein adiabatisch, also ohne Wärmetausch mit der Umgebung, vornehmen. Es ist nicht sinnvoll, den Wirkungsgrad des Carnotprozesses als Wärmekraftmaschine für die Wärmepumpe zu übernehmen. Sinnvoller ist es, eine **Leistungszahl (COP: Coefficient of Power)** ε_{WP} wie folgt zu definieren:

$$\varepsilon_{WP} = \frac{Q_h}{W_{mech}} < \frac{T_h}{T_h - T_n}.$$

Dabei ist Q_h die Wärmeabgabe auf dem hohen Temperaturniveau, W_{mech} die geleistete Arbeit und T_h , T_n die jeweilige Temperatur auf hohem und niedrigem Niveau. Wärmepumpen arbeiten mit einer kalten Flüssigkeit, die bei niedrigem Druck unter Wärmeentzug der Umgebung verdampft. Nach Verdichtung durch einen Kompressor kondensiert der Dampf wieder bei höherem Druck und gibt Wärme an ein geschlossenes System mit höherer Temperatur ab. Danach wird hinter einem Expansionsventil (Drossel) der Druck der Flüssigkeit vermindert und diese dadurch wieder abgekühlt. Auf diese Weise beginnt der Arbeitszyklus wieder von vorne.

Eine **Wärmepumpe** dient also zu **Heizungszwecken**, indem der **kälteren Umgebung Wärme entzogen** und diese unter Arbeitsaufwand, in der Regel durch einen strombetriebenen Kompressor, **an das zu heizende System abgegeben** wird.

Wärmepumpen sind in der Regel energieeffizienter als herkömmliche Heizungen. Allerdings hängt ihr Wirkungsgrad stark von der Temperaturdifferenz des Wärmerveservoirs von den zu heizenden Räumen ab, schwankt also mit den Jahreszeiten. Der Nachteil der Wärmepumpe liegt lediglich im hohen Aufwand für das Gerät.



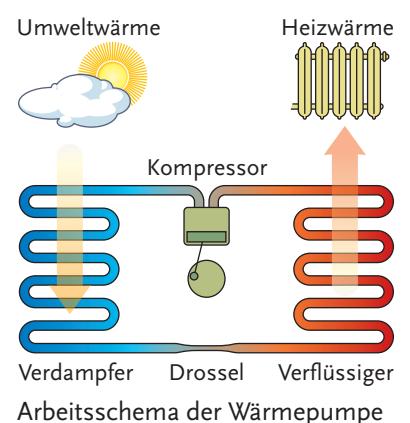
Wärmepumpe in einem Fernheizwerk zur Nutzung industrieller Abwärme

Beispiel 3.2.11: Ideale Leistungszahl (COP) einer Wärmepumpe

Wir berechnen die ideale Leistungszahl einer Wärmepumpe, die bei einer Temperatur des Wärmespeichers (z. B. des Erdreichs) von 10 °C einen Raum auf 20 °C erwärmen soll. Um einen ausreichenden Wärmeübertrag zu gewährleisten, nehmen wir dabei eine Vorlauftemperatur des Heizkreislaufes von 30 °C an.

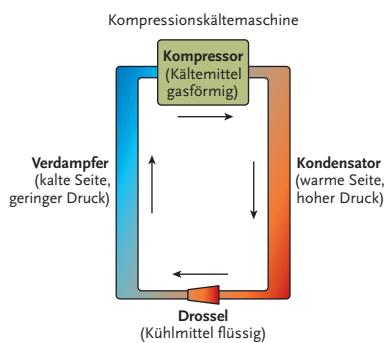
$$\varepsilon_{KM} = \frac{T_h}{T_h - T_n} \approx \frac{303 \text{ K}}{303 \text{ K} - 283 \text{ K}} = 15,2$$

Dieser COP-Wert besagt, dass für den Entzug einer Wärmemenge Q nur etwa 1/15 von Q an mechanischer Arbeit des Kompressors nötig ist. Real werden derzeit nur Werte bis **maximal 7** erreicht.





Klimaanlage für Außenmontage



Arbeitsschema der Klimaanlage

Die Kältemaschine

Eine ideale Kältemaschine arbeitet wie die Wärmepumpe mit einem umgekehrten Carnotprozess. Die **Kältemaschine** ist dieselbe Konstruktion wie die Wärmepumpe. Es wird in diesem Fall einem so gut wie möglich **abgeschlossenen System Wärme entzogen** und diese **an die Umgebung abgegeben**. Auf diese Art wird das geschlossene System abgekühlt. Da der Arbeitsbereich der Maschine nun das niedrige Temperaturniveau ist, gilt für die Leistungszahl

$$\varepsilon_{KM} = \frac{Q_n}{W_{mech}} < \frac{T_n}{T_h - T_n}.$$

Die Kältemaschine findet ihre Hauptanwendung in Kühlgeräten und Klimaanlagen. Die im Haushalt verwendeten Kühlschränke haben lange Zeit **FCKW**-haltige Kältemittel verwendet. Diese Fluorchlorkohlenwasserstoffe sind ökologisch sehr bedenklich, da sie bei Freisetzung in die Atmosphäre die Ozonschicht der Erde abbauen. Diese dient als natürlicher Filter für den schädlichen UV-Anteil der Sonnenstrahlung. Seit Mitte der 1990er-Jahre werden daher bevorzugt Isobutan und Tetrafluorethan als Kältemittel verwendet.

Beispiel 3.2.12: Ideale Leistungszahl (COP) eines Kühlschranks

Wir berechnen die ideale Leistungszahl eines Kühlschranks, der bei einer Außentemperatur von 20 °C die Lebensmittel auf 4 °C abkühlt. Wir nehmen für ausreichenden Kälteübertrag eine Temperatur von –10 °C für den Kühlkreislauf an.

$$\varepsilon_{KM} = \frac{T_n}{T_h - T_n} \approx \frac{263 \text{ K}}{293 \text{ K} - 263 \text{ K}} = 8,8$$

Dieser Wert für den COP besagt, dass für den Entzug einer Wärmemenge Q nur etwa 1/9 von Q an mechanischer Arbeit des Kompressors nötig ist. Real ist ein Wert von **maximal 4**.

Im Vergleich mit Beispiel 3.2.12 sieht man, dass die realen COP-Werte etwa die Hälfte der idealen Werte betragen.



Ziele erreicht? – „Wärmekraftmaschinen“

- 3.2.39** Erläutern Sie die Funktion von Wärmekraftmaschinen bzw. von Kraftwärmemaschinen durch den Umlaufsinn des thermodynamischen Arbeitsprozesses.
- 3.2.40** Nennen Sie verschiedene Wärmekraftmaschinen.
- 3.2.41** Erläutern Sie detailliert den Arbeitszyklus eines Ottomotors. Geben Sie den idealen und den realen Wirkungsgrad an.
- 3.2.42** Erläutern Sie detailliert den Arbeitszyklus eines Dieselmotors. Geben Sie den idealen und den realen Wirkungsgrad an. Worin besteht der Unterschied zum Ottomotor?
- 3.2.43** Erklären Sie den Arbeitszyklus einer Wärmepumpe bzw. einer Kältemaschine. Wie ist der COP-Wert definiert?

4 Elektrodynamik

4.1 Elektromagnetische Induktion

Elektrische Energie ist neben dem Erdöl die wichtigste Energieform unserer modernen Gesellschaft. Ein Leben ohne die Vielzahl unserer elektrisch betriebenen Geräte ist fast nicht mehr vorstellbar. Strom wird, egal ob in Wasser-, Wärme- oder Atomkraftwerken, zum größten Teil mit Generatoren aus mechanischer Arbeit gewonnen. Diese Generatoren arbeiten nach dem Prinzip der Induktion.

4.1.1 Magnetfeld und Leiterschleife

Michael Faraday entdeckte 1831 die elektromagnetische Induktion. Er versuchte das Prinzip des Elektromagneten (ein Stromfluss erzeugt ein Magnetfeld) umzukehren (ein Magnetfeld erzeugt Strom).



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- das **Induktionsgesetz** angeben;
- die Größe einer auftretenden **Induktionsspannung** berechnen;
- erklären, von welchen **Faktoren die Induktionsspannung abhängt**.

Versuch 4.1.01: Magnetfeld in einer Spule

Wir schließen die Enden von Spulen mit unterschiedlicher Wicklungsanzahl an ein Voltmeter an. Danach werden Stabmagnete verschiedener Stärke in die Spule eingebbracht. Wir stellen Folgendes fest:

- Befindet sich der Magnet in der Spule in Ruhe, tritt keine Spannung auf.
- Wird der Magnet in der Spule bewegt, messen wir einen Spannungsstoß.
- Die **Polarität** des auftretenden Spannungsstoßes hängt von der **Bewegungsrichtung** des Magnets ab.
- Mit der Anzahl der Wicklungen steigt die Höhe des Spannungsstoßes.

Die im Versuch 4.1.01 beobachtete Spannung nennen wir die **Induktionsspannung** des Magnetfeldes. Sie hängt von der Stärke der Änderung des magnetischen Flusses Φ durch die Windungen der Spule ab ($U_{\text{ind}} \sim \Delta\Phi$). Je schneller die Änderung des Flusses vor sich geht, umso größer ist die auftretende Induktionsspannung ($U_{\text{ind}} \sim 1/\Delta t$). Auch die Anzahl N der Spulenwicklungen spielt eine Rolle ($U_{\text{ind}} \sim N$). Aus dem Versuch ergibt sich empirisch das Induktionsgesetz.

Induktionsgesetz

$$|U_{\text{ind}}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta(B \cdot A)}{\Delta t} \quad \text{für eine Leiterschleife}$$

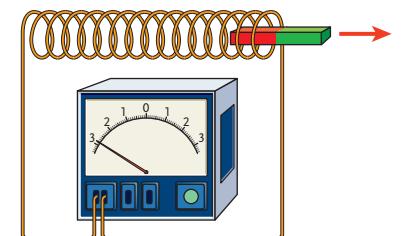
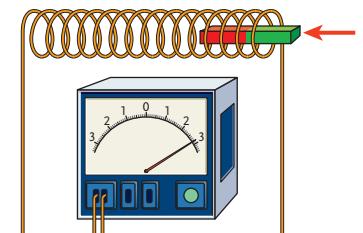
$$|U_{\text{ind}}| = N \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{für eine Spule mit } N \text{ Windungen}$$

sowie **in differenzierlicher Form**: $|U_{\text{ind}}| = \frac{d\Phi}{dt}$ bzw. $|U_{\text{ind}}| = N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$

Für die Induktion ist es egal, ob sich der Magnet bewegt oder die Leiterschleife. Die durch die Änderung des magnetischen Flusses in der Spule verursachte Induktionsspannung bewirkt einen Induktionsstrom. Wie wir aus NAWI I/II wissen, führt ein Stromfluss wiederum zum Aufbau eines Magnetfeldes um den Leiter. Es tritt



Dampfmaschinenbetriebener Generator aus dem Jahre 1910 für die Stromerzeugung einer Fabrik



Aufbau des Versuchs 4.1.01



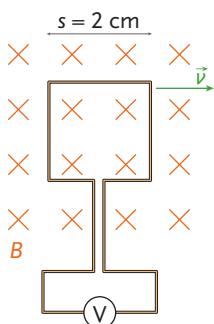
Die Grundlagen des Magnetismus siehe NAWI I/II, Kap. Magnetismus: $\Phi = B \cdot A$

B ist die magnetische Flussdichte und A die Fläche, die von der Flussdichte durchdrungen wird.

$[B] = 1 \text{ Tesla (1 T)}$
 $[\Phi] = 1 \text{ Weber (1 Wb)}$



MICHAEL FARADAY,
1791 BIS 1867, ENGLISCHER
NATURWISSENSCHAFTER



Skizze zu Beispiel 4.1.01

eine Kraftwirkung zwischen dem verursachenden Magnetfeld und dem Feld des induzierten Stromes auf. Diese Kraftwirkung werden wir in den folgenden Kapiteln näher betrachten.

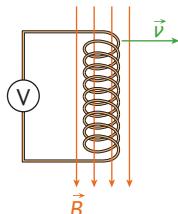
Beispiel 4.1.01: Bewegte Leiterschleife im Magnetfeld

Wir bewegen eine quadratische Leiterschleife (siehe Randspalte) mit einer Seitenlänge von $s = 2 \text{ cm}$ mit einer konstanten Geschwindigkeit von $v = 1 \text{ m/s}$ senkrecht durch ein begrenztes homogenes Magnetfeld der Stärke $B = 0,3 \text{ T}$. Welche Induktionsspannung tritt beim Herausziehen der Leiterschleife aus dem Magnetfeld auf?

Während sich die Leiterschleife **im homogenen Feld** bewegt, ändert sich der Fluss durch die Schleife nicht. Somit tritt **keine Induktionsspannung** auf.

Erst beim **Herausziehen** ändert sich der Fluss durch die Schleife. Wir erhalten für die Induktionsspannung

$$U_{\text{ind}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot s^2}{s/v} = B \cdot v \cdot s = 2 \text{ T} \cdot 1 \text{ m/s} \cdot 0,03 \text{ m} = 0,06 \text{ V}$$



Skizze zu Aufgabe 4.1.02: Spule im Magnetfeld

Ziele erreicht? – „Magnetfeld und Leiterschleife“

- 4.1.01** Wie groß ist die Induktionsspannung in einer Leiterschleife mit einer Fläche von 10 cm^2 , wenn sich die senkrecht darauf stehende magnetische Flussdichte in $0,4 \text{ s}$ um $0,9 \text{ T}$ ändert?
- 4.1.02** Eine Spule mit 1 300 Windungen wird von einem magnetischen Fluss von $0,01 \text{ Wb}$ (Weber) durchdrungen. Die Spule wird innerhalb von $0,5 \text{ s}$ mit konstanter Geschwindigkeit aus dem magnetischen Fluss herausgezogen. Wie groß ist die auftretende Induktionsspannung?
- 4.1.03** Die Leiterschleife aus Beispiel 4.1.01 wird einmal aus dem Magnetfeld herausgezogen und danach wieder hineinbewegt. Warum haben die Zeigerausschläge des Voltmeters unterschiedliche Vorzeichen?

4.1.2 Lenzsche Regel; allgemeines Induktionsgesetz

Die japanische JR-Maglev-Magnetschwebebahn verwendet für den Fahrbetrieb das elektrodynamische Schwebesystem (EDS). Dabei werden durch Induktion magnetischer Wechselfelder in supraleitenden Spulen die Fahrzeuge erst ab einer bestimmten Geschwindigkeit über die Schienen angehoben.

Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **lenzsche Regel** und das **allgemeine Induktionsgesetz** angeben;
- die **Induktionsspannung** in Leiterschleifen und bewegten Leitern berechnen;
- das **Auftreten** und die **Wirkungen von Wirbelströmen** erklären.

Versuch 4.1.02: Kraftwirkung eines Magneten auf eine Spule

Eine kurzgeschlossene Spule wird an einem Faden aufgehängt. Schiebt man einen Stabmagnet berührungslos in die Spule hinein, wird sie abgestoßen. zieht man den Magnet berührungslos heraus, kann man sehen, dass die Spule angezogen wird.

Die Änderung des magnetischen Flusses durch die Spule in Versuch 4.1.02 führt, wie wir im vorigen Kapitel gesehen haben, zur Induktion einer Spannung durch die Spule. Damit verbunden ist ein Stromfluss, der seinerseits ein Magnetfeld aufbaut. Dadurch kommt es zu einer Kraftwirkung zwischen Spule und Magnet. Aus dem Versuch sieht man, dass die Induktionsspannung versucht, den aktuellen magnetischen Fluss durch die Spule beizubehalten.

Wird der Magnet der Spule angenähert, weicht die Spule dem auftretenden Fluss aus. Wird der Magnet herausgezogen, versucht die Spule, den Fluss beizubehalten, und zieht mit. 1833 formulierte Emil Lenz zum ersten Mal diese beobachtete Gesetzmäßigkeit.

Lenzsche Regel

Der durch eine Induktionsspannung verursachte Strom ist so gerichtet, dass er der Änderung des Magnetfeldes entgegenwirkt.

Bisher haben wir beim Induktionsgesetz noch keine Richtung der Induktionsspannung angegeben. Aus der lenzschen Regel ergibt sich nun das allgemeine Induktionsgesetz.

Allgemeines Induktionsgesetz

$$U_{\text{ind}} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{für eine Leiterschleife}$$

$$U_{\text{ind}} = -N \cdot \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} \quad \text{für eine Spule mit } N \text{ Windungen}$$

Versuch 4.1.03: Thomsonsche Kanone

Ein Eisenkern wird so in einer Netzspule befestigt, dass ein Ende über die Spule herausragt. Über dieses Ende des Eisenkerns wird ein loser Aluminiumring geschoben. Beim Einschalten des Stromes durch die Spule wird der Ring vom Kern geschossen.

Bei der thomsonischen Kanone wird durch das Einschalten eines starken Magnetfeldes nach der lenzschen Regel im Aluminiumring ein Stromfluss induziert, der gegen das eingeschaltete Feld gerichtet ist. Da der Aluminiumring sehr leicht ist, wird er vom Eisenkern geschleudert.

Bewegter Leiter im Magnetfeld

Im Folgenden betrachten wir nur ein Verschieben einer Seite der Leiterschleife im Magnetfeld und nicht das Herausziehen einer quadratischen Leiterschleife aus einem Magnetfeld.

Durch Bewegung einer Seite der Schleife in einer Zeit Δt um eine Länge Δs tritt eine Veränderung der Fläche innerhalb der Leiterschleife bei konstantem Magnetfeld ein. Daraus ergibt sich eine Änderung des Flusses $\Delta \Phi = B \cdot \Delta A$ durch die Leiterschleife. Es folgt daraus eine Induktionsspannung

$$|U_{\text{ind}}| = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = \frac{B \cdot \Delta A}{\Delta t} = \frac{B \cdot s \cdot \Delta s}{\Delta t} = B \cdot s \cdot v \quad \text{mit der Geschwindigkeit } v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Wir erhalten also für die **Induktionsspannung** in einem **bewegten Leiter**

Allgemeines Induktionsgesetz

$$|U_{\text{ind}}| = B \cdot l \cdot v \quad \text{mit der Länge } l \text{ des Leiters und seiner Geschwindigkeit } v \text{ senkrecht zum Magnetfeld } B$$



EMIL LENZ, 1804 BIS 1865,
DEUTSCHBALTISCHER PHYSIKER

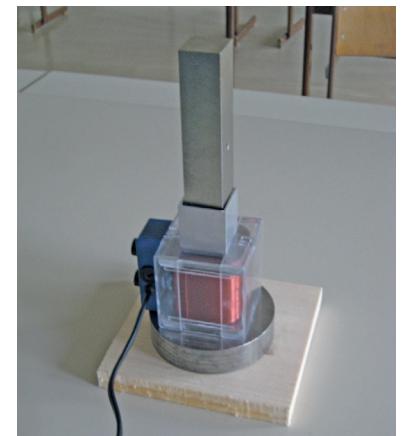
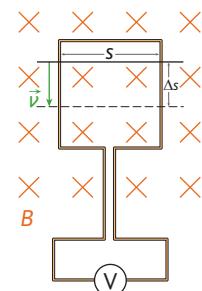
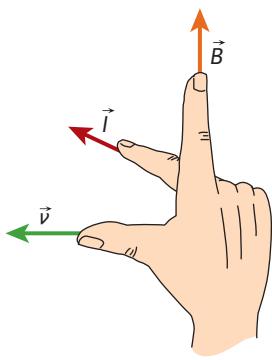


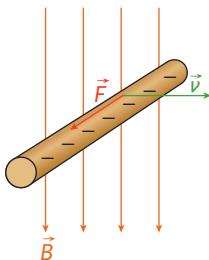
Abbildung zu Versuch 4.1.03:
Thomsonsche Kanone



Skizze zu bewegtem Leiter im
Magnetfeld



Rechte-Hand-Regel für die Richtung des Induktionsstroms



Die Lorentzkraft wirkt auf Elektronen im bewegten Leiter:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

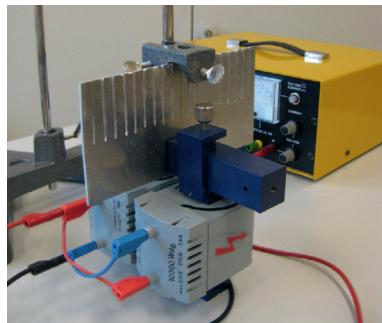


Abbildung zu Versuch 4.1.04: Waltenhofensches Pendel



Bei qualitativ hochwertigen Ergometern wird die Bremswirkung meist durch eine Wirbelstrombremse erzielt.

Diese Formel gilt nur, wenn der Leiter senkrecht zu den magnetischen Feldlinien bewegt wird. Die **Richtung des Stromes** ergibt sich aus der **Rechte-Hand-Regel** für die Induktion (siehe Randspalte).

Schließen die Geschwindigkeitsrichtung und die Feldlinien einen Winkel φ ein, lässt sich obige Regel für die Induktionsspannung schreiben als

$$U_{\text{ind}} = I \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad \text{oder betragmäßig} \quad U_{\text{ind}} = I \cdot v \cdot B \cdot \sin(\varphi)$$

Das Auftreten einer Induktionsspannung bei Bewegung eines stabförmigen Leiters durch ein Magnetfeld lässt sich einfach durch die aus NAWI I/II bekannte Lorentzkraft erklären. Ein elektrischer Leiter enthält frei bewegliche Elektronen. Werden die Elektronen mit dem Leiter **durch ein Magnetfeld bewegt**, wirkt auf sie die **Lorentzkraft**. Die Elektronen werden **an ein Ende des Leiters gedrückt**. Dort herrscht Elektronenüberschuss, am anderen Ende Elektronenmangel. Dies verursacht eine elektrische Spannung zwischen den Enden des Leiterstabes.

Beispiel 4.1.02: Induktion in einem bewegten Leiter

Ein Metallstab wird auf zwei parallelen Leitern, die einen Abstand von 7 cm haben, bewegt, und zwar mit einer Geschwindigkeit von 3 m/s senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes mit einer Flussdichte von 1,3 T. Wie groß ist die im Metallstab induzierte Spannung?

$$U_{\text{ind}} = B \cdot l \cdot v = 1,3 \text{ T} \cdot 0,07 \text{ m} \cdot 3 \text{ m/s} = 0,273 \text{ V}$$

Wirbelströme

Versuch 4.1.04: Waltenhofensches Pendel

Ein Pendel mit einer elektrisch leitenden Metallplatte schwingt zwischen den Polen eines Elektromagneten. Schaltet man den Strom durch den Elektromagnet ein, wird das Pendel rasch gebremst.

Im Versuch 4.1.04 wird eine elektrisch leitende Metallplatte durch ein Magnetfeld bewegt. Dadurch werden kreisförmige Ströme (Ring- oder Wirbelströme) induziert, die nach der lenzschen Regel der Änderung des äußeren Magnetfeldes entgegengerichtet sind. Schneidet man in die Metallplatte Schlitze, ist die Bremswirkung des Magnetfeldes deutlich gemindert, da die Wirbelströme nicht ungehindert fließen können.

Bewegt man einen **leitenden Körper** durch ein **Magnetfeld**, dann werden **Wirbelströme** induziert. Aufgrund des **ohmschen Widerstandes** des Leiters wird dieser durch die **fließenden Kreisströme erwärmt**. Das wiederum führt zu einem **Verlust an Bewegungsenergie**.

Dieses Prinzip wird zu **Bremszwecken** (Wirbelstrombremse) in Fahrzeugen und Fitnessgeräten, in Strommessgeräten (Ferrariszähler) aber auch zur **zerstörungsfreien Materialprüfung** angewendet.

Eine weitere sehr gängige Anwendung ist das **Induktionskochfeld** moderner Elektroherde. Unterhalb der Glaskeramik des Kochfeldes befindet sich eine Spule, die ein wechselndes Magnetfeld erzeugt. Die Glaskeramik des Kochfeldes erhitzt sich dadurch nicht. Zum Kochen ist nur ein elektrisch leitender Metallkochtopf (Aluminium oder Kupfer) nötig. Ein besonders hoher Wirkungsgrad wird mit Töpfen aus ferromagnetischem Metall erreicht. Im Boden des Kochtopfes sorgen Ringströme und der Widerstand des Topfmaterials für die Erhitzung des Topfes und des Kochgutes. Zu beachten ist aber, dass nach längerer Kochzeit das Kochfeld sehr heiß wird. Der Grund dafür ist der Kontakt mit dem stark erhitzten Boden des Topfes.



Ziele erreicht? – „Lenzsche Regel; allgemeines ...“

- 4.1.04** Ein 12 cm langer gerader Leiter wird mit 15 m/s senkrecht zu einem Magnetfeld mit $B = 0,8 \text{ T}$ bewegt. Berechnen Sie die auftretende Induktionsspannung.
- 4.1.05** Ein Leiter ($l = 8 \text{ cm}$) wird in einem Winkel von 60° zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfeldes ($B = 1 \text{ T}$) mit 5 m/s bewegt. Welche Induktionsspannung tritt zwischen seinen Enden auf?
- 4.1.06** Ein 10 cm langer gerader Leiter wird mit 25 m/s senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfelds bewegt. Berechnen Sie die magnetische Flussdichte, wenn die Induktionsspannung 0,5 V beträgt.
- 4.1.07** Erklären Sie detailliert das Funktionsprinzip eines Induktionsherdes. Wird Geschirr aus Plastik oder Glas auf diesem Herd erhitzt? Begründen Sie Ihre Antwort.
- 4.1.08** Lassen Sie einen sehr starken Magnet durch ein Aluminiumrohr (elektrisch leitend, nicht magnetisierbar) fallen. Schildern und erklären Sie Ihre Beobachtung. Als Alternative kann man auch ein Kupferrohr oder eine Rolle mit Alufolie verwenden.

4.1.3 Selbstinduktion einer Spule

Die Zündung des Treibstoff-Luft-Gemisches in einem Ottomotor erfolgt durch eine Zündkerze. Dabei springt bei hoher Spannung ein Funke zwischen den etwa 1 mm voneinander entfernten Elektroden über. Da eine Autobatterie nur etwa 12 V aufweist, wird die benötigte Spannung durch Unterbrechung des Stromflusses einer Zündspule erzeugt.



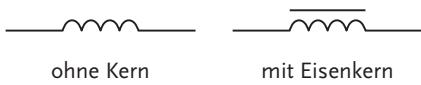
Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

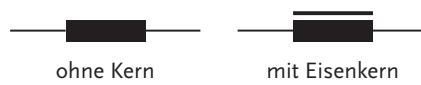
- das Phänomen **Induktivität** beschreiben und ihre Einheit nennen;
- die **Induktivität von Spulen** mit und ohne Kern berechnen;
- das Auftreten der **Selbstinduktionsspannung** erklären und den daraus resultierenden Stromfluss verstehen und herleiten.

Schaltzeichen für Spulen

nach IEC 617
(International Electronical Comission)



nach DIN EN 60617
(Deutsches Institut für Normung)



Versuch 4.1.05: Schaltvorgang in einem Stromkreis mit Spule

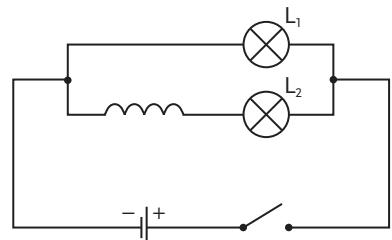
In einem Stromkreis werden ein Lämpchen L_1 und ein zweites Lämpchen L_2 mit einer seriell vorgeschalteten Spule mit größerer Windungsanzahl von derselben Spannungsquelle versorgt (Stromkreis siehe Randspalte). Schaltet man den Strom ein, reagiert das Lämpchen L_2 mit vorgeschalteter Spule verzögert. Beim Ausschalten leuchten die Lämpchen kurz nach. Die Spule hemmt also jede Änderung des Stromflusses.



Ferrariszähler zur Strommessung:
Zur **Kalibrierung** des Zählers wird ein Permanentmagnet nahe einer Wirbelstrombremsscheibe justiert. Die **sichtbare Scheibe** ist **nicht immer auch die Bremse**, sondern eine spezielle Form eines Asynchronmotors. Bei Stromdurchfluss treibt er das Zählwerk an. Die Wirbelstrombremse, die häufig eine eigene Scheibe hat, gewährleistet ein lastabhängiges Bremsmoment für den Antriebsmotor.



Tausch der Zündkerzen eines Pkw-Motors; sie werden über ein Gewinde in den Zylinder geschraubt



Schaltbild zu Versuch 4.1.05



Grundbegriffe und Gesetzmäßigkeiten des Magnetismus:

Magnetische Erregung H:

$$B = \mu_0 \cdot H$$

mit der magnetischen Feldkonstante bzw. absoluten Permeabilität

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} = 1,2566 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$$

Amperesches Gesetz:

$$N \cdot I = H \cdot l$$

mit der Länge l einer geschlossenen Feldlinie, die von einem Strom der Stärke $N \cdot I$ durchflossen wird



JOSEPH HENRY, 1797 BIS 1878,
AMERIKANISCHER PHYSIKER

| Stoff | Permeabilität μ_r |
|--------------------------------|-----------------------|
| Ferromagnetische Stoffe | |
| Gusseisen | 500 |
| Eisen | 6 000 |
| Permalloy (Ni, Mo) | 70 000 |
| Eisen-Nickel-Legierungen | bis 300 000 |
| Paramagnetische Stoffe | |
| Luft | 1,000 000 4 |
| Aluminium | 1,000 020 8 |
| Diamagnetische Stoffe | |
| Wasser | 0,999 991 |
| Kupfer | 0,999 990 |
| Zink | 0,999 988 |

Tabelle mit Permeabilitätszahlen

Wird der Strom im Versuch 4.1.05 eingeschaltet, ändert sich durch den beginnenden Stromfluss der magnetische Fluss in der Spule. Durch diese Änderung des Fluxes induziert die Spule selbst eine Spannung U_L , die der Änderung des Fluxes entgegenwirkt. Dies hemmt den beginnenden Stromfluss durch die Spule. Beim Ausschalten des Stromflusses „wehrt sich“ die Spule durch Selbstinduktion gegen das Abnehmen des Stromes. Die Lämpchen leuchten nach.

Für die Induktionsspannung in einer Spule gilt das allgemeine Induktionsgesetz $U_L = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt}$. Für den magnetischen Fluss durch die Spule ergibt sich mit der magnetischen Erregung H und mit dem ampereschen Gesetz

$$\Phi = B \cdot A = \mu_0 \cdot H \cdot A = \mu_0 \cdot \frac{l \cdot N}{l} \cdot A = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N}{l} \cdot l.$$

Der Wert des Bruches vor der Stromstärke l ist konstant und nur von der Geometrie der Spule abhängig (Länge l der Spule, Querschnittsfläche A der Wicklungen, Anzahl N der Wicklungen). Für die zeitliche Änderung des Fluxes ergibt sich

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N}{l} \cdot \frac{dl}{dt}.$$

Setzt man dies in die Formel für die Induktionsspannung ein, erhält man die Selbstinduktionsspannung.

Selbstinduktionsspannung U_L

$$U_L = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} \cdot \frac{dl}{dt} = -L \cdot \frac{dl}{dt}$$

Dabei ist L die Induktivität der Spule

$$L = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} \quad [L] = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \text{ Henry (1 H)}$$

Die Induktivität ist ein Maß dafür, welchen „Widerstand“ durch Selbstinduktion eine Spule einer Stromänderung entgegengesetzt. Sie ist nur von der **Bauform der Spule** abhängig. Je größer die Induktivität ist, desto langsamer reagiert die Spule auf eine Stromänderung. Man kann dies auch durch die Verwendung verschiedener Spulen im Versuch 4.1.05 zeigen.

Beispiel 4.1.03: Induktivität einer Spule

Wie groß ist die Induktivität einer 15 cm langen Zylinderspule mit 1 200 Windungen? Die Spule ist zylinderförmig mit einem Durchmesser von 2 cm gewickelt.

$$L = \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 10^{-4} \cdot \pi \text{ m}^2 \cdot 1200^2}{15 \cdot 10^{-2} \text{ m}} = 0,001206 \text{ H} = 1,206 \text{ mH}$$

Gängige Werte der Induktivität von kleinen luftgefüllten Spulen bewegen sich im Bereich von einigen Millihenry.

Selbstinduktion in Spulen mit Eisenkern

In einer Spule mit Eisenkern wird die magnetische Flussdichte durch die Magnetisierung des Kernes verstärkt. Die Magnetisierung von Materie ist durch eine **Permeabilitätszahl (relative Permeabilität) μ_r** beschreibbar. Es gilt

$$B = \mu_r \cdot B_0 = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H.$$

$$\text{Induktivität } L \text{ einer Spule mit Eisenkern: } L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l}$$

Anhand der Formel sehen wir, dass die Permeabilitätszahl μ_r eines Eisenkernes die Induktivität einer Spule vervielfacht.

Beispiel 4.1.04: Induktivität einer Spule mit Eisenkern

Wie groß ist die Induktivität der Spule aus dem Beispiel 4.1.03, wenn sie mit einem Kern aus Eisen gefüllt ist?

$$L = \mu_r \cdot \frac{\mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} = \mu_r \cdot L_0 = 6\,000 \cdot 1,020\,6 \text{ mH} = 7,238 \text{ H}$$

Verhalten einer Spule bei Änderung des Stromflusses

Wir werden nun versuchen, die im Versuch 4.1.05 gemachte Beobachtung rechnerisch nachzuvollziehen. Um die Situation etwas zu vereinfachen, ersetzen wir das Lämpchen durch einen einfachen ohmschen Widerstand R . Der Widerstand eines Lämpchens ist nämlich nicht konstant und sehr stark von der Temperatur und somit vom Stromfluss abhängig. Um nach dem Abschalten weiterhin einen Induktionsstrom zu ermöglichen, wird parallel zu Widerstand und Spule eine Diode in Sperrrichtung eingefügt (siehe Randspalte).

Im stationären Zustand bei geschlossenem Schalter fließt bei einer angelegten Spannung U_0 ein Strom $I_0 = U_0/R$. Der ohmsche Widerstand der Spulenwicklungen ist in der Regel vernachlässigbar klein. Bei Stromänderung tritt an der Spule eine Selbstinduktionsspannung $U_L = -L \cdot \frac{di}{dt}$ auf.

Ausschaltvorgang

Wird der Schalter geöffnet, liegt an der Serienschaltung von Widerstand und Spule keine Spannung mehr. Der Strom würde aufhören zu fließen, die Selbstinduktionsspannung versucht ihn aufrecht zu halten. Der Betrag der Selbstinduktionsspannung ist gegengleich dem Spannungsabfall am Widerstand: $-|U_L| = U_R$. Mit dem ohmschen Gesetz am Widerstand und der Selbstinduktionsspannung an der Spule erhält man:

$$-L \cdot \frac{di}{dt} = R \cdot I \Leftrightarrow \frac{di}{I} = -\frac{R}{L} \cdot dt \Leftrightarrow \int \frac{di}{I} = -\int \frac{R}{L} \cdot dt \Leftrightarrow \ln(I) = -\frac{R}{L} \cdot t + C_1$$

Daraus ergibt sich für den zeitlichen Verlauf des Stroms: $I(t) = C \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$

Mit der Bedingung, dass vor dem Ausschalten noch ein Strom I_0 geflossen ist, erhält man für den **Zeitverlauf des Stroms beim Ausschaltvorgang** ein exponentielles Anklingen.

Exponentielles Abklingen: $I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$ (siehe Randspalte)

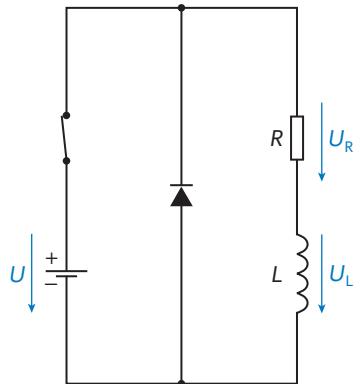
Beispiel 4.1.05: Abklingen des Stromflusses durch Selbstinduktion

Ein Widerstand ($R = 100 \Omega$) und eine Spule ($L = 50 \text{ H}$) liegen seriell an einer Spannung von 12 V. Welche Zeit verstreicht nach dem Ausschalten der Spannung, bis der Strom durch die Schaltung auf 10 % des Wertes vor dem Ausschalten zurückgegangen ist?

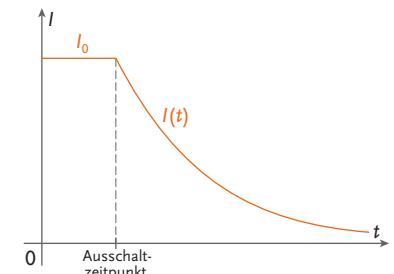
Wegen $I(t) = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$ ergibt sich $0,1 \cdot I_0 = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} \cdot t}$ und damit $t = -\frac{\ln(0,1) \cdot L}{R} = 1,15 \text{ s}$

Einschaltvorgang

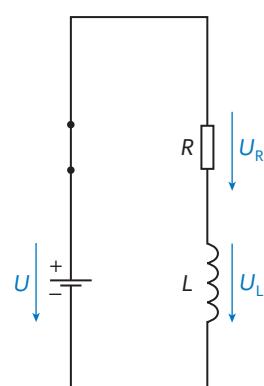
Wird der Schalter geschlossen, ist die Summe der Spannungsabfälle an Widerstand und Spule gleich der angelegten Spannung. Selbstinduktionsspannung und ohmischer Widerstandsabfall ergeben: $|U_L| + U_R = U$. Man erhält für die zeitliche Änderung des Stroms $L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot I(t) = U$.



Vereinfachtes Schaltbild zum Versuch eines Lämpchens mit Spule mit den **Spannungen beim Ausschalten**



Exponentielles Abklingen des Stroms nach dem Ausschalten



Vereinfachtes Schaltbild zum Versuch eines Lämpchens mit Spule mit den **Spannungen beim Einschalten**

Bei dieser Differenzialgleichung für die Stromstärke $I(t)$ handelt es sich um eine inhomogene lineare Differenzialgleichung erster Ordnung.

Mit dem Ansatz $I_{\text{hom}}(t) = C_1 e^{\lambda \cdot t}$ für die homogene Gleichung

$$L \cdot \frac{dI_{\text{hom}}(t)}{dt} + R \cdot I_{\text{hom}}(t) = 0 \text{ erhält man}$$

$$\lambda \cdot L \cdot I_{\text{hom}}(t) + R \cdot I_{\text{hom}}(t) = 0 \Leftrightarrow \lambda = -\frac{R}{L} \Leftrightarrow I_{\text{hom}}(t) = C_1 e^{-\frac{R}{L} \cdot t}.$$

Der Ansatz $I_{\text{part}}(t) = C_2$ für die inhomogene Gleichung

$$L \cdot \frac{dI_{\text{part}}(t)}{dt} + R \cdot I_{\text{part}}(t) = U \text{ ergibt } R \cdot C_2 = U \Leftrightarrow C_2 = U/R = I_0.$$

Dies ist der Stromfluss I_0 im stationären Zustand.

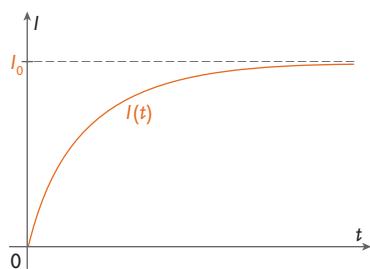
Die allgemeine Lösung ist die Summe der homogenen und der partikulären Lösung:

$$I(t) = I_{\text{hom}}(t) + I_{\text{part}}(t) = C_1 e^{-\frac{R}{L} \cdot t} + C_2 = C_1 e^{-\frac{R}{L} \cdot t} + I_0$$

Mit der Bedingung, dass zum Einschaltzeitpunkt kein Strom fließt, $I(t=0) = 0$, erhält man für den **Zeitverlauf des Stroms** beim **Einschaltvorgang** einen exponentiellen Anstieg.

Exponentieller Anstieg: $I(t) = I_0 \cdot (1 - e^{-\frac{R}{L} \cdot t})$ (siehe Randspalte)

Die Selbstinduktion findet **Anwendung** bei der **Zündvorrichtung** von Motoren, beim **Elektrozaun** für Tierweiden und zur Erzeugung der **Zündspannung für Leuchtstofflampen**. Durch eine Unterbrechung eines Stromkreislaufes mit Spule lassen sich Spannungsspitzen mit bis zu mehreren Tausend Volt generieren.



Exponentieller Anstieg des Stromes durch Spule und Widerstand nach dem Einschalten



Elektrozäune sind für die Tierweide sehr beliebt. Sie sind baulich nicht aufwendig, mobil und werden meist mit einer Autobatterie als Stromversorgung betrieben. Darüber hinaus verhindern sie sehr zuverlässig das Ausbrechen der Weidetiere.



Ziele erreicht? – „Selbstinduktion einer Spule“

- 4.1.09** Geben Sie die Formel für die Induktivität und für die Selbstinduktionsspannung einer Spule an. Zeichnen Sie auch die Schaltsymbole für Spulen mit und ohne Eisenkern nach DIN und IEC-Norm.
- 4.1.10** Leiten Sie aus der Definitionsgleichung der Induktivität ihre Einheit ($1 \text{ V} \cdot \text{s/A} = 1 \text{ H}$) ab.
- 4.1.11** Wie groß ist die Induktivität einer 20 cm langen Spule mit Wicklungsdurchmesser $d = 7 \text{ cm}$ und 25 000 Windungen mit und ohne Eisenkern?
- 4.1.12** Berechnen Sie die Induktivität einer Ringspule mit 35 000 Windungen und Eisenkern. Der Außendurchmesser beträgt 24 cm, der Wicklungsdurchmesser 4 cm.
- 4.1.13** Wie lange dauert es im Stromkreis aus Beispiel 4.1.05, bis der Strom nach dem Einschalten 90 % seines stationären Wertes erreicht hat?
- 4.1.14** Wovon hängt die Höhe der Spannungsspitze eines Unterbrecherstromkreises ab?

4.1.4 Energie des Magnetfeldes einer Spule

Ein Ausschalten von Strömen durch große Induktivitäten kann hohe Selbstinduktionsspannungen verursachen. Die daraus resultierenden kurzzeitig sehr hohen Ströme können eine Gefahr für den Schalter oder die Isolation der Spulenwicklungen sein.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Energie des Magnetfeldes einer Spule** berechnen;
- die Energie des Magnetfeldes sowie die **Verlustleistung einer realen Spule** herleiten und verstehen.

Im Versuch 4.1.05 haben wir gesehen, dass ein mit einer Spule seriell geschaltetes Lämpchen bei Unterbrechung der Spannungsversorgung nachleuchtet. Das bedeutet aber, dass das Lämpchen noch zu einem Zeitpunkt leuchtet, da die Stromversorgung keine Energie mehr liefert. Wo kommt die **Energie für das Lämpchen** her? Da sich während dieser Zeit das Magnetfeld der Spule abbaut, liegt der Schluss nahe, dass diese **Energie im Feld der Spule gespeichert war**. Umgekehrt muss beim Einschalten das Magnetfeld der Spule erst aufgebaut werden, sodass vorerst für das Lämpchen nur eine geringere Leistung übrig bleibt.

Wir betrachten nun die Leistung beim Anlegen einer Spannung an eine Spule.

$P(t) = \frac{dW(t)}{dt} = U(t) \cdot I(t)$ dabei ist $U(t) = L \cdot \frac{dI(t)}{dt}$ die Selbstinduktionsspannung der Spule und $I(t)$ der Stromfluss durch die Spule.

Wir erhalten daraus: $\frac{dW(t)}{dt} = L \cdot \frac{dI(t)}{dt} \cdot I(t) \Leftrightarrow dW = L \cdot I \cdot dI$

Im vorigen Kapitel haben wir erkannt, dass der Strom von 0 auf den stationären Wert I_0 ansteigt, sodass sich für die Arbeit ergibt:

$$W = \int_0^{I_0} L \cdot I \cdot dI = \left[L \cdot \frac{I^2}{2} \right]_0^{I_0} = \frac{L \cdot I_0^2}{2}$$

Die bei stationärem Strom I_0 im magnetischen Feld der Spule gespeicherte Energie beträgt $W = E_{\text{magn}} = \frac{L \cdot I_0^2}{2}$.

Bei Unterbrechung des Stromkreises gibt die Spule diese Energie wieder ab.

Beispiel 4.1.06: Energie des magnetischen Feldes

Eine Spule (Länge $l = 10 \text{ cm}$, $N = 2000$ Wicklungen, Wicklungsquerschnitt $A = 3 \text{ cm}^2$) mit Eisenkern wird mit einem Vorwiderstand ($R = 200 \Omega$) an eine Spannungsquelle ($U = 10 \text{ V}$) angeschlossen. Wie groß ist die Energie, die im Magnetfeld der Spule gespeichert ist, wenn im Stromkreis nach dem Einschaltvorgang der stationäre Stromfluss erreicht wurde?

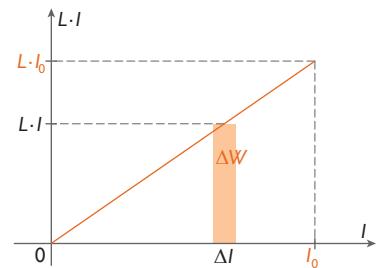
$$L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} = \frac{6000 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}} \cdot 3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot 2000^2}{10^{-1} \text{ m}} = 90,5 \text{ H}$$

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{10 \text{ V}}{200 \Omega} = 0,05 \text{ A} \quad E_{\text{magn}} = \frac{L \cdot I_0^2}{2} = \frac{90,5 \text{ H} \cdot (0,05 \text{ A})^2}{2} = 0,113 \text{ J}$$

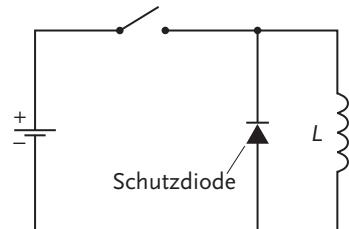
Ein Kurzschließen der Spule mit einem Lastwiderstand vermeidet die anfangs erwähnten Beschädigungen durch einen Selbstinduktionsstrom. In Gleichstromkreisen kann dies auch mit einer Schutzdiode (siehe Randspalte) realisiert werden.



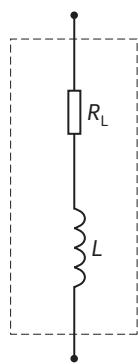
Vorführung eines Magnetkrans auf der Technischen Messe in Leipzig 1954



Im $L \cdot I$ - I -Diagramm ist die Energie des Magnetfeldes die Fläche unter dem Graphen. Dieser ist allerdings nur für Luftspulen eine Gerade. μ_r und damit L sind erst im Sättigungsbereich der magnetisierbaren Substanz konstant.



Die **Schutzdiode** verhindert, dass beim Öffnen des Schalters ein Funke überspringt. Der Selbstinduktionsstrom beim Ausschalten fließt über die Diode. Bei geschlossenem Schalter fließt der Strom ausschließlich über die Spule. Die Diode ist in Sperrrichtung geschaltet. Man kann auch einen nicht zu großen **Widerstand** verwenden. Er wird wie die Diode **parallel** zur Spule in den Stromkreis geschaltet.



Ersatzschaltbild für eine reale Spule: Der ohmsche Widerstand der Wicklungen liegt seriell zur Induktivität. Das elektrische Verhalten einer realen Spule lässt sich mit der Serienschaltung im Kapitel „Induktivität einer Spule“ vergleichen.



Kernspintomograf: In der medizinischen Diagnostik liefert dieses Gerät Schnittbilder des menschlichen Körpers. **Starke Magnete** richten die Kernspins der Atome des menschlichen Gewebes aus. Nach dem Abschalten des Feldes klappen die **Kernspins** wieder in ihre **Ausgangslage zurück**. Die unterschiedliche Zeit für diese so genannte Relaxation, das Zurückkehren der Spins in die Ausgangslage, ist **typisch für verschiedene Gewebesubstanzen**.

Reale Spule

Eine reale Spule hat aber nicht nur eine Induktivität. Die Wicklungen der Spule haben auch einen ohmschen Widerstand, der nicht vernachlässigbar ist. Eine reale Spule lässt sich durch ein Ersatzschaltbild darstellen, das dem Spulenstromkreis aus dem vorigen Kapitel entspricht (siehe Randspalte).

Wird an diese Spule eine Spannung U gelegt, so gilt für die Summe der Spannungsabfälle am ohmschen Widerstand und an der Induktivität: $U = L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I$.

Die momentane Leistung ergibt sich aus einer Multiplikation der Gleichung mit dem Strom I : $U \cdot I = L \cdot \frac{dI}{dt} \cdot I + R \cdot I^2$

Man sieht, dass nicht die gesamte von der Spannungsquelle gelieferte Leistung $P = U \cdot I$ in den Aufbau des magnetischen Feldes geht. Ein Anteil $R \cdot I^2$ geht im ohmschen Widerstand der Wicklungen in Wärme verloren. Dies ist auch dann weiter der Fall, wenn das Magnetfeld bis zum stationären Strom aufgebaut ist.

Beispiel 4.1.07: Verlustleistung einer realen Spule

An eine Spule ($L = 25 \text{ mH}$, $R = 2 \Omega$) wird eine Spannung von 4 V angelegt. Wir berechnen zuerst die im Magnetfeld gespeicherte Energie, wenn nach dem Einschalten der stationäre Stromfluss erreicht wird.

$$I_0 = \frac{U}{R} = \frac{4 \text{ V}}{2 \Omega} = 2 \text{ A} \quad E_{\text{magn}} = \frac{L \cdot I_0^2}{2} = \frac{0,025 \text{ H} \cdot (2 \text{ A})^2}{2} = 0,05 \text{ J}$$

Danach tritt am ohmschen Widerstand der Wicklungen eine ständige Verlustleistung in folgender Höhe auf: $P_R = R \cdot I^2 = 2 \Omega \cdot (2 \text{ A})^2 = 8 \text{ W}$

Es geht am ohmschen Widerstand der Spule 160-mal mehr Energie pro Sekunde verloren, als im magnetischen Feld insgesamt gespeichert ist.



Ziele erreicht? – „Energie des Magnetfeldes einer Spule“

4.1.15 Geben Sie die Formel für die im magnetischen Feld einer Spule gespeicherte Energie an.

4.1.16 Eine luftgefüllte Spule (Länge $l = 15 \text{ cm}$, $N = 1100$ Wicklungen, Wicklungsquerschnitt $A = 3 \text{ cm}^2$) wird mit einem Vorwiderstand ($R = 300 \Omega$) an eine Spannungsquelle ($U = 20 \text{ V}$) angeschlossen. Wie groß ist die Energie, die im Magnetfeld der Spule gespeichert ist, wenn im Stromkreis nach dem Einschaltvorgang der stationäre Stromfluss erreicht wurde?

4.1.17 An eine reale Spule ($L = 1 \text{ H}$, $R = 5 \Omega$) wird eine Spannung von 5 V angelegt. Berechnen Sie die Energie, die im Magnetfeld der Spule gespeichert ist, wenn nach dem Einschalten der stationäre Strom erreicht ist. Welche permanente Verlustleistung tritt im stationären Zustand auf?

4.1.18 An eine reale Spule ($L = 0,1 \text{ H}$, $R = 2 \Omega$) wird eine Spannung von 3 V angelegt. Nach 50 Sekunden wird die Spule wieder abgeschaltet.
a) Berechnen Sie die zum Aufbau des Magnetfeldes nötige elektrische Energie. b) Wie groß ist die gespeicherte Energie des Magnetfeldes? c) Welche Energie wird im eingeschalteten Zustand verbraucht? Die Dauer der Schaltvorgänge darf vernachlässigt werden! d) In welchem Verhältnis stehen die Energie des Magnetfeldes und die ohmsche Verlustenergie?

4.2 Wechselstrom

Unter **Gleichstrom** versteht man einen elektrischen Strom, der in einem Stromkreis immer in die gleiche Richtung fließt. Als Bezeichnung wird = oder **DC** (**D**irect **C**urrent) verwendet. Im Gegensatz dazu ändert der **Wechselstrom** in periodischen Abständen seine Flussrichtung. Man findet häufig das Symbol ~ oder die Bezeichnung **AC** (**A**lternating **C**urrent).

4.2.1 Wechselspannung

Weltweit werden zur Energieversorgung mit elektrischem Strom sinusförmige Wechselspannungen verwendet. Die Gründe dafür sind die niedrigen Verluste bei Fernübertragung mit hohen Spannungswerten, die Transformierbarkeit der Spannung und die einfache Erzeugung der sinusförmigen Wechselspannung. Die Frequenz der Wechselspannung beträgt im EU-Raum 50 Hz, in Nordamerika 60 Hz. Wechselspannungen mit sehr hoher Frequenz werden in der Nachrichtentechnik unter anderem zur Funkübertragung mit elektromagnetischen Wellen benötigt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die formale Beschreibung der **momentanen Spannung** angeben;
- die **Sinusspannung mit einem Zeigerdiagramm** beschreiben;
- die **Sinusspannung aus dem Induktionsgesetz** für eine sich in einem homogenen Magnetfeld drehende Leiterschleife herleiten.

Im vorigen Großkapitel haben wir gesehen, dass ein Spannungsimpuls mittels Induktion auf einfachem Wege generierbar ist. Besonders einfach kann man eine Wechselspannung erzeugen, wenn man eine Leiterschleife in einem festen Magnetfeld ständig dreht (Prinzip des Generators; siehe Randspalte).

Eine im Winkel φ zum homogenen Magnetfeld B geneigte Leiterschleife mit Querschnittsfläche A wird von einem magnetischen Fluss $\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\varphi)$ durchdrungen. Bei einer gleichförmigen Drehbewegung mit einer Winkelgeschwindigkeit ω gilt für den Drehwinkel $\varphi = \omega \cdot t$ und damit für den zeitabhängigen magnetischen Fluss $\Phi(t) = B \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t)$. Aus der Änderung des magnetischen Flusses ergibt sich eine Induktionsspannung

$$U_{\text{ind}}(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{d(B \cdot A \cdot \cos(\omega \cdot t))}{dt} = B \cdot A \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Wir beschreiben eine **Sinuswechselspannung** folgendermaßen:

$u = U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$ mit den **Bezeichnungen**:

$u = U(t)$ Momentanwert der Spannung

U_0 Scheitelwert der Spannung oder Spitzenspannung

$\varphi = \omega \cdot t$ momentaner Phasenwinkel oder Phase (Drehwinkel)

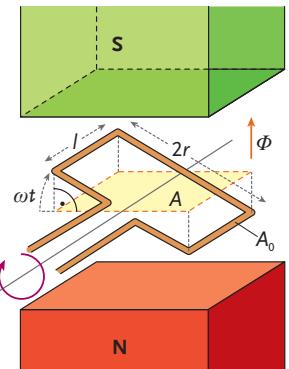
$f = \frac{\omega}{2\pi}$ Frequenz der Wechselspannung

$T = \frac{1}{f}$ Periodendauer der Wechselspannung

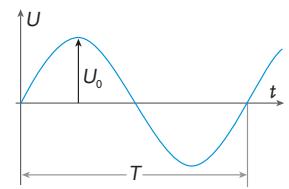


Frontpaneel eines **Netzgerätes** für Gleich- und Wechselspannung

Rotierende Leiterschleife im Magnetfeld



Wechselspannung

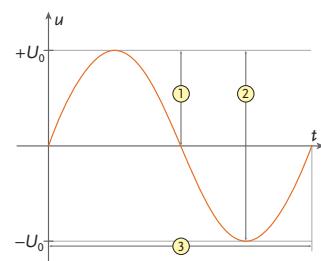


U_0 ... maximaler Wert der induzierten Spannung

Prinzip des Generators zur Erzeugung von Wechselspannung



Da Stromfluss eine Form von Energie ist, kann man Strom (wie auch Energie) nicht erzeugen sondern nur umwandeln. So wandelt der Generator mechanische Arbeit (Drehbewegung) in elektrische Energie (Stromfluss) um.



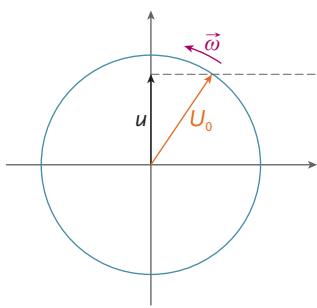
u-t-Diagramm (Liniendiagramm) einer sinusförmigen Wechselspannung mit einigen Kennwerten

1) Amplitude, Spitzenspannung

2) Spitze-Spitze-Wert

3) Periodendauer

Das $u-t$ -Diagramm in der Randspalte zeigt den zeitlichen Verlauf des Momentanwertes einer Wechselspannung. Es wird auch als Liniendiagramm bezeichnet.



Zeigerdiagramm einer Wechselspannung: Der Zeiger mit der Länge der Spitzenspannung U_0 rotiert im Gegenurzeigersinn mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot f$. Die Projektion des Zeigers auf die y-Achse ergibt den Momentanwert der Spannung. Überträgt man die Projektion in ein Liniendiagramm, erhält man eine Sinusschwingung.

Eine weitere sehr gängige Darstellungsmöglichkeit für eine Wechselspannung ist das Zeigerdiagramm. In diesem Diagramm rotiert ein Zeiger im Gegenurzeigersinn mit einer konstanten Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \cdot f$ auf einem Kreis mit dem Radius U_0 . Den Momentanwert der Spannung erhält man durch Projektion des Zeigers auf die Ordinate.

Beispiel 4.2.01: Momentanwert einer Sinusspannung

Wie groß ist der Momentanwert einer Sinusspannung mit einem Spitzenwert von $U_0 = 325 \text{ V}$ und einer Frequenz von 50 Hz nach einer Zeit von $1,002 \text{ s}$ nach dem Nulldurchgang der Sinusschwingung?

$$u(t) = U_0 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

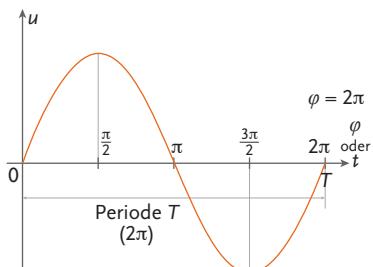
$$u(1,002 \text{ s}) = 325 \text{ V} \cdot \sin(2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 1,002 \text{ s}) = 191,03 \text{ V}$$

Üblicherweise verwendet man zur Angabe der Spannung in einem Stromnetz die Effektivspannung U und nicht den Scheitelwert U_0 . Es gilt der Zusammenhang $U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$, den wir im folgenden Kapitel noch genau begründen werden.

In Österreich erfolgt die Stromversorgung mit einem **Dreiphasensystem**. Der Effektivwert der Netzwechselspannung eines Phasenleiters zur Erdung beträgt **230 V** mit Schwankung von **+10 % bzw. -5 %** bei einer Frequenz von **50 Hz**.



Ziele erreicht? – „Wechselspannung“



Liniendiagramm mit Periode und Phaseninformationen zu einer sinusförmigen Wechselspannung

- 4.2.01 Geben Sie die Formel zur Beschreibung einer Sinusspannung an. Erklären Sie die Begriffe Momentanwert, Spitzenspannung, Phase, Frequenz, Periode und Effektivspannung.
- 4.2.02 Nennen Sie die Kennwerte der Spannung der österreichischen Stromversorgung.
- 4.2.03 Berechnen Sie den Momentanwert einer Sinusspannung mit einem Spitzenwert von $U_0 = 110 \text{ V}$ und einer Frequenz von 50 Hz nach einer Zeit von $0,0018 \text{ s}$ nach dem Nulldurchgang der Sinusschwingung.
- 4.2.04 Erklären Sie, wodurch die Frequenz der Wechselspannung eines Generators bestimmt wird.

4.2.2 Wechselstromwiderstände

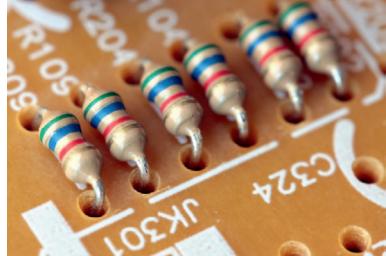
Wie sich ein ohmscher Widerstand, ein Kondensator oder eine Spule im Gleichstromkreis verhält, ist uns bekannt. In Stromkreisen mit sinusförmiger Wechselspannung unterscheidet sich das Verhalten dieser Bauelemente zum Teil markant von dem im Gleichstromkreis.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Wechselstromwiderstände** von ohmschem Widerstand, Kondensator und Spule angeben;
- die **mittlere Leistung des Wechselstroms** berechnen;
- den Wert von induktiven und kapazitiven **Blindwiderständen** berechnen;
- den Strom- und Spannungsverlauf an Wechselstromwiderständen sowie deren **Phasenverschiebung** erklären und skizzieren.



Ohmsche Widerstände, auf einer Platine verlötet

In diesem Kapitel werden wir das Verhalten verschiedener elektrischer Bauteile wie eines ohmschen Widerstands, des Kondensator und einer Spule, im Wechselstromkreis untersuchen.

Der ohmsche Widerstand

Wird ein ohmscher Widerstand an eine Wechselspannung angeschlossen (siehe Randspalte), fließt ein Wechselstrom $i (= i(t))$. Es gilt auch hier das ohmsche Gesetz.

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)}{R} = \frac{U_0}{R} \cdot \sin(\omega \cdot t) = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

Der Momentanwert des Wechselstromes verhält sich wie der Momentanwert der Wechselspannung. Der Wechselstrom hat **dieselbe Frequenz** wie die Wechselspannung und hat auch **zum gleichen Zeitpunkt seine Spitzenwerte**. Er ist **phasengleich** zur Spannung.

Da sich Strom und Spannung ständig ändern, ist auch die momentane Leistung p , die am ohmschen Widerstand in Wärme umgesetzt wird, nicht konstant.

$$p = u \cdot i = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) = U_0 \cdot I_0 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) = P_0 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)$$

Um den zeitlichen Mittelwert der Leistung am ohmschen Widerstand zu ermitteln, muss die zeitlich veränderliche Leistung über eine Periodendauer summiert (integriert) und durch die Periodendauer dividiert werden. Es ergibt sich dann

$$P = \frac{\int_0^T U_0 \cdot I_0 \cdot \sin^2(\omega \cdot t) \cdot dt}{T} = \frac{U_0 \cdot I_0 \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot (\omega \cdot t - \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t)) \right]_0^T}{T} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2}$$

Die **mittlere Leistung P** ist gleich der **halben Spitzenleistung**.

$$P = \frac{U_0 \cdot I_0}{2} = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} \quad \text{mit folgenden Bezeichnungen}$$

$$\text{Effektivwert der Spannung: } U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}$$

$$\text{Effektivwert der Stromstärke: } I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

$$P = U \cdot I$$

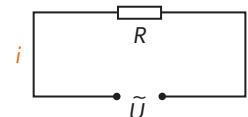
Mittlere Leistung = Effektivwert der Spannung · Effektivwert der Stromstärke

Der Effektivwert der Spannung im österreichischen Stromnetz beträgt 230 V. Der Spitzenwert der Spannung liegt also bei $U_0 = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 230 \text{ V} \approx 325,3 \text{ V}$. Auch **Messgeräte** (Volt- und Ampermeter) zeigen in den Messbereichen für Wechselstrom die **Effektivwerte** von Strom und Spannung an.

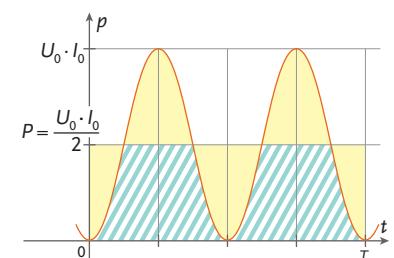
Der ideale Kondensator

Versuch 4.2.01: Verhalten eines Kondensators im Stromkreis

- Wir schalten ein Lämpchen und einen Kondensator seriell an ein Netzgerät für Gleich- und Wechselspannung. Wir stellen dabei Folgendes fest: Bei Gleichspannung leuchtet das Lämpchen nicht auf. Es fließt kein Strom. Bei Wechselspannung leuchtet das Lämpchen. Es fließt ein Wechselstrom.
- Verwenden wir einen Frequenzgenerator statt des Netzgerätes, so sehen wir, dass das Lämpchen mit steigender Frequenz heller leuchtet.

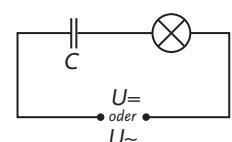


Schaltbild zum ohmschen Widerstand im Wechselstromkreis



Momentane Leistung p und mittlere Leistung P im Liniendiagramm:

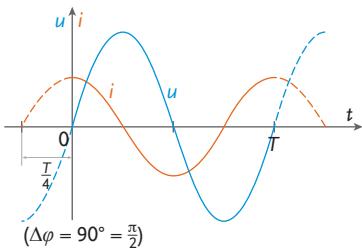
Man sieht gut, dass die mittlere Leistung der halben Spitzenleistung entspricht.



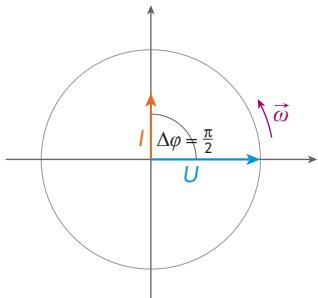
Schaltbild zu Versuch 4.2.01: Verhalten eines Kondensators



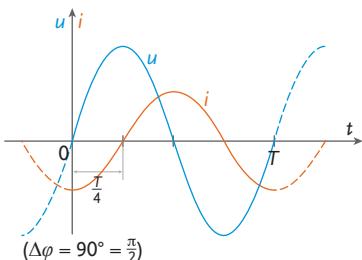
Die Kondensatorgleichung lautet: $Q = C \cdot U$
(Ladung = Kapazität · Spannung).



Liniendiagramm mit momentaner Spannung u und momentanem Strom i an einem idealen Kondensator im Wechselstromkreis



Im Zeigerdiagramm ist die Phasenverschiebung von Strom und Spannung am idealen Kondensator gut ersichtlich



Liniendiagramm mit momentaner Spannung u und momentanem Strom i an einer idealen Spule im Wechselstromkreis

Ein Kondensator sperrt also Gleichstrom, lässt Wechselstrom aber fließen. Um dies zu verstehen, betrachten wir die zeitliche Änderung der Kondensatorgleichung.

$$Q = C \cdot U \Leftrightarrow i = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt}(C \cdot u) = \frac{d}{dt}(C \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)) = C \cdot \omega \cdot U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\text{Das Verhältnis von } U_0/I_0 \text{ beträgt } \frac{U_0}{I_0} = \frac{U_0}{C \cdot \omega \cdot U_0} = \frac{1}{\omega \cdot C}.$$

Beim Kondensator läuft der Wechselstrom der Spannung um eine Phasendifferenz von 90° ($\pi/2$) voraus. Der **kapazitive Blindwiderstand** oder Wechselstromwiderstand eines Kondensators ist $X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}$.

Der kapazitive Widerstand ist **indirekt proportional zur Frequenz** des Wechselstroms.

Bei hohen Frequenzen ist der Widerstand sehr gering. Geht die Frequenz gegen null (Gleichstrom), dann geht der Widerstand gegen unendlich (kein Stromfluss). Der Strom- und der Spannungsverlauf, die in der Randspalte im Liniendiagramm eingezeichnet sind, lassen sich auch im Zeigerdiagramm sehr anschaulich darstellen.

Beispiel 4.2.02: Der Wechselstromwiderstand eines idealen Kondensators

Wie groß ist der Wechselstromwiderstand eines Kondensators mit $C = 4,7 \mu\text{F}$ bei einer Frequenz von a) 50 Hz, b) 10 kHz? c) Wie groß ist der Stromfluss bei einer Spannung von 20 V und einer Frequenz von 1 kHz?

$$\text{a)} X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 677,3 \Omega$$

$$\text{b)} X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \text{ Hz} \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 3,39 \Omega$$

$$\text{c)} X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^3 \text{ Hz} \cdot 4,7 \cdot 10^{-6} \text{ F}} = 33,9 \Omega$$

$$X_C = \frac{U_0}{I_0} \Leftrightarrow I_0 = \frac{U_0}{X_C} = \frac{20 \text{ V}}{33,9 \Omega} = 0,59 \text{ A}$$

Die ideale Spule

Versuch 4.2.02: Verhalten einer Spule im Stromkreis

- Wir schalten ein Lämpchen und eine Spule seriell an ein Netzgerät für Gleich- und Wechselspannung. Wir stellen dabei Folgendes fest: Bei Gleichspannung leuchtet das Lämpchen heller als bei Wechselspannung.
- Verwenden wir einen Frequenzgenerator statt des Netzgerätes, so sehen wir, dass das Lämpchen mit steigender Frequenz immer dunkler wird.

Bei Gleichstrom wirkt bei der Spule nur der ohmsche Widerstand des Windungsdrahtes. Mit steigender Frequenz der Wechselspannung steigt der Wechselstromwiderstand, verursacht durch die Induktivität der Spule, immer stärker an. Um dies auch quantitativ zu verstehen, vernachlässigen wir in den folgenden Überlegungen den ohmschen Widerstand und betrachten nur den induktiven Widerstand einer idealisierten Spule. Für die Spannung an der Spule, der die Induktionsspannung entgegengerichtet ist, gilt der folgende Zusammenhang:

$$u = -u_{\text{ind}} = -\left(-L \cdot \frac{di}{dt}\right) = L \cdot \frac{d}{dt}\left(I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)\right) = L \cdot \omega \cdot I_0 \cdot \cos(\omega \cdot t).$$

$$\text{Das Verhältnis von } U_0/I_0 \text{ beträgt somit } \frac{U_0}{I_0} = \frac{\omega \cdot L \cdot I_0}{I_0} = \omega \cdot L.$$

Bei der Spule läuft die Spannung der Stromstärke um eine Phasendifferenz von 90° ($\pi/2$) voraus. Der **induktive Blindwiderstand** oder Wechselstromwiderstand einer idealen Spule ist $X_L = \omega \cdot L$.

Der induktive Widerstand ist **direkt proportional zur Frequenz** des Wechselstroms.

Bei hohen Frequenzen wird, wie im Versuch 4.2.02 beobachtet, der Widerstand immer größer. Der zeitliche Strom- und Spannungsverlauf ist in der Randspalte im Linien- und im Zeigerdiagramm dargestellt.

Beispiel 4.2.03: Der Wechselstromwiderstand einer idealen Spule

Wie groß ist der Wechselstromwiderstand einer Spule mit $L = 3 \text{ mH}$ bei einer Frequenz von a) 50 Hz, b) 10 kHz. c) Wie groß ist der Stromfluss bei einer Spannung von 20 V und einer Frequenz von 1 kHz?

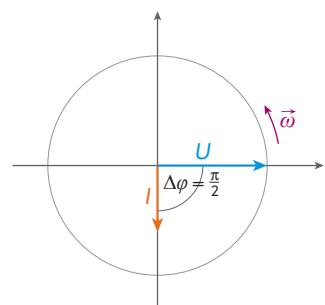
$$\text{a)} X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 0,942 \Omega$$

$$\text{b)} X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 10000 \text{ Hz} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 188,5 \Omega$$

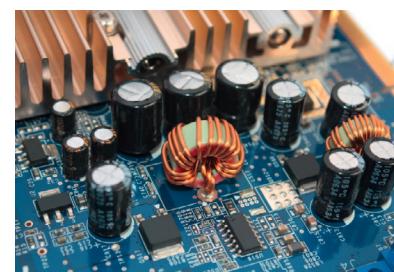
$$\text{c)} X_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 1000 \text{ Hz} \cdot 3 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 18,85 \Omega$$

$$X_L = \frac{U_0}{I_0} \Leftrightarrow I_0 = \frac{U_0}{X_C} = \frac{20 \text{ V}}{18,85 \Omega} = 1,06 \text{ A}$$

Der kapazitive Widerstand X_C und der induktive Widerstand X_L werden deshalb als **Blindwiderstand** bezeichnet, weil im Mittel an diesen Widerständen bei Stromfluss **keine elektrische Energie verloren geht**.



Zeigerdiagramm von Strom und Spannung an einer idealen Spule



Zwei Drosselspulen und etliche Elektrolytkondensatoren auf einer Platine



Ziele erreicht? – „Wechselstromwiderstände“

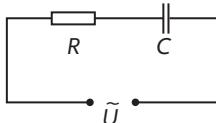
- 4.2.05** Wie hängen ohmscher, kapazitiver und induktiver Wechselstromwiderstand von der Frequenz der Wechselspannung ab?
- 4.2.06** Zeichnen Sie das Linien- und das Zeigerdiagramm eines ohmschen, eines kapazitiven und eines induktiven Wechselstromwiderstandes.
- 4.2.07** Berechnen Sie den kapazitiven Blindwiderstand eines Kondensators mit $C = 4,7 \mu\text{F}$ bei einer Spannung von 14 V und bei einer Frequenz von a) 50 Hz, b) 100 Hz, c) 1 kHz. Wie groß ist jeweils der Stromfluss bei diesen Frequenzen?
- 4.2.08** Berechnen Sie den induktiven Blindwiderstand einer Spule mit $L = 2 \text{ mH}$ bei einer Spannung von 14 V und bei einer Frequenz von a) 50 Hz, b) 100 Hz, c) 1 kHz. Wie groß ist jeweils der Stromfluss bei diesen Frequenzen?
- 4.2.09** Wie ändert sich der induktive Blindwiderstand einer Luftspule, wenn man einen Eisenkern hineinschiebt?



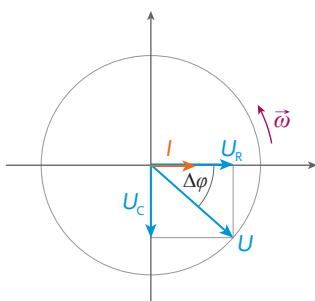
Für die Funktechnik sind Schaltungen aus den Bauelementen Widerstand, Kondensator und Spule von entscheidender Bedeutung. Ohne sogenannte Schwingkreise und Frequenzfilter wäre diese Informationstechnologie nicht möglich.



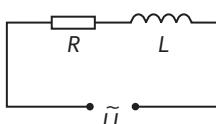
Rundfunkstudio



Schaltbild der seriellen RC-Schaltung



Zeigerdiagramm der seriellen RC-Schaltung



Schaltbild der seriellen RL-Schaltung

4.2.3 Schaltung von Wechselstromwiderständen

Das Verhalten von Schaltungen aus den Bauelementen Widerstand, Kondensator und Spule ist in der Nachrichtentechnik von entscheidender Bedeutung. Sogenannte Schwingkreise werden als Filter zum Empfang, aber auch als Frequenzfilter für Sendeanlagen verwendet. Geeignete Kombinationen aus Wechselspannungsschaltung und einer Antennenanlage sind für die Leistungsfähigkeit von Funksendern wichtig.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- serielle und parallele **Schaltungen mit Widerstand, Kondensator und Spule** zeichnen;
- aus dem Zeigerdiagramm **Strom, Spannung und Widerstand** dieser Schaltungen berechnen;
- das **Resonanzverhalten von Schwingkreisen** erklären.

Bei der Behandlung von Schaltungen mit Wechselstromwiderständen werden wir zwischen Serien- und Parallelschaltungen unterscheiden.

Serienschaltungen

RC-Schaltung

Bei einer RC-Schaltung werden ein **ohmscher Widerstand** und ein **Kondensator** seriell an eine Wechselspannung angeschlossen. Die beiden Bauelemente werden vom **gleichen Strom durchflossen**, die Spannung am Kondensator läuft dem Strom aber um eine Phase von 90° hinterher. Am einfachsten ist das Verhalten dieser Schaltung durch ein Zeigerdiagramm (siehe Randspalte) zu verstehen. Die Spannung U ist zu jedem Zeitpunkt die vektorielle Addition der Zeiger von U_R und U_C . Das ohmsche Gesetz für den Wechselstromwiderstand lautet $U = Z \cdot I$. Daraus ist der Widerstand der Schaltung erreichbar. Die Phasenverschiebung der Spannung zum Strom errechnet sich aus dem Quotienten von U_C und U_R .

Somit gilt für die **RC-Schaltung**:

$$\text{Spannung: } U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$$

$$\text{Scheinwiderstand: } Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

$$\text{Phasenverschiebung: } \Delta\varphi = \arctan\left(\frac{U_C}{U_R}\right) = \arctan\left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C}\right)$$

Die Spannung hinkt dem Strom um den Phasenwinkel $\Delta\varphi$ nach.

Der **Scheinwiderstand** einer Schaltung wird auch als **Impedanz** bezeichnet.

RL-Schaltung

Ein **Widerstand** und eine ideale **Spule** werden **seriell** an eine Wechselspannung U angeschlossen. Analog zur vorigen Schaltung ist der Strom durch beide Bauteile gleich.

Wir erhalten somit aus dem Zeigerdiagramm für die **RL-Schaltung**:

$$\text{Spannung: } U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}$$

$$\text{Scheinwiderstand: } Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$$

$$\text{Phasenverschiebung: } \Delta\varphi = \arctan\left(\frac{U_L}{U_R}\right) = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right)$$

Die Spannung läuft dem Strom um den Phasenwinkel $\Delta\varphi$ voraus.

Die RL-Schaltung entspricht im Verhalten einer realen Spule. Deren Wicklungen haben immer auch einen nicht verschwindenden ohmschen Widerstand. Je kleiner dieser ist, umso eher entspricht das Verhalten der realen Spule dem der idealen Spule (vergleichen Sie hierzu die Zeigerdiagramme).

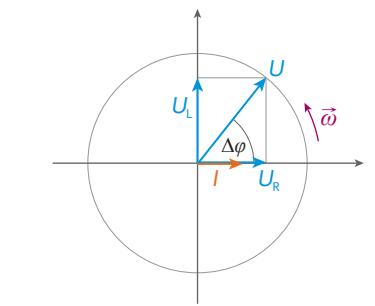
Beispiel 4.2.04: Ermittlung der Induktivität einer realen Spule

Der Stromdurchfluss einer Spule wird bei 20 V Gleich- bzw. Wechselspannung mit Netzfrequenz gemessen. Im ersten Falle wird ein Gleichstrom von 1,94 A ermittelt. Bei Wechselspannung tritt ein Strom von 0,021 A auf.

$$\text{Gleichstromwiderstand: } R = \frac{U}{I} = \frac{20 \text{ V}}{1,94 \text{ A}} = 10,31 \Omega$$

$$\text{Impedanz: } Z = \frac{U}{I} = \frac{20 \text{ V}}{0,021 \text{ A}} = 952,38 \Omega; Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2}$$

$$\text{Induktivität: } L = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{\omega} = \frac{\sqrt{(952,38 \Omega)^2 - (10,31 \Omega)^2}}{2\pi \cdot 50 \text{ Hz}} = 3,03 \text{ H}$$



Zeigerdiagramm der seriellen RL-Schaltung

RLC-Schaltung

Bei dieser Schaltung werden die drei Bauteile Widerstand, Spule und Kondensator hintereinander an eine Wechselspannung angeschlossen. Wieder ist der Strom durch diese drei Bauteile gleich groß.

Für eine **RLC-Schaltung** ergibt sich aus dem Zeigerdiagramm:

$$\text{Spannung: } U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

$$\text{Scheinwiderstand: } Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}$$

$$\text{Phasenverschiebung: } \Delta\varphi = \arctan\left(\frac{U_L - U_C}{U_R}\right) = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{R}\right)$$

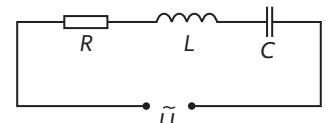
Die Spannung läuft dem Strom um den Phasenwinkel $\Delta\varphi$ voraus.

Welche Phase $\Delta\varphi$ die Spannung zum Strom hat, hängt davon ab, ob die Spule oder der Kondensator einen größeren Widerstand hat.

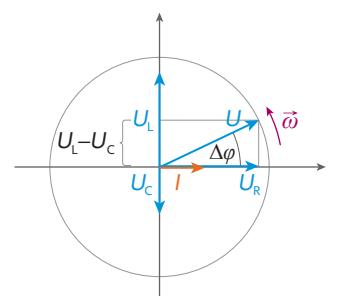
Diese Schaltung hat für $\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} = 0$ den kleinstmöglichen Widerstand $Z = R$.

Es fließt dann der größtmögliche Wechselstrom bei vorgegebener Wechselspannung. Die Frequenz f_0 der Wechselspannung, bei der dies passiert, bezeichnet man als Resonanzfrequenz.

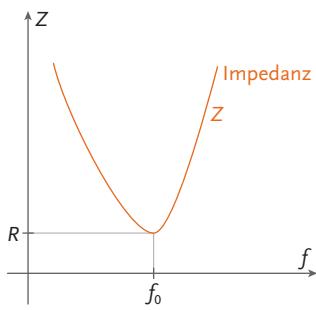
$$\text{Resonanzfrequenz: } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} \text{ (thomsonische Gleichung)}$$



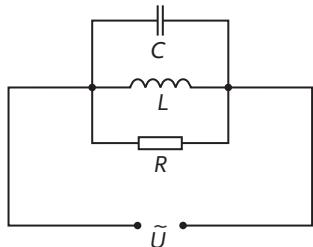
Schaltbild der seriellen RLC-Schaltung



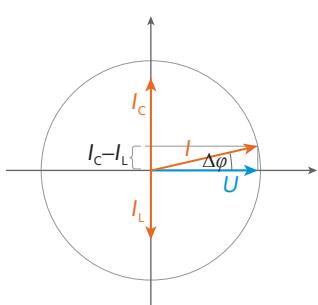
Zeigerdiagramm der seriellen RLC-Schaltung



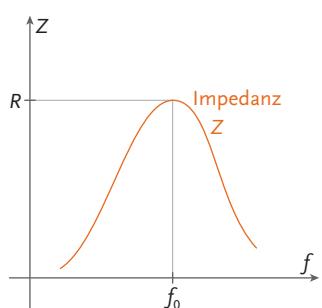
Verlauf der Impedanz bei einer seriellen RLC-Schaltung (Spannungsresonanz)



Parallele RLC-Schaltung



Zeigerdiagramm der parallelen RLC-Schaltung



Verlauf der Impedanz bei einer parallelen RLC-Schaltung (Stromresonanz)

Im Fall der Resonanz sind die Spannungsabfälle an Spule und Kondensator genau gegengleich und erreichen Werte, die größer sind als die angelegte Spannung (**Spannungsresonanz**). Das kann Spule und Kondensator gefährden.

Parallelschaltung

RLC-Schaltung

Bei einer Parallelschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule liegen diese drei Bauteile an derselben Wechselspannung. Daher zeichnen wir die Spannung im Zeigerdiagramm auf die positive x-Achse.

Wir erhalten somit aus dem Zeigerdiagramm für die parallele **RLC-Schaltung**:

$$\text{Strom: } I = \sqrt{I_R^2 + (I_C - I_L)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_C} - \frac{U}{X_L}\right)^2}$$

$$\text{Reziproke Impedanz: } \frac{1}{Z} = \frac{I}{U} = \sqrt{\left(\frac{1}{R}\right)^2 + \left(\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L}\right)^2}$$

$$\text{Phase: } \Delta\varphi = \arctan\left(\frac{I_C - I_L}{I_R}\right) = \arctan\left(\frac{\omega \cdot C - \frac{1}{\omega L}}{\frac{1}{R}}\right)$$

Welche Phase $\Delta\varphi$ der Strom zur Spannung hat, hängt davon ab, ob die Spule oder der Kondensator einen größeren Widerstand hat.

Diese Schaltung hat für $\omega \cdot C - \frac{1}{\omega \cdot L} = 0$ den größtmöglichen Scheinwiderstand $Z = R$. Wie bei der seriellen RLC-Schaltung gilt auch hier:

$$\text{Resonanzfrequenz: } f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Im Fall der Resonanz sind die Ströme durch Spule und Kondensator genau gegengleich. Der Strom pulsiert zwischen diesen beiden Bauteilen hin und her (**Stromresonanz**). Nach außen wirkt nur der ohmsche Widerstand.

Beispiel 4.2.05: Resonanzfrequenz einer RLC-Parallelschaltung

Welche Resonanzfrequenz hat eine Parallelschaltung einer Spule $L = 275 \text{ mH}$ mit einem Widerstand $R = 2 \text{ k}\Omega$ und einem Kondensator $C = 970 \text{ nF}$? Welche Phasenbeziehung herrscht zwischen Spannung und Strom?

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{0,275 \text{ H} \cdot 9,7 \cdot 10^{-9} \text{ F}}} = 308,15 \text{ Hz}$$

$$\omega_0 = 2\pi \cdot f_0 = 1936,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}}{\frac{1}{R}}\right) =$$

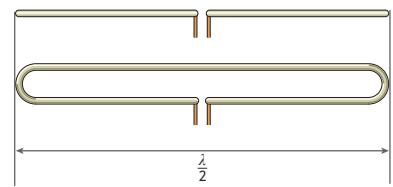
$$= \arctan\left(\frac{1936,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,275 \text{ mH} - \frac{1}{1936,2 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 9,7 \cdot 10^{-9} \text{ F}}}{\frac{1}{2000 \Omega}}\right) = 85,2^\circ$$

Bei einer Resonanzfrequenz von 308,15 Hz läuft der Strom der Spannung in dieser Schaltung um eine Phase von 85,2° voraus.

Schaltungen wie die **serielle** oder die **parallele RLC-Schaltung** werden auch als **Schwingkreise** bezeichnet. Anwendung finden sie sehr häufig in der **Nachrichtentechnik**.

technik. Dort fungieren sie als Filterschaltungen, die nur auf einen schmalen Bereich um ihre Resonanzfrequenz ansprechen. Aus einer Überlagerung von verschiedenen Trägerfrequenzen des Rundfunks kann durch Abstimmung der Empfängerschaltung (passende Werte von R , L und C) die gewünschte Frequenz herausgefiltert werden.

Umgekehrt verhält sich in der **Sendetechnik** eine Spule mit einer Dipolantenne wie ein Schwingkreis; die Dipolantenne übernimmt die Funktion der Kapazität. Von einer Dipolantenne, an deren Enden eine Wechselspannung liegt, wird eine elektromagnetische Welle ausgesandt. Diese ist eine Welle des elektrischen bzw. magnetischen Feldes. Die beiden Feldkomponenten stehen senkrecht aufeinander. Diese Welle benötigt kein Ausbreitungsmedium.

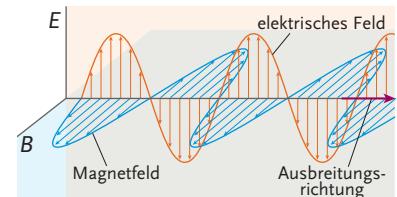


Dipolantenne: Die optimale Länge eines derartigen Dipoles beträgt die halbe Wellenlänge. Sie übernimmt die Funktion eines Kondensators in einer Schwingkreisschaltung, wenn man sie parallel zu einer Spule schaltet.



Ziele erreicht? – „Schaltung von Wechselstromwiderständen“

- 4.2.10 Zeichnen Sie das Verhalten einer seriellen RC-, einer seriellen RL-, einer seriellen RLC- und einer parallelen RLC-Schaltung mit Zeigerdiagrammen.
- 4.2.11 Berechnen Sie für eine serielle RC-Schaltung ($R = 10 \text{ k}\Omega$, $C = 140 \text{ pF}$) die Impedanz und die Phasenverschiebung für eine Wechselspannungs frequenz von 200 Hz.
- 4.2.12 Berechnen Sie für eine serielle RL-Schaltung ($R = 2,4 \text{ k}\Omega$, $L = 850 \text{ mH}$) die Impedanz und die Phasenverschiebung bei einer Wechselspannungs frequenz von 100 Hz.
- 4.2.13 Berechnen Sie für eine serielle RLC-Schaltung ($R = 1,5 \text{ k}\Omega$, $L = 720 \text{ mH}$, $C = 80 \mu\text{F}$) die Impedanz und die Phasenverschiebung bei einer Wechselspannungs frequenz von 50 Hz. Bei welcher Frequenz würde Spannungsresonanz auftreten?
- 4.2.14 Lösen Sie die Aufgabe 4.2.13 für eine parallele RLC-Schaltung. Welche Art der Resonanz tritt nun auf?
- 4.2.15 Wie groß muss in einer RC-Schaltung ($R = 4,7 \text{ k}\Omega$) die Kapazität sein, damit eine Phase von 45° zwischen Strom und Spannung auftritt?
- 4.2.16 Wie groß muss in einer RL-Schaltung ($L = 450 \text{ mH}$) der Widerstand sein, damit eine Phase von 30° zwischen Strom und Spannung auftritt?
- 4.2.17 Welche Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung tritt bei RLC-Schaltungen im Resonanzfall auf?



Elektromagnetische Welle: Das elektrische und das magnetische Feld stehen normal aufeinander und schwingen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (Transversalwelle). Da das elektrische bzw. das magnetische Feld ohne Vorhandensein von Materie im Raum wirken, benötigt die elektromagnetische Welle kein Medium zu ihrer Ausbreitung.

4.2.4 Energie und Leistung im Wechselstromkreis

Im Kapitel Wechselstromwiderstände haben wir beim ohmschen Widerstand festgestellt, dass die an ihm verlorene Leistung mit der Wechselspannung schwankt. Wir werden diese Überlegungen auf andere Wechselstromwiderstände erweitern.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Wirkleistung von Bauelementen** nennen;
- die **Wirkleistung eines ohmschen Widerstandes** und einer realen Spule berechnen;
- die Begriffe **Wirk- und Scheinleistung** erklären.

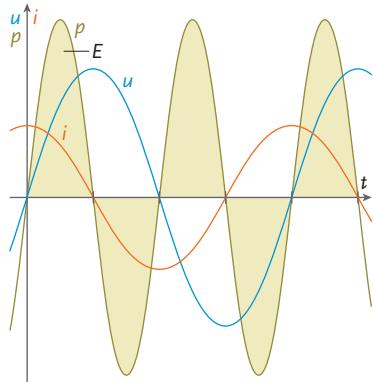


Im Kap. D, 4.2.2 Wechselstromwiderstände wurden die Begriffe **Momentanleistung** und **mittlere Leistung** bereits behandelt.

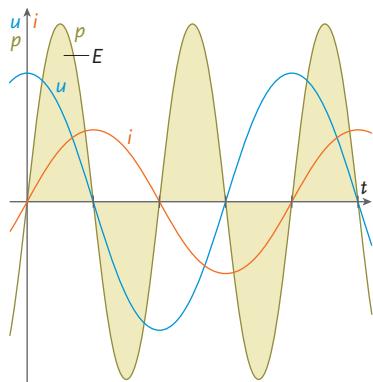


Von den **Summensätzen** in der Mathematik wissen wir:

$$\sin(x) \cdot \cos(x) = \frac{1}{2} \cdot \sin(2x)$$



Zeitlicher Leistungsverlauf am idealen Kondensator: Die Flächen sind die Energieaufnahme bzw. -abgabe des Kondensators. Da die Summe der positiven und der negativen Flächen gleich ist, geht am idealen Kondensator keine elektrische Energie verloren.



Zeitlicher Leistungsverlauf an der idealen Spule: Auch hier ersieht man aus der Gleichheit der positiven und der negativen Flächen, dass die Wirkleistung null ist.

Ohmscher Widerstand

Am ohmschen Widerstand sind Strom und Spannung in Phase.

$$u = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad i = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\text{Momentanleistung: } p = I_0 \cdot U_0 \cdot \sin^2(\omega \cdot t)$$

$$\text{Mittlere Leistung: } P = \frac{U_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{U_0 \cdot I_0}{2} = U \cdot I$$

Diese Leistung wird wirklich am ohmschen Widerstand verbraucht (in Wärme umgewandelt). Man bezeichnet sie daher als **Wirkleistung**.

Idealer Kondensator

Der Strom eilt beim idealen Kondensator der Spannung um 90° voraus.

$$u = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t), \quad i = I_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)$$

$$\text{Momentanleistung: } p = I_0 \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{I_0 \cdot U_0}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)$$

$$\text{Mittlere Leistung: } P = 0$$

Ist die momentane Leistung am Kondensator positiv, so wird ihm von der Spannungsquelle Energie zugeführt. Ist die momentane Leistung negativ, dann gibt der Kondensator die gespeicherte Energie an die Spannungsquelle zurück. Die Energie pendelt zwischen Spannungsquelle und Kondensator hin und her, sie wird nicht verbraucht. Die **Wirkleistung des Kondensators ist null**.

Ideale Spule

An der idealen Spule ist die Spannung dem Strom mit einer Phase von 90° voraus.

$$u = U_0 \cdot \cos(\omega \cdot t), \quad i = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\text{Momentanleistung: } p = I_0 \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \cdot \cos(\omega \cdot t) = \frac{I_0 \cdot U_0}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t)$$

$$\text{Mittlere Leistung: } P = 0$$

Auch bei der idealen Spule pendelt die Energie zwischen der Spannungsquelle und der Spule hin und her und wird nicht wirklich verbraucht. Die **Wirkleistung der idealen Spule ist null**.

Reale Spule

Wie wir im vorigen Kapitel erfahren haben, kann eine reale Spule durch eine Serienschaltung eines ohmschen Widerstandes mit einer idealen Spule dargestellt werden. Dadurch ist die Phasendifferenz zwischen Spannung und Strom kleiner als 90° .

$$u = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\phi), \quad i = I_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\text{Momentanleistung: } p = I_0 \cdot U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \Delta\phi) \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\text{Mittlere Leistung: } P \neq 0$$

Im Falle der realen Spule überwiegen die positiven Anteile der Momentanleistung. Am ohmschen Widerstand der Spule geht wirklich Energie verloren. Im Zeigerdiagramm ergibt die Projektion des Spannungszeigers auf den Stromzeiger die **Wirkleistung**.

Wirkleistung: $P = U \cdot I \cdot \cos(\Delta\varphi)$

Sie führt zur Erwärmung der Spule. Das Produkt $P_S = U \cdot I$ wird als **Scheinleistung** bezeichnet, da zwar der Strom I in der Leitung fließt, aber das obige Produkt P_S nicht in der Schaltung verloren geht.

Beispiel 4.2.06: Leistung einer realen Spule

Eine reale Spule ($L = 0,56 \text{ H}$, $R = 12 \Omega$) wird an die Netzspannung angeschlossen. Wie groß sind Wirk- und Scheinleistung der Spule?

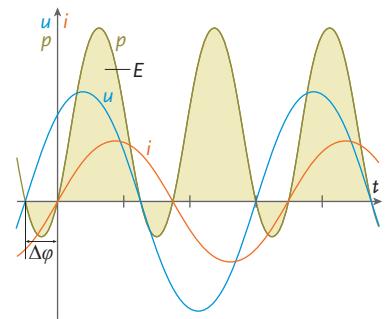
$$\Delta\varphi = \arctan\left(\frac{\omega \cdot L}{R}\right) = \arctan\left(\frac{2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,65 \text{ H}}{12 \Omega}\right) = 86,64^\circ$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega \cdot L)^2} = \sqrt{(12 \Omega)^2 + (2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,65 \text{ H})^2} = 204,56 \Omega$$

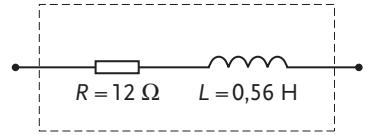
$$I = \frac{U}{Z} = \frac{230 \text{ V}}{204,56 \Omega} = 1,12 \text{ A}$$

$$P_S = U \cdot I = 230 \text{ V} \cdot 1,12 \text{ A} = 257,6 \text{ W}$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\Delta\varphi) = 230 \text{ V} \cdot 1,12 \text{ A} \cdot \cos(86,64^\circ) = 15,1 \text{ W}$$



Zeitlicher Leistungsverlauf an einer realen Spule: Die positiven Energieanteile sind größer als die negativen, d. h., Energie geht in der Spule als Wärme verloren.



Skizze zu Beispiel 4.2.06: Ersatzschaltbild der realen Spule



Ziele erreicht? – „Energie und Leistung im Wechselstrom...“

- 4.2.18 Wie groß ist die Wirkleistung einer realen Spule bei den Effektivwerten von Strom und Spannung von $U = 110 \text{ V}$, $I = 1,8 \text{ A}$ und $\Delta\varphi = 75^\circ$?
- 4.2.19 Berechnen Sie die Wirk- und die Scheinleistung einer realen Spule ($L = 0,48 \text{ H}$, $R = 8 \Omega$), die an eine Wechselspannung von 30 V mit einer Frequenz von 100 Hz angeschlossen ist.
- 4.2.20 Erklären Sie die Begriffe Wirk- und Scheinleistung.

4.2.5 Der Transformator

Transformatoren werden in der Elektrotechnik häufig verwendet. Sie dienen zum Verändern (Transformieren) von Wechselspannungen sowie zur Schutz trennung von Stromkreisen (Trenntrafo). In letzterem Fall wird dadurch ein Stromunfall durch Masse- oder Erdkontakt verhindert.



Meine Ziele

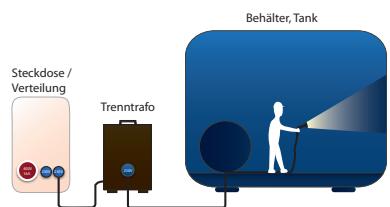
Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Übersetzung von Strom und Spannung** bei einem Transformator angeben;
- den **Energietransport** beim Transformator erklären.

Ein Transformator (kurz Trafo) besteht aus einem **geschlossenen Eisenkern**, auf den zwei getrennte Spulen (**Primär- und Sekundärspule**) aufgewickelt sind. Der Primärspule wird elektrische Energie zugeführt, über die Sekundärspule wird sie entnommen.

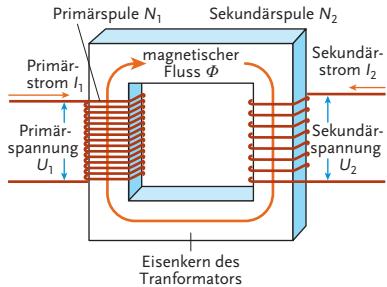
Die an der Primärspule mit N_1 Wicklungen angelegte Wechselspannung U_1 verursacht im Eisenkern einen wechselnden magnetischen Fluss Φ . Das wiederum führt zu einer Selbstinduktionsspannung in der Spule, die der Änderung des Magnetfeldes und damit der angelegten Spannung entgegengerichtet ist.

Anwendungsprinzip eines Trenntransformators



Sicherheitshinweise :
- Nur **einen** Verbraucher an den Trenntrafo anschließen
- Den Trafo außerhalb des Behälters aufstellen
- Trenntransformatoren schützen nicht vor Stromschlag, wenn man beide Ausgangspole berührt!

Da die Erdung immer ein Teil des normalen Stromnetzes ist, ist die Berührung eines Phasenleiters gefährlich. Ein Trenntrafo kommt in sensiblen Bereichen zur Anwendung. Der Stromkreis des Verbrauchergerätes ist dadurch vom Stromnetz getrennt, die Erde ist nicht mehr Teil des Stromkreises. Es kann zu keinem Stromunfall bei Berührung von nur einem Anschlusskontakt kommen. Ein Trenntrafo schützt aber nicht bei versehentlichem Berühren beider Anschlussleitungen.



Schema eines Transformators



In Umspannwerken wird der Strom auf die zum Transport nötigen hohen Spannungen transformiert bzw. auf die im Haushalt nötigen niederen Spannungen zurücktransformiert



Hochspannungsleitungen dienen der Übertragung größerer elektrischer Leistungen. Durch die hohen Spannungen wird der Strom möglichst gering gehalten. Das wiederum minimiert die Verluste am ohmschen Widerstand der Leitungen.

Das sich ändernde Magnetfeld im Eisenkern induziert in der Sekundärspule mit N_2 Wicklungen eine Wechselspannung U_2 . Es gilt dabei:

$$N_1 \cdot \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = U_1 \quad \text{und} \quad N_2 \cdot \left| \frac{d\Phi}{dt} \right| = U_2$$

Die **Spannungen an Primär- und Sekundärspule** verhalten sich **wie die Windungsanzahlen**:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ein **idealer unbelasteter Transformator** nimmt **keine Leistung** auf.

Hängt an der Sekundärspule ein ohmscher Verbraucher, dann fließt ein Wirkstrom durch den Verbraucher, der das Magnetfeld im Kern schwächt. Auf diese Art wirkt die Sekundärspule auf die Primärspule. Die Primärspule nimmt nun ebenfalls einen Wirkstrom auf. Ein idealer Trafo nimmt an der Primärspule eine Wirkleistung $P = U_1 \cdot I_1$ auf und gibt diese Leistung $P = U_2 \cdot I_2$ an der Sekundärspule wieder ab.

Ein idealer belasteter Transformator **überträgt Energie** von der Primär- zur Sekundärspule. **Spannungen und Stromstärken werden dabei transformiert**.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$$

Eine ganz wichtige Anwendung von Trafos ist der möglichst **verlustarme Transport von elektrischer Energie** über längere Strecken. Dazu wird Wechselspannung auf einen möglichst hohen Wert transformiert, um den Strom und damit verbunden den Energieverlust beim Stromfluss zu minimieren. In Österreich besteht das Hochspannungsnetz aus Leitungen mit 110 kV, 220 kV und 380 kV. Das Netz von Leitungen mit 380 kV dient auch zum Austausch von elektrischer Energie mit unseren Nachbarstaaten.

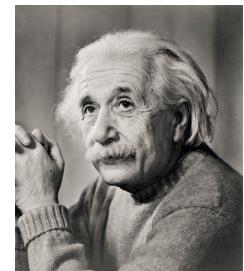


Ziele erreicht? – „Der Transformator“

- 4.2.21** Geben Sie die Formel zur Berechnung von Strom und Spannungen an einem belasteten idealen Trafo an. Wodurch wird dieses Übersetzungsverhältnis bestimmt?
- 4.2.22** Ein Netztrafo hat auf der Primärspule 800 Windungen und nimmt eine Leistung von 42 W auf. Auf der Sekundärseite liefert er eine Spannung von 6 V. Berechnen Sie die Anzahl der Wicklungen der Sekundärspule sowie die Stromstärken auf der Primär- und der Sekundärseite.
- 4.2.23** Welche Stromstärke müsste bei der Übertragung einer Leistung von 1 MW in einer 220-V- bzw. in einer 380-kV-Leitung fließen?
- 4.2.24** Erklären Sie, warum der Transport elektrischer Energie über weitere Strecken mit Hochspannungsleitungen erfolgt.

5 Moderne Physik

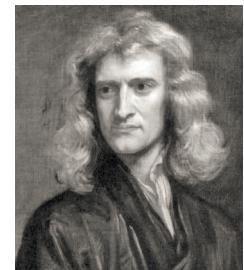
Handys, Laserpointer, CD-Player, GPS-Geräte und viele andere technische Hilfsmittel, die aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken sind, wurden erst durch die Errungenschaften der modernen Physik möglich. Zu den Paradedisziplinen der modernen Physik zählen die Relativitätstheorie, die Quantenmechanik, die Atom-, Kern- und Elementarteilchenphysik, die Hochenergiephysik und die Elektronenoptik. Die Trennung zwischen klassischer und moderner Physik ist nicht scharf, denn selbst innerhalb klassischer Gebiete kann nur die moderne Physik manche Aufgabenstellungen lösen. Andererseits sind einige Phänomene der modernen Physik auch mit den Theorien der klassischen Physik zu erklären.



ALBERT EINSTEIN, 1879 BIS 1955,
DEUTSCHER PHYSIKER; BEGRÜNDER DER RELATIVITÄTSTHEORIE

5.1 Relativitätstheorie

Die **Relativitätstheorie (RT)** wird in die **spezielle Relativitätstheorie (SRT)** und die **allgemeine Relativitätstheorie (ART)** unterteilt. Die spezielle Relativitätstheorie gilt als Krönung der klassischen Mechanik, die allgemeine Relativitätstheorie als Verallgemeinerung der newtonschen Theorie der Gravitation. Die klassische Mechanik ist durch Isaac Newton in unübertroffener Weise analysiert worden, die Relativitätstheorie durch Albert Einstein.



ISAAC NEWTON, 1642 BIS 1727, ENGLISCHER PHYSIKER; BEGRÜNDER DER KLASSEN- MECHANIK UND DER KLASSEN- GRAVATIONSTHEORIE

5.1.1 Die Lichtgeschwindigkeit

Licht fasziniert die Menschen seit jeher. In Science-Fiction-Darstellungen werden Lichtschwerter benutzt und Raumschiffe bewegen sich mit unvorstellbaren Geschwindigkeiten durch Raum und Zeit.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

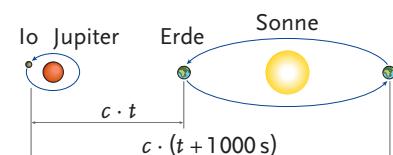
- die Größenordnung der **Lichtgeschwindigkeit** angeben;
- einfache **Berechnungen** für gleichförmige Bewegungen mit Lichtgeschwindigkeit und für gleichmäßig beschleunigte Bewegungen durchführen.

Bereits **Galileo Galilei** (1564 bis 1642) vermutete, dass Licht für das Zurücklegen einer Strecke Δs eine endliche Zeit Δt benötigt. Messgenauigkeit war damals aber nur für astronomische Wegstrecken zu erreichen. **Olaf Römer** studierte 1675 das Eintreten der Jupitermonde in den Schatten ihres Planeten. Der innerste Jupitermond Io benötigt für eine Jupiterumrundung rund 42,5 Stunden, sodass Io in einem halben Jahr Jupiter etwa 103-mal umrundet. Olaf Römer stellte gegenüber den zur Verfügung stehenden Tabellen eine Verspätung von ca. 1 000 Sekunden für ein Halbjahr fest.

Die nebenstehende Skizze liefert die Erklärung, die auch Olaf Römer zur Berechnung der Lichtgeschwindigkeit benutzte. In einem halben Jahr ändert sich der Abstand unserer Erde zu Jupiter, der die Sonne in rund 11,86 Jahren umrundet, etwa um den mittleren Erdbahndurchmesser d von zwei Astronomischen Einheiten.



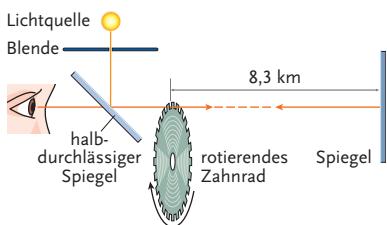
Lichtschwert von Obi Wan in Starwars



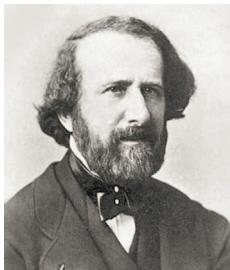
Schematische Darstellung zur Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Olaf Römer. Der Jupitermond Io tritt gerade in den Schatten Jupiters ein. Die Verspätung dieses Eintrittszeitpunktes betrug für einen Beobachtungszeitraum von einem halben Jahr rund 1 000 Sekunden.

Beispiel 5.1.01: Lichtgeschwindigkeit nach Olaf Römer (1675)

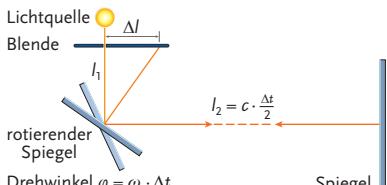
Wir berechnen die Lichtgeschwindigkeit c_0 im Vakuum für eine gleichförmige Bewegung als Quotienten von Wegstrecke Δs und benötigter Zeit Δt .



Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Fizeau; die große Entfernung zwischen Spiegel und Zahnrad erforderte höchste Präzision bei der Ausrichtung



ARMAND HIPPOLYTE LOUIS
FIZEAU, 1819 BIS 1896, FRANZÖSISCHER PHYSIKER; BESTIMMTE DIE LICHTGESCHWINDIGKEIT 1849 MIT EINEM ZAHNRAD



Messung der Lichtgeschwindigkeit nach Foucault, der kurze Lichtweg der Anordnung ermöglichte die Lichtgeschwindigkeitsmessung in transparenten flüssigen und festen Medien

$$\Delta s \approx 2 AE = 2 \cdot 150 \text{ Gm} = 300 \cdot 10^9 \text{ m} = 3 \cdot 10^{11} \text{ m}$$

$$\Delta t = 1000 \text{ s}$$

$$c_0 = \frac{\Delta s}{\Delta t} \approx 3 \cdot \frac{10^{11} \text{ m}}{10^3 \text{ s}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Man kannte also schon im 17. Jahrhundert den Wert der Vakuumlichtgeschwindigkeit relativ genau.

Die Messung der Lichtgeschwindigkeit konnte mit raffinierten Versuchsanordnungen immer weiter verfeinert werden. Wir erwähnen den Zahnradversuch von **Armand Hippolyte Louis Fizeau** im Jahr 1849 und den Drehspiegelversuch von **Jean Bernard Léon Foucault**, der auch die Lichtgeschwindigkeit in Wasser c_{Wasser} zu rund $c_0/3$ bestimmte, im Jahr 1850.

1973 wurde die Vakuumlichtgeschwindigkeit mithilfe eines Lasers als $c_0 = 299\,792\,456,2 \text{ m/s}$ ermittelt. Die Messgenauigkeit betrug $\pm 1,1 \text{ m/s}$.

Beispiel 5.1.02: Messgenauigkeit der Vakuumlichtgeschwindigkeit im Jahr 1973

Wir rechnen die Genauigkeit der Lichtgeschwindigkeitsmessung von 1973 auf eine Wegstrecke um, damit wir ein Gefühl für die Qualität dieser historischen Messung erhalten.

Wenn wir die Strecke Linz – Wien ($\Delta s = 200 \text{ km}$) mit Laserlicht vermessen würden, benötigte das Licht mit einer Geschwindigkeit von $c_0 = 299\,792\,456,2 \text{ m/s}$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{c_0} = \frac{200\,000 \text{ m}}{299\,792\,456,2 \text{ m/s}} \approx 667,128 \mu\text{s}.$$

Würde sich das Licht mit $(299\,792\,456,2 - 1,1) \text{ m/s}$ eine Zeit von $667,128 \mu\text{s}$ lang fortbewegen, schaffte es eine Wegstrecke von rund $\approx 199\,999,999\,266 \text{ m}$.

Die Strecke Linz – Wien könnte also mit der Messgenauigkeit der Lichtgeschwindigkeit von $1,1 \text{ m/s}$ auf etwa einen Millimeter genau bestimmt werden.

Wir erhalten diese Messgenauigkeit der 200-km-Strecke auch, wenn wir die Messunsicherheit von $1,1 \text{ m/s}$ mit der Zeit von $667,128 \mu\text{s}$ multiplizieren.

$$\Delta s = \Delta v \cdot \Delta t \approx 1,1 \text{ m/s} \cdot 667,128 \mu\text{s} \approx 0,73 \text{ mm}$$

Alle weiteren Experimente ergaben völlig überraschend, dass die Vakuumlichtgeschwindigkeit unabhängig vom Bewegungszustand ist. Daher wurde die Vakuumlichtgeschwindigkeit 1983 festgelegt.

Vakuumlichtgeschwindigkeit

Die **Vakuumlichtgeschwindigkeit** ist $c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$.

Dass Licht für eine Strecke von 200 km nur etwa 0,7 Millisekunden benötigt, erstaunt uns. Die menschliche Reaktionszeit in der Größenordnung von einer Zehntelsekunde ist um den Faktor 100 größer als eine Millisekunde. Daher können wir die ungeheure Größe der Vakuumlichtgeschwindigkeit durch diese Überlegung nicht gänzlich erfassen. Die nachfolgenden Beispiele und Versuche sollen uns helfen, ein Gefühl für die Größe der Vakuumlichtgeschwindigkeit im Gegensatz zu alltäglichen Geschwindigkeiten zu bekommen. Für Schätzungen verwenden wir den Näherungswert $c_0 \approx 300\,000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Beispiel 5.1.03: Vakuumlichtgeschwindigkeit mal 3

Wir berechnen, wie lange Licht im Vakuum

- für die Umrundung der Erde in rund 30 km Höhe benötigen würde,
- braucht, um die Strecke Erde – Mond zurückzulegen, und
- wie viel Zeit Licht benötigt, um von der Sonne zur Erde zu gelangen.

a) $\Delta t = \Delta s / c_0 = 2 \cdot (r_E + h) \cdot \pi / c_0$

$$\Delta t \approx 2 \cdot (6370 + 30) \cdot \text{km} \cdot \pi / 300\,000 \text{ km/s} \approx 0,134 \text{ s} = 134 \text{ ms}$$

Licht würde in einer Sekunde ca. 7,5 Umrundungen der Erde schaffen.

b) $\Delta t = \Delta s / c_0 \approx 384\,400 \text{ km} / 300\,000 \text{ km/s} \approx 1,281 \text{ s}$

Bei der Abstandsmessung Erde – Mond benötigt ein Radarsignal rund 2,56 Sekunden, um wieder auf der Erde anzukommen.

c) $\Delta t = \Delta s / c_0 \approx 149,6 \text{ Gm} / 300\,000 \text{ km/s} \approx 499 \text{ s} \approx 8,3 \text{ Minuten}$

Wir blicken 8,3 Minuten in die Vergangenheit, wenn wir die Sonne betrachten.

Mit anderen Worten: Licht, das uns von der Sonne erreicht, wurde von der Sonne (der Sonnenoberfläche) vor ca. 8,3 Minuten ausgesandt.



JEAN BERNARD LÉON FOUCALUT,
1819 BIS 1868, FRANZÖSISCHER
PHYSIKER; BESTIMMTE DIE LICHT-
GESCHWINDIGKEIT 1850 MIT
EINER DREHSPIEGELMETHODE



Elektromagnetische Strahlung braucht rund 100 000 Jahre, um aus dem dichten Sonnenzentrum zur Sonnenoberfläche vorzudringen.



Die folgenden Abkürzungen werden in der physikalischen Literatur gerne verwendet:

- SRT für spezielle Relativitätstheorie und
- ART für allgemeine Relativitätstheorie.

Versuche – Lichtgeschwindigkeit versus Schallgeschwindigkeit

- **100-m-Bahn:** Wir stellen jemanden aus der Klasse an das Ende der 100-m-Laufbahn und lassen die Person mit einem großen hölzernen Startbrett – zwei durch ein Scharnier verbundenen Brettern – mit über den Kopf erhobenen Händen ein lautes Startsignal geben. Wir stellen am Beginn der 100-m-Bahn fest, dass der Knall um rund ein Drittel einer Sekunde verzögert wahrgenommen wird.
- **Basketball:** Wir positionieren uns in einem ebenen Gelände in möglichst großem Abstand von einer Person aus der Klasse, die einen Basketball so hoch als möglich senkrecht in die Luft wirft und auf eine harte Unterlage (Asphalt, Hartplatz) fallen lässt. Bei 300 m Entfernung beträgt der Unterschied zwischen dem optischen und dem akustischen Wahrnehmen des Aufpralls auf den Boden beinahe eine Sekunde.

Bei den beiden nachfolgenden Beispielen wird die Vakuumlichtgeschwindigkeit mit alltäglichen Beschleunigungen in Verbindung gesetzt.

Beispiel 5.1.04: Vakuumlichtgeschwindigkeit und ein Pkw

Wir berechnen, wie lange wir mit einem Pkw, der für das Beschleunigen aus dem Stillstand auf 100 km/h rund 9,3 Sekunden benötigt, ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes und anderer Reibungsverluste beschleunigen müssten, um

- ein Promille der Vakuumlichtgeschwindigkeit und
- die halbe Vakuumlichtgeschwindigkeit zu erreichen.

Wir berechnen dazu die mittlere Beschleunigung a des Pkw.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \approx \frac{(100 / 3,6) \text{ m/s}}{9,3 \text{ s}} \approx 3 \text{ m/s}^2$$

a) $\Delta t = \frac{\Delta v}{a} \approx \frac{300\,000 \text{ m/s}}{3 \text{ m/s}^2} = 100\,000 \text{ s} \approx 1\,667 \text{ Minuten} \approx 27,8 \text{ Stunden}$

b) $\Delta t = \frac{\Delta v}{a} \approx \frac{150\,000\,000 \text{ m/s}}{3 \text{ m/s}^2} = 50\,000\,000 \text{ s} \approx 833\,333 \text{ Minuten} \approx 13\,889 \text{ Stunden}$
 $\approx 579 \text{ Tage} \approx 1,6 \text{ Jahre}$

Wir müssten länger als einen Tag mit rund 3 m/s^2 , also einer Zunahme der Geschwindigkeit von 10,8 km/h pro Sekunde, konstant beschleunigen, um ein Promille der Vakuumlichtgeschwindigkeit zu erreichen, und länger als 1,6 Jahre, um auf 150 000 km/s zu kommen.



Vakuumlichtgeschwindigkeit

$$c_0 \approx 300\,000 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^5 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} = 1,08 \cdot 10^9 \text{ km/h} = 1,08 \cdot 10^{12} \text{ m/h} = 1,08 \text{ Tm/h.}$$



Zum Vergleich von Pkw und Vakuumlichtgeschwindigkeit:
108 km/h ist der zehnmillionste Teil der Vakuumlichtgeschwindigkeit.



OLAF RÖMER, 1644 BIS 1710,
DÄNISCHER PHYSIKER;
ERMITTELTE DIE LICHTGESCHWIN-
DIGKEIT IM JAHR 1675

Beispiel 5.1.05: Die Vakuumlichtgeschwindigkeit und der freie Fall

Wir berechnen, wie lange wir im Vakuum frei fallen müssten, um etwa
 a) ein Prozent der Vakuumlichtgeschwindigkeit und
 b) 90 Prozent der Vakuumlichtgeschwindigkeit
 zu erreichen.

a) $\Delta t = \Delta v / g \approx 3 \cdot 10^6 \text{ m/s} / 10 \text{ m/s}^2 = 3 \cdot 10^5 \text{ s} = 5000 \text{ Minuten}$
 $\Delta t \approx 83,3 \text{ Stunden} \approx 3,5 \text{ Tage}$

Wir müssten rund 3,5 Tage frei fallen, um ein Hundertstel der Lichtgeschwindigkeit zu erreichen, und würden dabei eine unvorstellbare Strecke von $s = g \cdot t^2 / 2 \approx 10 \cdot (3 \cdot 10^5)^2 \text{ m} / 2 = 4,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$, also rund die dreifache Entfernung Erde – Sonne, zurücklegen.

- b) Weil die Beschleunigungszeit bei konstanter Beschleunigung linear mit der Geschwindigkeitsänderung wächst, müssten wir neunzigmal so lange frei fallen, um 90 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit zu erreichen.
 $\Delta t \approx 3,5 \text{ Tage} \cdot 90 = 315 \text{ Tage}$. Weil die Strecke bei der gleichmäßigen Beschleunigung mit dem Quadrat der Beschleunigungszeit wächst, würden wir den 8100-fachen Weg aus a) zurücklegen,
 $s \approx 4,5 \cdot 10^{11} \cdot 8100 \text{ m} \approx 3,65 \cdot 10^{15} \text{ m}$. Das sind fast 38,5 % eines Lichtjahres, jener Strecke, die das Licht in einem Jahr zurücklegt.



Ziele erreicht? – „Die Lichtgeschwindigkeit“

- 5.1.01** Geben Sie die **Vakuumlichtgeschwindigkeit** in km/s, km/h und m/s an.
- 5.1.02** Beschreiben Sie die Methode zur **Lichtgeschwindigkeitsberechnung** von Olaf Römer und führen Sie die Berechnung selbst durch.
- 5.1.03** Berechnen Sie, wie lange Sie mit einem **Sportwagen**, der in rund 5,6 Sekunden von 0 auf 100 km/h beschleunigt, ohne Berücksichtigung des Luftwiderstandes und anderer Reibungsverluste beschleunigen müssten, um ein Prozent der Lichtgeschwindigkeit zu erreichen. Welchen Weg würden Sie dabei zurücklegen? Fertigen Sie das zugehörige v-t-Diagramm an.
- 5.1.04** Berechnen Sie, wie lange Sie im Vakuum **frei fallen** müssten, um ein Promille der Lichtgeschwindigkeit zu erreichen. Welchen Weg würden Sie dabei zurücklegen? Fertigen Sie das zugehörige v-t- und s-t-Diagramm an. Skalieren Sie das s-t-Diagramm so, dass der Graph ebenfalls eine Gerade ergibt.



Beim Interferenzversuch von Michelson und Morley wird die Lichtgeschwindigkeit in Bewegungsrichtung der Erde und senkrecht dazu bestimmt und beide Werte werden miteinander verglichen. Licht, das sich in Richtung der Erdbewegung hin und her bewegt, müsste langsamer sein, wenn ein Lichtäther existiert, als Licht, das sich senkrecht dazu bewegt.

5.1.2 Einsteinsche Postulate

Albert Einstein arbeitete 1905 in einem Schweizer Patentamt und eine Uhr soll ihn – als 26-Jährigen – zu seinen Gedankenexperimenten angeregt haben. Wir werden in diesem Kapitel logisch folgern, dass die klassische Geschwindigkeitsaddition für Licht nicht mehr gültig ist.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die beiden **einsteinschen Postulate** wiedergeben;
- die **einsteinsche Lichtuhr** qualitativ und quantitativ beschreiben;
- die Unabhängigkeit der **Lichtgeschwindigkeit im Vakuum** vom Bewegungszustand akzeptieren.

Die Physik des beginnenden 20. Jahrhunderts war noch so sehr im mechanistischen Denken verwurzelt, dass sie für die Ausbreitung von Licht – allgemeiner für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen – ein Trägermedium annahm. Wir wissen aus dem Kapitel Wellen, dass Luft das Trägermedium für Schallwellen in Luft ist. Mit dem von Michelson und Morley mit großer Sorgfalt durchgeführten Interferenzversuch konnte das vermutete Trägermedium, das als Lichtäther bezeichnet wurde, nicht nachgewiesen werden. Albert Einstein löste dieses Dilemma mit zwei Postulaten bzw. Prinzipien.

Relativitätsprinzip

Die **Naturgesetze** nehmen in allen **Inertialsystemen** die gleiche mathematische Form an. Alle **Inertialsysteme** sind gleichberechtigt.

In der speziellen Relativitätstheorie werden nur unbeschleunigte Bezugssysteme verwendet und physikalische Prozesse werden relativ zu diesen Inertialsystemen beschrieben.

Aus dem Relativitätsprinzip folgt auch, dass der von Isaac Newton angenommene absolute Raum aufgegeben werden muss.

Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die **Geschwindigkeit des Lichts** hat im Vakuum unabhängig vom Bewegungszustand von Quelle und Beobachter in allen Inertialsystemen immer denselben Wert c_0 .

Dieses zweite Postulat Einsteins legt den Zahlenwert und die Einheit von c_0 nicht fest, lediglich die Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Wir haben aber bereits oben angeführt, dass c_0 1983 mit 299 792 458 m/s festgelegt wurde.

Beispiel 5.1.06: Laufende Hundeliebhaberin

Wir denken an eine sportliche Hundeliebhaberin, die ihrem Vierbeiner beim Laufen einen Ball in Laufrichtung wirft.

Wenn die Laufgeschwindigkeit 18 km/h und die Abwurfgeschwindigkeit 36 km/h beträgt, hat der für den Hund geworfene Ball relativ zum Bezugssystem Erde die Geschwindigkeit

$$v_{\text{Ball} - \text{Erde}} = v_{\text{Ball} - \text{Hand}} + v_{\text{Hand} - \text{Erde}} = (18 + 36) \text{ km/h} = 54 \text{ km/h}.$$

Schaltet die laufende Tierfreundin wegen Dunkelheit eine Stirnlampe ein, so ergäbe sich nach der klassischen Geschwindigkeitsaddition

$$v_{\text{Licht} - \text{Erde}} = v_{\text{Licht} - \text{Mensch}} + v_{\text{Mensch} - \text{Erde}} \approx (300\,000\,000 + 5) \text{ m/s} > c_0.$$

Das Licht würde sich relativ zur Erde damit schneller ausbreiten als im Vakuum. Dies ist ein Widerspruch zum Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit, sodass die klassische Geschwindigkeitsaddition nicht gültig sein kann.

Albert Einstein löste auch diesen Widerspruch. Er ermittelte die korrekte Formel für die Geschwindigkeitsaddition, die im Grenzfall für kleine Geschwindigkeiten in die klassische Formel übergeht.



Mechanische Wellen benötigen ein Trägermedium.



Licht als elektromagnetische Welle kommt ohne Trägermedium aus.

Ein **Inertialsystem** ist ein gleichförmig bewegtes Bezugssystem, in dem das Trägheitsgesetz gilt.



Trägheitsgesetz: Ein Körper verharrt im Zustand der Ruhe oder der gleichförmigen Bewegung, solange keine Kraft auf ihn einwirkt.

Inertia: lateinisch für Trägheit.



Hundebesitzer sollten ihren Vierbeinern viel Bewegung – oft auch mit entsprechender Geschwindigkeit – gönnen

Relativistische Geschwindigkeitsaddition

Die **Gesamtgeschwindigkeit (Relativgeschwindigkeit)** für die beiden Einzelschwindigkeiten v_1 und v_2 ergibt sich zu

$$v_{\text{ges}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c_0^2}}.$$



Im Grenzfall für $v \ll c_0$ bestätigt die SRT die newtonsche Mechanik.

CERN: europäisches Kernforschungszentrum; Centre Européen de Recherches Nucléaires.

Für $v_1 \ll c_0$ und $v_2 \ll c_0$ gilt die klassische Geschwindigkeitsformel $v_{\text{ges}} = v_1 + v_2$.

Beispiel 5.1.07: Sonderfälle für die relativistische Geschwindigkeitsaddition

- a) Ein mit $v < c_0$ relativ zu einem Inertialsystem (z. B. zur Erde) bewegter Körper emittiert Licht im Vakuum mit c_0 . Die Geschwindigkeit des ausgesandten Lichts relativ zum Inertialsystem erhalten wir zu

$$v_{\text{ges}} = \frac{v + c_0}{1 + \frac{v \cdot c_0}{c_0^2}} = \frac{v + c_0}{1 + \frac{v}{c_0}} = \frac{v + c_0}{c_0 + v} \cdot c_0 = c_0.$$

- b) Zwei Protonen werden im **CERN** mit jeweils 90 % der Lichtgeschwindigkeit, relativ zur Erde gemessen, zur Kollision gebracht. Wir berechnen die Geschwindigkeit eines Protons relativ zum anderen.

$$v_{\text{ges}} = \frac{0,9 c_0 + 0,9 c_0}{1 + \frac{0,9 c_0 \cdot 0,9 c_0}{c_0^2}} = \frac{1,8 c_0}{1,81} \approx 0,9945 c_0$$

- c) Ein mit Lichtgeschwindigkeit relativ zu einem Inertialsystem fliegendes Science-Fiction-Raumschiff feuert mit einer Laserwaffe. Die Geschwindigkeit des ausgesandten Laserstrahls relativ zum Inertialsystem erhalten wir zu

$$v_{\text{ges}} = \frac{c_0 + c_0}{1 + \frac{c_0 \cdot c_0}{c_0^2}} = \frac{2c_0}{2} = c_0$$



Ziele erreicht? – „Einstinsche Postulate“

- 5.1.05** Geben Sie die beiden **Postulate** von Albert Einstein an.
- 5.1.06** Eine radioaktive Substanz wird in einer Trägerrakete ins Weltall gebracht. Berechnen Sie die Geschwindigkeit eines mit zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit emittierten Teilchens bei einem radioaktiven Zerfall relativ zur Erde, wenn die Rakete mit der **ersten kosmischen Geschwindigkeit** unterwegs ist.
- 5.1.07** Berechnen Sie die Geschwindigkeit eines Protons relativ zum entgegenkommenden, wenn die beiden Protonen mit jeweils 95 % der Lichtgeschwindigkeit, relativ zur Erde gemessen, zur Kollision gebracht werden.
- 5.1.08** Recherchieren Sie über den Unterschied zwischen dem Relativitätsprinzip der Mechanik und dem Relativitätsprinzip von Albert Einstein.

Die **erste kosmische Geschwindigkeit** für die Erde beträgt etwa 7,91 km/s = 28 476 km/h. Ein Flugkörper benötigt die erste kosmische Geschwindigkeit, um einen Himmelskörper antriebslos auf einer Kreisbahn zu umrunden.

5.1.3 Die einsteinsche Lichtuhr

Albert Einstein ersann eine Lichtuhr, die als periodischen Vorgang das Hin und Herpendeln eines einzelnen Lichtteilchens (Lichtquants) zwischen zwei idealisierten planparallelen Spiegeln benutzte.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **einstein'sche Lichtuhr** qualitativ beschreiben;
- die bewegte **einstein'sche Lichtuhr** quantitativ erfassen;
- die Folgerungen für reale Prozesse akzeptieren.

Wir betrachten zuerst die in der Randspalte dargestellte Lichtuhr in Ruhe. Das Lichtquant wird von den Spiegeln im Abstand d jeweils reflektiert, sodass die Periodendauer T , die Zeit für einen Hin- und Rückweg, $2d / c_0$ beträgt. Diese Periodendauer misst sowohl ein in der Lichtuhr ruhender Beobachter als auch ein außerhalb der Lichtuhr ruhender Beobachter.

Wenn wir nun die Lichtuhr mit $v \approx c_0 / 2$ gleichförmig nach rechts bewegen, erhalten wir die nebenstehenden Momentaufnahmen für $t = 0$ s, $t = T / 2$ und $t = T$. Wenn wir uns mit der Lichtuhr mitbewegen, ist die Bewegung des Quants wie im Fall der ruhenden Lichtuhr senkrecht zu den Spiegeln. Wir messen im mit v gleichförmig bewegten System die Zeit t_b .

Wenn wir relativ zur Lichtuhr ruhen, hat sich die Uhr in der Zeit $T / 2$ um die Strecke $\Delta s = v \cdot T / 2$ nach rechts bewegt und das Lichtquant wird gerade am oberen Spiegel reflektiert. Nach einer weiteren halben Periodendauer ist das Lichtquant wieder beim unteren Spiegel angekommen. Wir nehmen als ruhende Beobachter eine Zickzacklinie wahr. Weil wir im ruhenden System die Zeit t_r messen, können wir den schrägen Lichtweg mit $s_r = c_0 \cdot t_r$ berechnen.

Den lotrechten Lichtweg nimmt nur ein mit der Lichtuhr mitbewegter Beobachter wahr, sodass wir ihn mit s_b bezeichnen und gemäß $s_b = c_0 \cdot t_b$ berechnen.

Die waagrechte Strecke s_w wird wiederum nur vom ruhenden Beobachter wahrgenommen, sodass $s_w = v \cdot t_r$ gilt.

Mit dem pythagoreischen Lehrsatz erhalten wir

$$\begin{aligned} s_r^2 &= s_w^2 + s_b^2 \\ (c_0 \cdot t_r)^2 &= (v \cdot t_r)^2 + (c_0 \cdot t_b)^2 \end{aligned}$$

Ausquadrieren und Auflösen nach der im gleichförmig bewegten Bezugssystem gemessenen Zeit t_b liefert die Formel

$$t_b = t_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$$

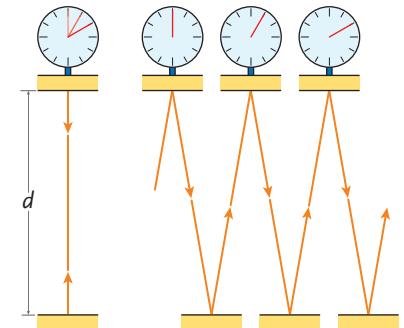
für die Zeitdehnung bei gleichförmiger Bewegung.

Zeitdehnung bzw. Zeitdilatation

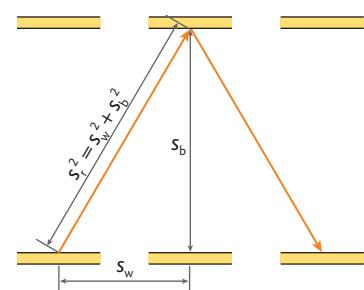
Ein Vorgang, der in einem ruhenden System die Zeit t_r dauert, ergibt bei einer Messung in einem relativ dazu mit v bewegten System die kleinere Zeit t_b .

$$t_b = t_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$$

Wir erkennen sofort, dass für $v = 0$ m/s t_b gleich t_r ist, also $t_b = t_r$.



Prinzipskizze für die einstein'sche Lichtuhr; links die ruhende und rechts die gleichförmig bewegte Lichtuhr



Die gleichförmig bewegte Lichtuhr $v \approx c_0 / 2$



Der Index b wird für physikalische Größen in einem gleichförmig bewegten Bezugssystem verwendet, der Index r für physikalische Größen in einem ruhenden Bezugssystem.



Die einsteinsche Lichtuhr zeigt, dass die physikalische Größe Zeit vom Bewegungszustand – der Geschwindigkeit v – abhängt. Das gilt auch für die Gleichzeitigkeit.

Relativität der Gleichzeitigkeit

Ob zwei Ereignisse gleichzeitig stattfinden oder nicht, hängt vom Bewegungszustand des Beobachters ab.

Wir können uns das durch einen Waggon veranschaulichen, in dessen Mitte eine Lampe hängt. Ruht der Waggon und wird die Lampe eingeschaltet, erreicht das Licht beide Waggonenden gleichzeitig. Ist der Zug gleichförmig nach rechts bewegt, kommt das Licht für einen außerhalb des Waggons ruhenden Beobachter zuerst am linken Waggonende an.



Ein berühmtes Uhrenexperiment wurde 1971 von **Joseph Hafele** und **Richard Keating** mit vier Cäsiumuhren an Bord eines kommerziellen Linienflugzeugs durchgeführt. Sie umrundeten zweimal die Erde, zuerst ostwärts, dann westwärts, und verglichen die Anzeige der Atomuhren an Bord mit der von Atomuhren auf der Erdoberfläche.

Mit **Myonen** gelang im Jahre 1940 der experimentelle Nachweis der Zeitdilatation. Myonen entstehen in der oberen Erdatmosphäre durch den Aufprall kosmischer Strahlung auf Moleküle der oberen Luftsichten. Sie sind negativ geladene Elementarteilchen.

Beispiel 5.1.08: Sonderfälle für die einsteinsche Lichtuhr

- a) Eine einsteinsche Lichtuhr bewege sich mit Schallgeschwindigkeit. Wir berechnen die relative Zeitänderung.

$$\frac{t_b}{t_r} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_{\text{Schall}}}{c_0}\right)^2} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{330 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}\right)^2} = \sqrt{1 - (1,1 \cdot 10^{-6})^2}$$

$$\frac{t_b}{t_r} = \sqrt{1 - 1,21 \cdot 10^{-12}} \approx 0,999\,999\,999\,999\,395$$

Wir sehen, dass bei alltäglichen Geschwindigkeiten von Körpern die Zeitdehnung im Allgemeinen vernachlässigt werden kann.

- b) Eine einsteinsche Lichtuhr bewege sich mit halber Lichtgeschwindigkeit. Wir berechnen die relative Zeitänderung.

$$\frac{t_b}{t_r} = \sqrt{1 - \left(\frac{c_0}{2}\right)^2} \approx \sqrt{1 - \left(\frac{1}{2}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{1}{4}} = \sqrt{\frac{3}{4}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0,866$$

Die mit halber Lichtgeschwindigkeit bewegte Uhr zeigt also eine um 13,4 % kürzere Zeit an.

- c) Eine einsteinsche Lichtuhr bewege sich mit 90 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Wir berechnen die relative Zeitänderung.

$$\frac{t_b}{t_r} = \sqrt{1 - \left(\frac{0,9 \cdot c_0}{c_0}\right)^2} \approx \sqrt{1 - (0,9)^2} = \sqrt{1 - 0,81} = \sqrt{0,19} \approx 0,436$$

Nun beträgt die Zeitverkürzung schon mehr als 56 Prozent.

Um mit GPS (global positioning system) auf der Erde genaue Angaben zu erhalten, müssen relativistische Effekte berücksichtigt werden.



Ziele erreicht? – „Die einsteinsche Lichtuhr“

- 5.1.09** Beschreiben Sie die **einstein'sche Lichtuhr**.

- 5.1.10** Berechnen Sie die **relative Zeitänderung** für eine mit $v = c_0 / 3$ gleichförmig bewegte Lichtuhr.

- 5.1.11** Ermitteln Sie, mit welcher **Geschwindigkeit** sich eine einsteinsche Lichtuhr bewegen müsste, damit die Dauer eines **Myonenzerfalls** mit dem Faktor 100 gedehnt wird, und geben Sie die beiden Zeiten an. Recherchieren Sie die benötigten Daten.

5.1.4 Zeitdilatation und Längenkontraktion

Auch in populärwissenschaftlichen Magazinen liest man im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie Sätze wie „Bewegte Uhren gehen langsamer.“ Und: „Bewegte Maßstäbe sind verkürzt.“ Wir werden in diesem Kapitel die mathematische Beschreibung dieser Aussagen liefern.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Zeitdilatation** und die **Längenkontraktion** angeben;
- typische Beispiele zur **Zeitdilatation** und der **Längenkontraktion** selbstständig lösen;
- die auf der Erdoberfläche gemessene **Myonenhäufigkeit** interpretieren.

Die von uns im vorangegangenen Kapitel abgeleitete Formel für die Zeitdehnung in einer gleichförmig bewegten Lichtuhr ist allgemeingültig.

Zeitdehnung bzw. Zeitdilatation

Benötigt ein bestimmter Vorgang in einem ruhenden System S_r die Zeit t_r , dann misst ein relativ zum System S_r mit v gleichförmig bewegter Beobachter die Zeit t_b .

$$t_b = t_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$$

Der Faktor $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$ ist immer kleiner als oder gleich 1, sodass $t_b \leq t_r$.

Wenn eine ruhende Uhr beispielsweise für einen Vorgang eine Zeit t_r von einer Stunde anzeigt, dann ist t_b für $0 < v < c_0$ kleiner als eine Stunde. Die Uhr in einem gleichförmig bewegten System – die bewegte Uhr – zeigt also eine kleinere Zeitspanne als eine Stunde an und wir können schreiben: **Bewegte Uhren gehen langsamer.**

Beispiel 5.1.09: Zeitdilatation

Auf einem bestimmten Himmelskörper dauert der Fall eines nach einem Vulkanausbruch in die Höhe geschleuderten Körpers drei Sekunden. Wir berechnen, welche Zeit für diesen freien Fall auf einem Kometen, der sich mit 20 km/s relativ zum Himmelskörper bewegt, gemessen würde.

Wir schreiben die gegebenen physikalischen Größen an:

$$t_r = 3 \text{ s}, v = 20 \text{ km/s}, c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$t_b = 3 \text{ s} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{20\,000}{299\,792\,458}\right)^2} \approx 2,999\,999\,993 \text{ s}$$

Weil wir in der SRT immer gleichförmige Bewegungen betrachten, können wir mit Hilfe der Zeitdilatation sofort auf die Änderungen in der Längenmessung schließen. Wir betrachten dazu eine Messstrecke der Länge l_r , die in einem ruhenden System gemessen wird. Für die Messstrecke der Länge l_r benötigt ein Lichtstrahl die Zeit $t_r = l_r / c_0$. Bewegt sich ein Beobachter relativ mit $v < c_0$ parallel zur Messstrecke, so misst er für den Lichtstrahl eine kürzere Zeit t_b . Folglich muss auch die Messstrecke für den bewegten Beobachter in Bewegungsrichtung verkürzt sein.



Man kann mit einem Augenzwinkern behaupten, dass bereits die Heilige Schrift die Zeitdehnung kennt, wenn man beispielsweise auf den Brief des Apostels Petrus verweist:

„Das eine aber, liebe Brüder, dürft ihr nicht übersehen: dass beim Herrn ein Tag wie tausend Jahre und tausend Jahre wie ein Tag sind.“ (2 Petrus 3, 8.)



Berechnen Sie, wie schnell sich eine Gottheit bewegen müsste, damit tausend Jahre wie ein Tag sind.



Ein sehr populäres Phänomen der SRT ist das **Zwillingsparadoxon**. Würde ein Zwilling eine sehr lange dauernde Reise mit einem sehr schnellen Raumschiff unternehmen, wäre er bei der Rückkehr zur Erde jünger als der auf der Erde im Vergleich zum Raumschiff beinahe ruhende Zwilling.

Diskutieren Sie, welche Phasen des Raumschifffluges nicht durch die SRT beschrieben werden können.

Längenverkürzung bzw. Längenkontraktion

Für eine Strecke der Länge l_r misst ein relativ zur Strecke mit v gleichförmig in Längsrichtung der Strecke bewegter Beobachter die Länge l_b .

$$l_b = l_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$$

Der Wurzelfaktor ist immer kleiner als oder gleich 1, sodass $l_b \leq l_r$.

Kurz: Bewegte (Maß-)Stäbe sind in Bewegungsrichtung verkürzt bzw. kontrahiert.

Beispiel 5.1.10: Myonenzerfall und Längenkontraktion

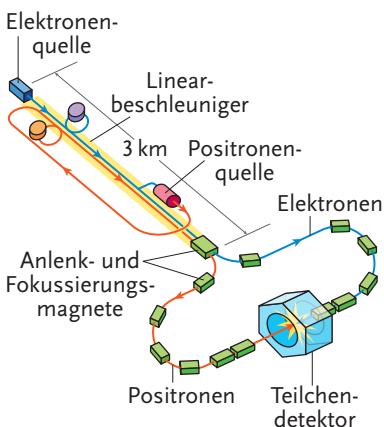
Myonen werden in ca. 10 km Höhe über der Erdoberfläche durch die kosmische Strahlung erzeugt und bewegen sich mit rund 99,94 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit in alle Richtungen. Ruhende Myonen zerfallen mit einer Halbwertszeit von rund 2,2 μs . Wir berechnen, welche Entfernung die bewegten Myonen bis zur Erde wahrnehmen.

Wir schreiben die gegebenen physikalischen Größen an:

$$t_r = 2,2 \mu\text{s}, l_r = 10 \text{ km}, v = 0,9994 \cdot c_0$$

$$l_b = 10 \text{ km} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,9994 \cdot c_0}{c_0}\right)^2} = 10 \text{ km} \cdot \sqrt{1 - (0,9994)^2} \approx 346 \text{ m}$$

Für Myonen ist es deshalb möglich, die Erde zu erreichen, bevor sie zerfallen.



Der Linearbeschleuniger in Stanford (USA) ist 3 km lang und kann Elektronen bzw. Positronen bis 50 GeV beschleunigen.



Eine Energie von 50 GeV hat ein Elektron, wenn es von einer Spannung von 50 GV = 50 000 Millionen Volt beschleunigt wird. Eine weitere Vorstellung von dieser gewaltigen Energie von 50 GeV für ein Elektron erhalten wir im nächsten Kapitel.

Ziele erreicht? – „Zeitdilatation und Längenkontraktion“

- 5.1.12** Geben Sie die Formeln für die **Zeitdilatation** und die **Längenkontraktion** an.
- 5.1.13** Berechnen Sie, mit welcher Geschwindigkeit sich ein **Proton** in einem Linearbeschleuniger bewegen muss, damit die in Ruhe gemessene Beschleunigungsstrecke von einem Kilometer für das Proton um 20 Prozent kürzer ist.
- 5.1.14** Berechnen Sie die **Zeitdilatation** für einen Formel-1-Piloten, wenn Sie vereinfachend annehmen, dass er auf einer kreisförmigen Teststrecke eine Stunde lang mit 200 km/h unterwegs ist.
- 5.1.15** Recherchieren Sie über den **Myonenzerfall**. Stellen Sie den Anteil der noch nicht zerfallenen Myonen als Funktion der bereits verstrichenen Zeit sowohl klassisch als auch relativistisch dar.

5.1.5 Transformationen

Transformatoren werden im Alltag hauptsächlich mit der elektrischen Spannungswandlung in Verbindung gebracht. Beispiele sind Transformatoren für das Handyladegerät (ca. 5 Volt), das Notebook (rund 20 V), die Modelleisenbahn oder ein Kraftwerk. Mathematikerinnen und Mathematiker denken bei Transformationen allgemeiner an Verschiebungen bzw. Umformungen. In diesem Kapitel werden zwei spezielle – nach berühmten Physikern benannte – Transformationen diskutiert. Dabei werden wir dem Term $\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$, den wir bei der Zeitdilatation und Längenkontraktion benötigten, wieder begegnen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Galileitransformation** und die **Lorentztransformation** unterscheiden;
- Transformationen durchführen;
- die Verknüpfung zwischen Raum und Zeit durch die **Lorentztransformation** verstehen.

Wir betrachten ein Inertialsystem I und ein relativ dazu gleichförmig mit $v \ll c_0$ der Einfachheit halber nur in x-Richtung bewegtes Inertialsystem I_b.

Hat ein Punkt P die Raumkoordinaten $(x | y | z)$ im Inertialsystem I, dann berechnen sich die Raumkoordinaten $(x_b | y_b | z_b)$ für das mit v nach rechts bewegte Inertialsystem I_b nach Galileo Galilei mit der Galileitransformation gemäß

$$x_b = x - v \cdot t, \quad y_b = y \text{ und } z_b = z.$$

Für die Zeit gilt in der **klassischen Physik** $t_b = t$. Sie ist vom Ort und von der Bewegung unabhängig.

Bewegt sich das Inertialsystem I_b hingegen mit großer Geschwindigkeit, müssen wir die Zeitdilatation und die Längenkontraktion berücksichtigen. Wir führen die dann gültige Lorentztransformation ohne Herleitung an.

Lorentztransformation

Hat ein Punkt P die Raumkoordinaten $(x | y | z)$ im Inertialsystem I zur Zeit t , dann berechnen sich die Raumkoordinaten $(x_b | y_b | z_b)$ für das mit v nach rechts bewegte Inertialsystem I_b gemäß der **Lorentztransformation**

$$x_b = \gamma \cdot (x - v \cdot t)$$

$$y_b = y$$

$$z_b = z, \text{ mit}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}}$$

und die Zeit transformiert sich gemäß

$$t_b = \gamma \cdot \left(t - \frac{v \cdot x}{c_0^2} \right).$$

Die Rücktransformation bzw. inverse Transformation vom bewegten Inertialsystem I_b in das Inertialsystem I erfolgt gemäß

$$x = \gamma \cdot (x_b + v \cdot t_b)$$

$$y = y_b$$

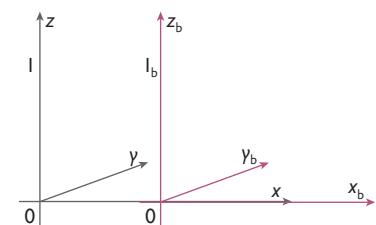
$$z = z_b \text{ und}$$

$$t = \gamma \cdot \left(t_b + \frac{v \cdot x_b}{c_0^2} \right).$$

Zur Berechnung der Zeit im bewegten System muss nicht nur die Zeit des ruhenden Systems, sondern auch die x-Koordinate verwendet werden, wenn die Bewegung längs der x-Achse erfolgt. Raum und Zeit sind miteinander verknüpft, man spricht von der vierdimensionalen **Raumzeit** $(x | y | z | c_0 \cdot t)$.



Galileitransformation siehe
NAWI I/II, Kap. B, 1.2.1.1.



Zwei Inertialsysteme: Das zweite I_b bewegt sich mit $v = \text{konstant}$ relativ zum ersten in die positive x-Richtung



Physikalische Größen, deren Zahlenwert von der Relativgeschwindigkeit zwischen Beobachter und beobachtetem System abhängt, heißen relative Größen. Wir haben bereits Länge, Masse und Zeit als relative physikalische Größen identifiziert.



Ist der Zahlenwert einer physikalischen Größe beobachterunabhängig, ist sie eine absolute Größe. Die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist – wegen Einsteins Postulat von ihrer Konstanz – eine absolute Größe.



HENDRIK ANTOON LORENTZ,
1853 BIS 1928, NIEDERLÄNDISCHER
MATHEMATIKER UND PHYSIKER,
DIE LORENTZKRAFT UND DIE
LORENTZTRANSFORMATION SIND
NACH IHM BENANNT



Hendrik Antoon Lorentz beschäftigte sich auch mit der maxwellschen Theorie der Elektrizität und des Lichts, besonders mit der Bewegung elektrisch geladener Teilchen. Er postulierte das Elektron als Träger von elektrischer Ladung und konnte damit das Verhalten von Licht beim Durchgang durch transparente Körper erklären. Lorentz und der niederländische Physiker **Pieter Zeeman** erhielten 1902 den Nobelpreis für Physik, nachdem **Conrad Wilhelm Röntgen** 1901 den ersten Physiknobelpreis erhalten hatte.

Beispiel 5.1.11: Lorentztransformation

Wir betrachten einen Punkt P (1 m | 2 m | 3 m) im Inertialsystem I zur Zeit $t = 2 \mu\text{s}$. Für ein mit $v = c_0 / 2$ in x-Richtung gleichförmig bewegtes Inertialsystem I_b gilt dann:

$$x_b = \gamma \cdot (x - v \cdot t) = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,5)^2}} \cdot \left(1 \text{ m} - \frac{c_0}{2} \cdot 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}\right) \approx 1,12 \text{ m und}$$

$$t_b = \gamma \cdot (t - v \cdot x/c_0^2) = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,5)^2}} \cdot \left(2 \mu\text{s} - \frac{c_0 \cdot 1 \text{ m}}{2 \cdot c_0^2}\right) \approx 2,3 \mu\text{s}.$$

Wir leiten nun mithilfe der Lorentztransformation die Formel für die relativistische Gesamtgeschwindigkeit ab, die wir in Kapitel 5.1.2 ohne Herleitung angegeben haben.

$$\text{Die abzuleitende Formel lautet } v_{\text{ges}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c_0^2}}.$$

Wir betrachten dazu drei Inertialsysteme I, I₁ und I₂.

Das Inertialsystem I₁ bewege sich gleichförmig mit v_1 relativ zu I und das Inertialsystem I₂ bewege sich gleichförmig mit v_2 relativ zu I₁.

Wir wollen die Geschwindigkeit des Inertialsystems I₂ relativ zu I berechnen.

Wir nehmen ohne Einschränkung der Allgemeinheit an, dass die Bewegungen nur längs der x-Achsen erfolgen.

Aus der Rücktransformation von Lorentz erhalten wir für x

$$x = \gamma \cdot (x_1 + v_1 \cdot t_1) = \gamma \cdot t_1 \cdot \left(\frac{x_1}{t_1} + v_1\right) = \gamma \cdot t_1 \cdot (v_2 + v_1).$$

Für die Zeit t ergibt sich mit der Rücktransformation

$$t = \gamma \cdot \left(t_1 + \frac{v_1 \cdot x_1}{c_0^2}\right) = \gamma \cdot \left(t_1 + \frac{v_1 \cdot v_2 \cdot t_1}{c_0^2}\right) = \gamma \cdot t_1 \cdot \left(1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c_0^2}\right).$$

Wenn wir die beiden Gleichungen durcheinander dividieren, erhalten wir nach Kürzen von $\gamma \cdot t_1$

$$\frac{x}{t} = v_{\text{ges}} = \frac{v_2 + v_1}{1 + \frac{v_1 \cdot v_2}{c_0^2}}.$$

Mit dem Kommutativgesetz der Addition folgt die gesuchte Formel.



Ziele erreicht? – „Transformationen“

5.1.16 Geben Sie die **Galileitransformation** und die **Lorentztransformation** an.

5.1.17 Berechnen Sie die vierdimensionale **Raumzeit** ($x_b | y_b | z_b | c_0 \cdot t_b$) für einen Punkt P (10 m | 5 m | 2 m) im Inertialsystem I zur Zeit $t = 6 \mu\text{s}$ für ein mit $v = c_0 / 3$ in x-Richtung gleichförmig bewegtes Inertialsystem I_b.

5.1.18 Leiten Sie die **Lorentztransformation** ab. Gehen Sie dazu von der Galileitransformation aus und verwenden Sie einen noch zu bestimmenden geschwindigkeitsabhängigen Faktor für ein Lichtsignal, das sich zum Zeitpunkt $t = 0 \text{ s}$ vom Koordinatenursprung in x-Richtung bewegt.

5.1.6 Relativistische Masse und relativistische Energie

In den vorangegangenen Kapiteln haben wir festgestellt, dass eine Bewegung mit großer Geschwindigkeit unserer alltäglichen Vorstellung von Länge, Zeit, Geschwindigkeitsaddition und Raum widerspricht. Nun werden wir analysieren, wie sich eine gleichförmige Bewegung mit einer Geschwindigkeit nahe der Vakuumlichtgeschwindigkeit auf die Masse und die Energie auswirkt. Dazu verwenden wir auch die berühmteste Formel von Albert Einstein $E = m \cdot c_0^2$. Dass Energie proportional zum Produkt aus Masse und Geschwindigkeitsquadrat ist, kennen wir bereits aus der Mechanik, denn $E_{\text{kin}} = m \cdot v^2/2$. Revolutionär war, dass Albert Einstein auch einer ruhenden Masse eine Ruheenergie zuordnete.



$E = m \cdot c^2$ wird oft als die berühmteste Formel der Welt bezeichnet.



$$E_{\text{kin}} = m \cdot v^2/2$$

Die kinetische Energie ist das Produkt aus Masse und halbem Geschwindigkeitsquadrat.

Auch die Einheiten zeigen uns, dass die Einheit von Masse mal Geschwindigkeitsquadrat die Einheit der Energie ergibt.

$$1 \text{ kg} \cdot (1 \text{ m/s})^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \cdot \text{m} = 1 \text{ Nm} = 1 \text{ J}$$



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Formel für die **relativistische Masse** angeben;
- einfache Berechnungen für **gleichförmig bewegte Körper** ausführen;
- den Unterschied zwischen **Ruhemasse** und **relativistischer Masse** interpretieren.

Albert Einstein schrieb einer ruhenden Masse ihre Ruheenergie zu.

Ruhemasse und Ruheenergie

Ein ruhender Körper der (Ruhe-)Masse m_0 hat die **Ruheenergie** $E_0 = m_0 \cdot c_0^2$.



$$\text{Ruheenergie } E_0 = m_0 \cdot c_0^2$$

Beispiel 5.1.12: Ruheenergie des Urkilogramms

Die Ruheenergie des Urkilogramms beträgt

$$E_0 = m_0 \cdot c_0^2 = 1 \text{ kg} \cdot (299\,792\,458 \text{ m/s})^2 \approx 9 \cdot 10^{16} \text{ J} = 90 \cdot 10^{15} \text{ J} = 90 \text{ PJ}.$$

Um die ungeheure Energie von rund 90 PJ in einem Kohlekraftwerk umzusetzen, müssen etwa drei Millionen Tonnen Steinkohle verbrannt werden.

Im Beispiel 5.1.05 haben wir berechnet, nach welcher Zeit ein frei fallender Körper 90 Prozent der Vakuumlichtgeschwindigkeit erreicht. Wir könnten klassisch daher berechnen, nach welcher Zeit bei konstanter Beschleunigung die Vakuumlichtgeschwindigkeit überschritten wird. Im Beispiel 5.1.07 haben wir gesehen, dass die relativistische Gesamtgeschwindigkeit niemals die Vakuumlichtgeschwindigkeit übersteigen kann. Albert Einstein löste auch diesen Widerspruch zur klassischen Mechanik, indem er die dynamische Masse m_d im Gegensatz zur Ruhemasse m_0 geschwindigkeitsabhängig definierte.



Dynamische Masse

Ein gleichförmig mit $v = \text{konstant}$ bewegter Körper der Ruhemasse m_0 hat die **dynamische Masse**

$$m_d = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}} = \gamma \cdot m_0.$$

Die dynamische Masse für einen ruhenden Körper stimmt mit seiner Ruhemasse überein: $m_d(v=0) = m_0$.

Entwickeln wir den Faktor γ in eine Taylorreihe, so erhalten wir

$$m_d = m_0 + \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \frac{3}{8} \cdot m_0 \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^4 \dots$$



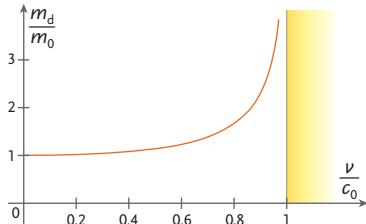
Die dynamische Masse ist größer als oder gleich der Ruhemasse, $m_d \geq m_0$, weil der Term

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$$

im Nenner kleiner als oder gleich 1 ist.



Damit m_d für $v = c_0$ einen endlichen reellen Wert erhält, muss m_0 null sein. Daher haben Photonen keine Ruhemasse, sondern nur eine dynamische Masse.



Darstellung der dynamischen Masse m_d im Vergleich zur Ruhemasse m_0



Im Mikrokosmos ist die Energieeinheit ein Joule zu groß, sodass üblicherweise ein Elektronenvolt (= 1 eV) verwendet wird: $1 \text{ eV} \approx 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



Bei der Längenkontraktion haben wir den Linearbeschleuniger in Stanford erwähnt, der Elektronen auf 50 GeV beschleunigt. Wir berechnen zum Vergleich die Ruhenergie eines Elektrons.

$$\begin{aligned}E_0 &= m_0 \cdot c_0^2 \\E_0 &\approx 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9 \cdot 10^{16} \text{ J} \\&= 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J} \approx 509 \text{ keV}\end{aligned}$$

Die Elektronen werden also in Stanford auf die 100 000-fache Ruhenergie beschleunigt.



Die relativistische Bewegungsenergie ist größer als oder gleich der Ruhenergie, $E_{\text{kin}} \geq E_0$, weil der Nenner

$$\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2} \leq 1 \text{ ist.}$$



Ein Heliumkern ist das beim radioaktiven Alphazerfall emittierte Alphateilchen (${}^4_2\text{He}$) und besteht aus zwei Protonen und zwei Neutronen.

Beispiel 5.1.13: Dynamische Masse eines Protons

Ein Proton mit einer Ruhemasse von $m_0 \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ bewegt sich auf einer Beschleunigungsstrecke mit 99,9 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Wir berechnen die dynamische Masse des gleichförmig bewegten Protons.

Die dynamische Masse des Protons beträgt

$$m_d = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 0,999^2}} \approx 22,4 \cdot m_0$$

Die Massenzunahme im Vergleich zur Ruhemasse beträgt unglaubliche 2 140 %.

Weil die dynamische Masse von der Geschwindigkeit abhängt, definierte Albert Einstein die Bewegungsenergie als Differenz aus relativistischer Gesamtenergie und Ruhenergie.

Relativistische Gesamtenergie

Ein gleichförmig mit $v = \text{konstant}$ bewegter Körper der Ruhemasse m_0 hat die **relativistische Gesamtenergie**

$$E_{\text{ges}} = m_d \cdot c_0^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}} \cdot c_0^2 = \gamma \cdot m_0 \cdot c_0^2.$$

Beispiel 5.1.14: Relativistische Gesamtenergie eines Elektrons

Ein Elektron mit einer Ruhemasse von $m_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ bewegt sich auf einer Beschleunigungsstrecke mit 99,9 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Die relativistische Gesamtenergie ergibt

$$E_{\text{ges}} = m_d \cdot c_0^2 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - 0,999^2}} \cdot c_0^2 \approx 22,4 \cdot m_0 \cdot c_0^2.$$

$$E_{\text{ges}} = 22,4 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 299\,792\,458^2 \text{ J} \approx 1,8 \cdot 10^{-12} \text{ J} \approx 2,1 \cdot 10^7 \text{ eV.}$$

Relativistische Bewegungsenergie

Ein gleichförmig mit $v = \text{konstant}$ bewegter Körper der Ruhemasse m_0 hat die **relativistische Bewegungsenergie**

$$E_{\text{kin}} = m_d \cdot c_0^2 - m_0 \cdot c_0^2 = (m_d - m_0) \cdot c_0^2 = \left(\frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}} - m_0 \right) \cdot c_0^2$$

$$E_{\text{kin}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}} - 1 \right) \cdot m_0 \cdot c_0^2 = (\gamma - 1) \cdot m_0 \cdot c_0^2$$

Beispiel 5.1.15: Relativistische Bewegungsenergie eines Heliumkerns

Ein Heliumkern mit einer Ruhemasse von $m_0 = m_{\text{Heliumkern}} \approx 2 \cdot (m_{\text{Proton}} + m_{\text{Neutron}}) \approx 4 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 6,68 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ bewegt sich auf einer Beschleunigungsstrecke mit 99 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Die relativistische Bewegungsenergie ergibt

$$E_{\text{kin}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,99^2}} - 1 \right) \cdot m_0 \cdot c_0^2 \approx 6,09 \cdot m_0 \cdot c_0^2 \approx 4 \cdot 10^{-9} \text{ J} = 2,5 \cdot 10^{10} \text{ eV} = 25 \text{ GeV}$$

Relativistischer Impuls

Ein gleichförmig mit $v = \text{konstant}$ bewegter Körper der Ruhemasse m_0 hat den **relativistischen Impuls** $p = \gamma \cdot m_0 \cdot v$.



Der relativistische Impuls kann bei Stoßprozessen an Teilchenbeschleunigern sehr genau gemessen werden.



Ziele erreicht? – „Relativistische Masse“

- 5.1.19** Geben Sie die Formeln für die **relativistische Masse** und die **Ruheenergie** an.
- 5.1.20** Geben Sie Beispiele für **relative physikalische** und für **absolute physikalische Größen** an.
- 5.1.21** Berechnen Sie die Massenzunahme für ein **Proton**, das in einem Zirkularbeschleuniger mit 99,99 Prozent der Lichtgeschwindigkeit kreist.
- 5.1.22** Berechnen Sie die Geschwindigkeit eines **Neutrons**, das eine um 900 % größere Masse als seine Ruhemasse hat.
- 5.1.23** Berechnen Sie die Geschwindigkeit eines **Elektrons**, das vom Linearbeschleuniger der Stanford-Universität in den USA bis zu einer **kinetischen Energie** von 5 GeV beschleunigt wird.
- 5.1.24** Leiten Sie die **relativistische Energie-Impuls-Beziehung** ab. Gehen Sie dazu von der dynamischen Masse aus.
- 5.1.25** Entwickeln Sie die dynamische Masse als Funktion der Geschwindigkeit in eine **Taylorreihe**.



Ruhemasse eines Neutrons
 $m_0 \approx 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$



Relativistischer (dynamischer) Impuls $p_d = m_d \cdot v$.



Relativistische Energie-Impuls-Beziehung
 $E^2 = m_0^2 \cdot c_0^4 + p_d^2 \cdot c^2$

5.1.7 Relativistischer Dopplereffekt

Wir alle kennen den klassischen Dopplereffekt für Schallwellen aus dem Alltag. Wenn sich uns ein Einsatzfahrzeug mit eingeschaltetem Folgetonhorn nähert, nehmen wir eine Frequenzerhöhung, beim Entfernen des Fahrzeugs – der Schallquelle – eine Frequenzniedrigung wahr. Wir werden nun untersuchen, welche Auswirkung sich für sehr schnell bewegte Lichtquellen aufgrund der Zeitdilatation ergibt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Formel für den **relativistischen Dopplereffekt** angeben und ihn vom klassischen Dopplereffekt unterscheiden;
- einfache Dopplereffektbeispiele rechnen;
- die Bedeutung des **relativistischen Dopplereffekts** erklären.

Wir betrachten einen Beobachter B und eine Lichtquelle Q, die sich mit einer Geschwindigkeit v voneinander entfernen.

Die Periodendauer des von der Lichtquelle Q ausgesandten Lichts T_Q wird vom Beobachter nicht relativistisch gemäß $T_B = T_Q \cdot (1 + v/c_0)$ wahrgenommen. Berücksichtigen wir die Zeitdilatation für die Periodendauer des ausgesandten Lichts, so erhalten wir den relativistischen Dopplereffekt $T_B = T_Q \cdot (1 + v/c_0) \cdot \gamma$. Mit dem Kehrwert der Periodendauer erhalten wir die Frequenz f.



Klassischer Dopplereffekt des Schalls: Ein ruhender Beobachter B nimmt die Frequenz f_B wahr, wenn sich die Schallquelle mit der Geschwindigkeit v auf den Beobachter B zubewegt, f_Q die Quellenfrequenz und c die Schallgeschwindigkeit ist.

$$f_B = \frac{f_Q}{1 - \frac{v}{c}}$$



Der vom österreichischen Physiker **Christian Doppler** (1803 bis 1853) entdeckte Effekt wird heute vielseitig angewandt. Im angloamerikanischen Sprachraum findet sich in den meisten Spitälern der Name Doppler als Bezeichnung von Räumen, wo die Blutdurchflussgeschwindigkeit gemessen wird.



Beim klassischen Dopplereffekt muss man zwei Fälle unterscheiden. Entweder bewegt sich der Sender oder der Empfänger. Relativistisch ist keine Unterscheidung nötig, weil kein Ruhesystem des Ausbreitungsmediums definierbar ist.



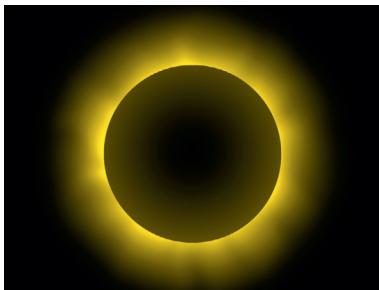
Die Rotverschiebung der Wellenlänge von Sternen ist ein Beleg für die Expansion des Universums. Denkt man die Ausdehnung des Universums rückwärts, gelangt man zur Annahme eines Urknalls. Siehe Kap. D, 5.4 und 5.5.



SIR ARTHUR STANLEY EDDINGTON, 1882 BIS 1944, BRITISCHER ASTRONOM UND PHYSIKER, LEITETE DIE EXPEDITION ZUR BEOBACHTUNG DER SONNENFINSTERNIS IM JAHRE 1919 IN WESTAFRIKA



Albert Einstein berechnete im Rahmen seiner allgemeinen Relativitätstheorie eine Lichtablenkung von rund zwei Bogensekunden an unserem Sonnenrand.



Der Erdmond verdunkelt die Sonne

Relativistischer Dopplereffekt

Entfernt sich eine Lichtquelle mit der Relativgeschwindigkeit $v = \text{konstant}$ von einem Beobachter, so nimmt dieser die Frequenz f_B wahr, wenn f_Q die Frequenz der Lichtwelle der ruhenden Lichtquelle ist.

$$f_B = f_Q \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c_0}}{1 + \frac{v}{c_0}}} = f_Q \sqrt{\frac{c_0 - v}{c_0 + v}}$$

Bei Annäherung von Lichtquelle und Beobachter ist das Vorzeichen von v negativ zu nehmen.

Beispiel 5.1.16: Relativistischer Dopplereffekt

Ein Stern entfernt sich mit halber Vakuumlichtgeschwindigkeit von der Erde. Wir berechnen die Wellenlänge einer Strahlung, die vom Stern mit einer Wellenlänge von 600 nm emittiert wurde und auf der Erde detektiert wird.

$$f_B = \frac{c_0}{\lambda_Q} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c_0}}{1 + \frac{v}{c_0}}} = \frac{c_0}{\lambda_Q} \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{1}{2}}{1 + \frac{1}{2}}} = \frac{c_0}{\lambda_Q} \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \approx 2,88 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$\lambda_Q = \frac{c_0}{f_B} \approx 1\,039 \text{ nm}$$

Es ist eine relative Rotverschiebung von $\frac{1\,039}{600} \approx 1,73 = 173\%$ zu sehen.



Ziele erreicht? – „Relativistischer Dopplereffekt“

5.1.26 Geben Sie die Formeln für den **klassischen** und den **relativistischen Dopplereffekt** an.

5.1.27 Berechnen Sie die auf der Erde gemessene **Wellenlänge** einer Strahlung, die von einem Stern, der sich mit 60 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit von der Erde entfernt, mit einer Wellenlänge von 500 nm emittiert wurde.

5.1.28 Recherchieren Sie über **Dopplersonografie**.

5.1.8 Allgemeine Relativitätstheorie (ART)

Albert Einstein wurde über Nacht weltberühmt, als am 29. Mai 1919 seine Voraussage von der Ablenkung von Licht durch große Massen – in diesem Fall durch unsere Sonne – experimentell bestätigt wurde. Die Ablenkung von Licht in der Nähe von großen Massen erklärte Albert Einstein durch die Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **spezielle Relativitätstheorie (SRT)** und die **allgemeine Relativitätstheorie (ART)** unterscheiden und die vierdimensionale Raumzeit angeben;
- die **Formeln** für die **Längen- und Zeitänderung** in der Nähe von großen Massen anwenden;
- die **Frequenzabnahme** von Licht beim Hochsteigen im Gravitationsfeld einer Masse verstehen.

Albert Einstein hat seine SRT 1905 veröffentlicht und danach weitere zehn Jahre für die Einbindung der Gravitation in sein neues Raum-Zeit-Konzept investiert, bevor er 1915 seine Theorie zur ART der Allgemeinheit zugänglich machte. Albert Einstein hat in der SRT lediglich gleichförmig bewegte Bezugssysteme – also Inertialsysteme – analysiert. Ab 1905 wollte er unbedingt auch beschleunigte Bezugssysteme beschreiben können und damit wegen des Äquivalenzprinzips die Gravitation selbst.

| SRT | ART |
|------------------------------|--|
| Nur gleichförmige Bewegungen | Auch eine Gravitationsbeschleunigung wird berücksichtigt |

Gegenüberstellung von spezieller und allgemeiner Relativitätstheorie

Äquivalenzprinzip

Beschleunigte Systeme, die keiner Gravitationswirkung unterliegen, sind von ruhenden Systemen mit Gravitation nicht unterscheidbar. Effekte von Beschleunigung und Gravitation sind allgemein ununterscheidbar. Daraus folgt die Äquivalenz von träger und schwerer Masse.

Die **SRT** wird dominiert von der Vakuumlichtgeschwindigkeit, die **ART** vom Verhältnis der Gravitationskonstante zum Quadrat der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Um dies zu verstehen, betrachten wir ein Photon, das mit der Frequenz f_0 an der Oberfläche der Erde von einer Strahlungsquelle emittiert wird. Mit der Energie $E_0 = h \cdot f_0$ ergibt sich die dynamische Masse $m_d = h \cdot f_0 / c_0^2$. Damit sich das Photon von der Erdoberfläche um die kleine Strecke Δh entfernen kann, muss es die Hubarbeit $W_{\text{Hub}} = m_d \cdot g \cdot \Delta h$ verrichten. Daher sinkt die Gesamtenergie des Photons und damit auch seine Frequenz. Für die Frequenz f_h in der Höhe Δh gilt daher

$$f_h = (E_0 - W_{\text{Hub}})/h = (h \cdot f_0 - m_d \cdot g \cdot \Delta h)/h = (h \cdot f_0 - h \cdot f_0 \cdot g \cdot \Delta h/c_0^2)/h.$$

Wir kürzen das plancksche Wirkungsquantum und heben die Frequenz f_0 an der Oberfläche der Erde heraus:

$$f_h = f_0 \cdot (1 - g \cdot \Delta h/c_0^2)$$

Diese Überlegungen lassen sich verallgemeinern.

Frequenzverminderung (Rotverschiebung) in der Nähe einer großen Masse

Hat eine elektromagnetische Welle an der Oberfläche einer großen Masse mit der Gravitationsbeschleunigung g die Frequenz f_0 , so ist $f_h = f_0 \cdot (1 - g \cdot \Delta h/c_0^2)$ die Frequenz in der Höhe Δh .

Wir erkennen, dass wegen der Größe von c_0^2 sehr große **Gravitationsbeschleunigungen** und/oder große Höhenunterschiede betrachtet werden müssen, um große relative Frequenzänderungen zu erhalten.

Beispiel 5.1.17: Rotverschiebung auf der Erde in einem Hochhaus

Wir berechnen die relative Frequenzminderung für eine elektromagnetische Welle, die vom Erdgeschoß in das zwanzigste Stockwerk eines Bürogebäudes hochsteigt, wenn eine mittlere Geschoßhöhe von 3,5 m angenommen wird.

$$f_h/f_0 = 1 - g \cdot \Delta h/c_0^2 \approx 1 - 9,81 \cdot 70/(299\,792\,458)^2 \approx 0,999\,999\,999\,999\,992$$

Das ist zwar sehr wenig, kann aber experimentell nachgewiesen werden.

Weil die Frequenz die reziproke Periodendauer ist – $f_0 = 1/T_0$ und $f_h = 1/T_h$ –, folgt aus der Rotverschiebung, dass $T_0 = T_h \cdot (1 - g \cdot \Delta h/c_0^2)$.

Die Zeit an der Oberfläche einer großen Masse ist **stets kleiner als in der Entfernung Δh** . Die Einschränkung auf Periodendauern ist nicht nötig, sodass der einprägsame Satz – **Uhren gehen in der Nähe von großen Massen langsamer** – gilt.

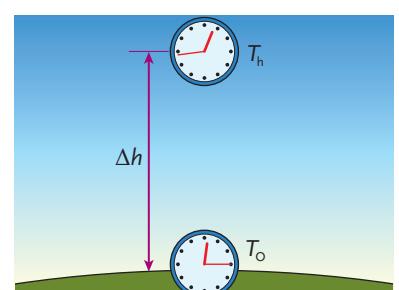


Die allgemeine Relativitätstheorie wird gerne mit ART abgekürzt, weil es sich um eine kunstvolle Theorie Albert Einsteins handelt, die ihm mathematische Kunstgriffe abverlangte.



Plancksches Wirkungsquantum $h \approx 6,67 \cdot 10^{-34}$ Js. In der klassischen Physik ist das Produkt aus Energie und Zeit für einen bestimmten Vorgang im Allgemeinen um viele Zehnerpotenzen größer als das plancksche Wirkungsquantum.

Sehr große **Gravitationsbeschleunigungen** haben Neutronensterne mit einer Dichte von rund 10^{15} kg/m³ und einem Radius von nur rund 10 km.



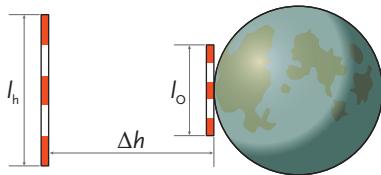
Schematische Darstellung der Zeitdilatation durch eine große Masse



Die Masse der Sonne beträgt das rund 330 000-Fache der Erdmasse, $m_{\text{Sonne}} \approx 1,98 \cdot 10^{30} \text{ kg}$.

Der **Großglockner** ist mit 3 798 m der höchste Berg Österreichs.

Vierdimensionale Raumzeit
 $(x | y | z | c_0 \cdot t)$.



Schematische Darstellung der Längenkontraktion durch eine große Masse

| SRT | ART |
|---|--|
| Bewegte Uhren gehen langsam | Uhren in der Nähe von großen Massen gehen langsamer |
| Bewegte Maßstäbe sind in Bewegungsrichtung verkürzt | Maßstäbe sind in der Nähe von großen Massen verkürzt (kontrahiert) |

Korrespondierende Merksätze zur SRT und ART

Zeitdilatation (Zeitdehnung) in der Nähe einer großen Masse

Dauert ein Ereignis in der Höhe Δh über der Oberfläche einer großen Masse mit der Gravitationsbeschleunigung g die Zeit t_h , so dauert dieses Ereignis an der Oberfläche die Zeit $t_0 = t_h \cdot (1 - g \cdot \Delta h / c_0^2)$.

Beispiel 5.1.18: Zeitdilatation auf Meeresniveau im Vergleich zum Großglockner

Wir berechnen die relative Zeitdilatation für eine Atomuhr, die von einem Ort auf Meeresniveau auf den Großglockner (3 798 m) gebracht wird.

$$t_0/t_h = 1 - g \cdot \Delta h / c_0^2 \approx 1 - 9,81 \cdot 3 798 / (299 792 458)^2 \approx 0,999 999 999 999 6.$$

Das ist zwar sehr wenig, ist aber für bestimmte Berge bereits nachgewiesen worden.

Weil wir die mit einem Lichtsignal gemessene Messstrecke mithilfe der für das Zurücklegen der Messstrecke benötigten Zeit ermitteln, leuchtet uns ein, dass auch Längen durch Massen verändert werden.

Albert Einstein fasste die Zeit- und Längenänderung durch Massen zur **Krümmung** der vierdimensionalen **Raumzeit** zusammen.

Längenkontraktion (Längenverkürzung) in der Nähe einer großen Masse

Hat ein Maßstab in der Höhe Δh über der Oberfläche einer großen Masse mit der Gravitationsbeschleunigung g die Länge l_h , so ist $l_0 = l_h \cdot (1 - g \cdot \Delta h / c_0^2)$ die Länge an der Oberfläche dieser Masse.

Beispiel 5.1.19: Maßstabsverkürzung auf dem Mond

Wir berechnen die relative Längenänderung eines Maßstabes von einem Meter in einer Höhe von 1 km über der Mondoberfläche.

$$l_0/l_h = 1 - g \cdot \Delta h / c_0^2 \approx 1 - 1,64 \cdot 1 000 / (299 792 458)^2 \approx 1 - 1,82 \cdot 10^{-14}$$

Das ist wahrlich nicht viel. Unser Mond hat aber auch eine sehr bescheidene Gravitationsbeschleunigung von rund $1,64 \text{ m/s}^2$.

Wegen der enormen Masse der Sonne erscheint es auch plausibel, dass Licht beim nahen Vorbeigang an ihr, von seiner geradlinigen Bahn abgelenkt wird. Schwarze Löcher schließlich verschlucken im Allgemeinen auftreffendes Licht.



Ziele erreicht? – „Allgemeine Relativitätstheorie (ART)“

5.1.29 Geben Sie die Formeln für die **Längenkontraktion** und die **Zeitdilatation** in der Nähe von großen Massen an.

5.1.30 Ein Maßstab in einem **Satelliten** weist relativ zu seiner Länge auf der Erde eine Längenänderung von 0,1 % auf. Berechnen Sie die Höhe des Satelliten als Stammbruch (Zähler = 1) von c_0^2/g über der Erde.

5.1.31 Eine Uhr in einem **Satelliten** weist relativ zu einer Uhr auf der Erde eine Zeitänderung von 0,5 % auf. Berechnen Sie die Höhe des Satelliten als Stammbruch (Zähler = 1) von c_0^2/g über der Erde.

5.1.32 Berechnen Sie für einen geostationären **Satelliten** die relative Zeitdilatation aufgrund der gleichförmigen Bewegung und aufgrund der Krümmung der Raumzeit am Ort des Satelliten durch die Erde.

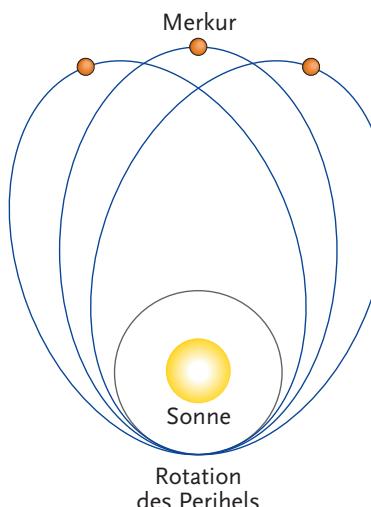
5.1.33 Stellen Sie die **SRT** und die **ART** möglichst umfassend einander gegenüber.

5.1.34 Berechnen Sie die **Gravitationsbeschleunigung** eines fiktiven Himmelskörpers, sodass auf der Oberfläche eine relative Zeitdilatation von 0,001 Promille im Vergleich zu einer Höhe Δh von 1 000 km existiert.

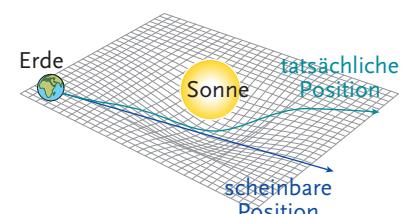
5.1.35 Berechnen Sie für den mittleren Abstand Erde – Merkur die **Ungenaugigkeit** in der dazu senkrechten Positionsangabe, wenn der Winkel mit einer Ungenaugigkeit von 43 Bogensekunden gegeben ist.

5.1.36 Recherchieren Sie über die **Periheldrehung** des Merkurs und die **Lichtablenkung** im Schwerkraftfeld unserer Sonne.

5.1.37 Recherchieren Sie über **globale Positionsbestimmung mithilfe von Satelliten**, also zum **GPS**. Eruieren Sie das Ausbaustadium des europäischen Satellitensystems.



Die Periheldrehung – Drehung des sonnennächsten Punktes – des Merkurs ist ein weiterer berühmter Effekt, der die Gültigkeit der ART von Albert Einstein untermauert. Bereits die newtonsche Mechanik konnte die Periheldrehung der Merkurbahn bis auf 43 Bogensekunden pro Jahrhundert genau berechnen. Die ART konnte mit der Raumzeitkrümmung auch diese 43" erklären und berechnen.



Schematische Darstellung der Raum-Zeit-Krümmung durch unsere Sonne

5.2 Quantenphysik

5.2.1 Die Lichtquantenhypothese

Am Ende des 19. Jahrhunderts waren viele angesehene Physiker der Meinung, dass das physikalische Weltbild und seine Erklärung im Wesentlichen abgeschlossen seien. Es bedürfe nur mehr einer genaueren Ausarbeitung.

An der Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert gab es Ergebnisse von Experimenten, die man mit den herkömmlichen Theorien nicht erklären konnte, z. B. die Spektralverteilung der Strahlung eines schwarzen Körpers.

Zwei Physiker, Max Planck und Albert Einstein, führten einen Paradigmenwechsel herbei, dem letztlich eine neue Theorie, die Quantenmechanik, folgte.



MAX PLANCK, 1858 BIS 1947,
DEUTSCHER PHYSIKER, BEGRÜNDER
DER QUANTENTHEORIE,
NOBELPREIS 1918



Ein Paradigmenwechsel ist der Wechsel von einer wissenschaftlichen Grundauffassung zu einer anderen.

Paradigma: lateinisch für Beispiel.



Ein schwarzer Körper ist ein idealisierter Körper, der die ganze auftreffende Strahlung absorbiert.



Der 14. Dezember 1900 gilt als der Geburtstag der Quantenphysik. An diesem Tag hat Max Planck seine Theorie erstmals vorgestellt.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- Licht als Überträger von Energie begreifen und die **Photonenhypothese** erklären;
- den **fotoelektrischen Effekt** beschreiben;
- einfache Berechnungen mit der **einstinschen Gleichung** ($E_{kin} = h \cdot f - W_A$) durchführen;
- den **Comptoneffekt** interpretieren;
- die Anfänge der Quantenphysik nachvollziehen.

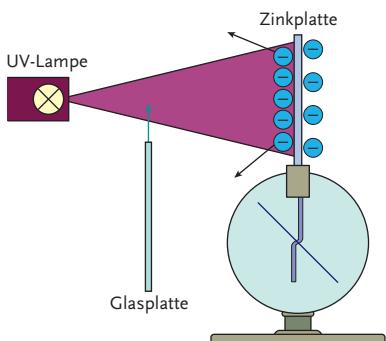
Max Planck löste das Problem der Strahlung des schwarzen Körpers, indem er durch Interpolation eine Formel fand, die den neuen empirischen Daten entsprach. Es gelang ihm, die in der klassischen Formel verwendeten Konstanten durch Naturkonstanten zu ersetzen, nur ein unbekannter Faktor blieb übrig. Planck nannte ihn h für „hilf“.



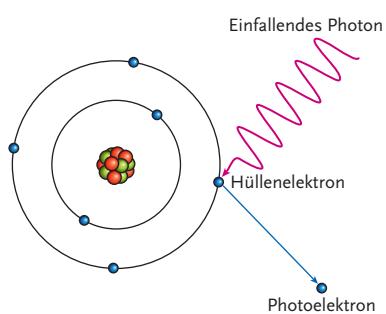
$[h]=[E \cdot t]$ Die Einheit von h ist das Produkt der Einheiten von Energie und Zeit. Die Größe $E \cdot t$ wird als Wirkung bezeichnet.



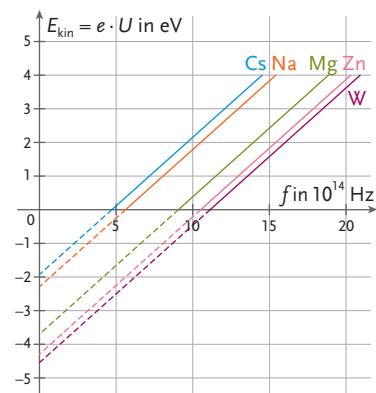
Die Temperatur und die Frequenz sind variable Größen, die ebenfalls in der Formel von Planck vorkommen.



Versuchsaufbau zum fotoelektrischen Effekt



Fotoelektrischer Effekt: Ein Photon löst ein Elektron aus dem Atom



Energie-Frequenz-Grafik für verschiedene Metalle



Der Anstieg der Geraden im Energie-Frequenz-Diagramm ist für alle Materialien gleich.

Ausgehend von der verbesserten empirischen Strahlungsformel, kam Planck innerhalb weniger Monate zu einem bedeutenden Ergebnis. Das war die Geburtsstunde der Quantenphysik. Er musste sich gegen seine eigene Überzeugung eingestehen, dass die Energieabgabe nicht kontinuierlich erfolgt, sondern nur in Vielfachen von kleinsten „ h “-Einheiten. Diese Konstante h wird später ihm zu Ehren als **planck-sches Wirkungsquantum** bezeichnet.

Das so hergeleitete Gesetz enthält mit der Boltzmannkonstante k , der Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 und dem planckschen Wirkungsquantum h drei Naturkonstanten.

Ein weiteres Experiment ist der Nachweis des fotoelektrischen Effekts, der erstmals 1886 von **Heinrich Hertz** und **Wilhelm Hallwachs** erbracht wurde. Er konnte ebenfalls mit der damals gültigen Theorie nicht in Einklang gebracht werden. Die Bildung und Freisetzung von elektrisch geladenen Teilchen aus Materie, wenn sie mit Licht oder anderer elektromagnetischer Strahlung bestrahlt wird, werden als äußerer fotoelektrischer Effekt bezeichnet.

Versuchsanordnung zum fotoelektrischen Effekt

Eine Zinkplatte wird auf einem Elektroskop befestigt. Danach wird z. B. ein PVC-Stab durch Reibung aufgeladen und die Ladung auf die Zinkplatte gebracht. Das Elektroskop zeigt einen Ausschlag, es ist negativ aufgeladen. Jetzt wird eine Quecksilberdampflampe auf die Zinkplatte gerichtet.

Man kann beobachten, dass der Ausschlag des Elektrometers abnimmt, die Ladung also abgebaut wird. Die Entladung wird gestoppt, wenn während dieses Vorgangs eine Glasscheibe zwischen Zinkplatte und Lampe gebracht wird.

Das Experiment liefert folgende Ergebnisse:

- Elektronen werden erst oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz f_{Gr} ausgelöst.
- Es gibt keine Zeitverzögerung bis zum Auslösen der ersten Elektronen.
- Die Bewegungsenergie der Elektronen hängt nicht von der Lichtintensität, sondern nur von der Lichtfrequenz ab.

Die Wellentheorie des Lichts konnte nicht zur Erklärung dieser Ergebnisse verwendet werden. Die kinetische Energie der Elektronen müsste danach von der Lichtintensität abhängen. Vor allem das Vorhandensein einer **Grenzfrequenz** konnte ebenfalls nicht gedeutet werden.

Einstein hat sich zu dieser Zeit mit den Arbeiten von **Planck** beschäftigt und konnte mit diesen Grundlagen den fotoelektrischen Effekt deuten:

„Nach der Auffassung, dass das einfallende Licht aus Photonen der Energie hf besteht, lässt sich die Erzeugung von Elektronen durch Licht folgendermaßen auffassen. In die oberflächliche Schicht des Körpers dringen Photonen ein, und deren Energie verwandelt sich wenigstens zum Teil in kinetische Energie von Elektronen. Die einfachste Vorstellung ist die, dass ein Photon seine ganze Energie an ein einziges Elektron abgibt. Außerdem muss jedes Elektron beim Verlassen des Körpers eine (für den Körper charakteristische) Arbeit W verrichten.“

Die Energie des Lichtes wird in Paketen abgegeben, ist also gequantelt.

Lichtquantenhypothese

Licht der Frequenz f besteht aus Photonen der Energie
 $E = h \cdot f$ $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$

Einstein-Gleichung

Für die kinetische Energie der ausgelösten Elektronen gilt:
 $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$ W_A ist die Austrittsarbeit

W_A ist jene Arbeit, die zur Abtrennung eines Elektrons aus dem Metall notwendig ist. Sie ist charakteristisch für das jeweilige Metall.

Die erfolgreiche Interpretation des fotoelektrischen Effekts legt eine **Teilchentheorie** des Lichts nahe. Dafür spricht auch der experimentelle Befund, dass Photonen einen Impuls haben, den sie auf andere Teilchen übertragen können.

Dieser scheinbare Widerspruch, dass sich Elektronen oder Photonen je nach Experiment oder Situation einmal wie eine Welle und einmal wie Teilchen verhalten, kann durch eine neue Theorie aufgehoben werden. Es wurde ein neuer **Teilchenbegriff** entwickelt, das Teilchen im Sinne der Quantenphysik. Solche Teilchen sind z. B. Elektronen, Photonen, Neutronen.

Die Wellen sind keine Wellen im klassischen Sinn, sie machen nur Aussagen über die **Wahrscheinlichkeit** des Eintretens von Messwerten.

Der fotoelektrische Effekt findet **Anwendung** in der Medizin, im Bereich der bildgebenden Verfahren, diagnostischen Radiologie und Nuklearmedizin. Der photovoltaische Effekt, ein Sonderfall des fotoelektrischen Effekts, bildet die Grundlage für die Funktionsweise von Solarzellen, Belichtungsmessern und Sensoren.

Beispiel 5.2.01: Berechnung der Grenzwellenlänge

Eine Fotokatode mit einer Austrittsarbeit von $W_A = 2 \text{ eV}$ wird mit Licht bestrahlt. Elektronen können aufgrund des fotoelektrischen Effekts die Oberfläche verlassen. Wir berechnen

- die Geschwindigkeit und die Energie (in eV) bei Beleuchtung mit **blauem Licht** der Wellenlänge $0,45 \mu\text{m}$,
- die Grenzwellenlänge, ab der Elektronen ausgelöst werden können.

a) Da $c = f \cdot \lambda$ ist, gilt für die Frequenz des Lichtes

$$f = \frac{c_0}{\lambda} \approx \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{0,45 \cdot 10^{-6} \text{ m}} = 6,67 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$E = h \cdot f \approx 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 6,67 \cdot 10^{14} \text{ Hz} = 4,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$\text{Da } 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}, \text{ gilt: } E = \frac{4,42 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 2,76 \text{ eV}$$

Laut der einsteinschen Gleichung $E_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$ erhalten wir:

$$E_{\text{kin}} = 2,76 - 2 = 0,76 \text{ eV}$$

Mit der Masse des Elektrons $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ können wir v berechnen.

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{\text{kin}}}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 12,16 \cdot 10^{-20} \text{ J}}{9,11 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 5,17 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$



Nobelpreis an Albert Einstein für die Deutung des lichtelektrischen Effekts

! 1921 erhielt Einstein für die Photonenhypothese den Nobelpreis, nicht für die spezielle Relativitätstheorie.

🔗 Materiewellen, Doppelspaltversuch.

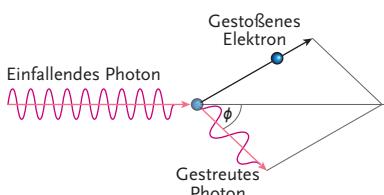


Solarzellen nutzen Sonnenlicht zur Stromgewinnung

Blaues Licht hat eine Wellenlänge von 420 nm bis 490 nm.



Entdeckung des planckschen Wirkungsquantums



Comptoneffekt: Energie- und Impulsübertragung mithilfe des elastischen Stoßes

b) Bedingung für die Grenzwellenlänge ist, dass ν null wird.

$$W_A = \frac{h \cdot c_0}{\lambda_{Gr}}. \text{ Durch Umformen erhalten wir:}$$

$$\lambda_{Gr} = \frac{h \cdot c_0}{W_A} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}} = 0,62 \mu\text{m}$$

Der Comptoneffekt

Mit dem von Albert Einstein eingeführten Photonenmodell konnte ein weiterer rätselhafter Effekt erklärt werden. Auch hier versagte die Wellentheorie des Lichtes.

Im Jahre 1922 führte der Physiker **Arthur Compton** Experimente mit Röntgenstrahlen durch. Die Streuung von Röntgenstrahlen an einem Körper, z. B. an einem Graphitblock, führt zu einer Frequenzverminderung der Strahlung. Compton deutete den Effekt als einen Stoßvorgang zwischen dem Photon und einem Elektron. Das Photon gibt einen Teil seiner Energie an das Elektron ab, daher hat es eine verringerte Energie. Diese kann mit den Erhaltungssätzen für Energie und Impuls berechnet werden. Der **Comptoneffekt** bestätigt die **Teilchennatur** der elektromagnetischen Strahlung.

Der Comptoneffekt fand **Anwendung** im Comptontelekop COMTEL. Dieses befand sich an Bord eines NASA-Satelliten und diente zur Erforschung von Pulsaren und Galaxien. Auch in der Medizin, Nukleartechnik und Flugsicherung dient dieser Effekt als Grundlage für moderne Geräte.



Ziele erreicht? – „Die Lichtquantenhypothese“

- 5.2.01** Berechnen Sie mithilfe der Tabelle in der Randspalte, um welches Kathodenmaterial es sich handelt, wenn es mit Licht der Wellenlänge $0,178 \mu\text{m}$ bestrahlt wird und Elektronen mit der Energie $E_{\text{kin}} = 1,5 \text{ eV}$ ausgelöst werden.
- 5.2.02** Warum hat das plancksche Wirkungsquantum eine so große Bedeutung?
- 5.2.03** In welchen Bereichen findet der fotoelektrische Effekt Anwendung?
- 5.2.04** Beschreiben Sie in kurzen Sätzen den Versuchsaufbau des fotoelektrischen Effekts.
- 5.2.05** Worum geht es beim Comptoneffekt?
- 5.2.06** Begründen Sie rechnerisch, dass der fotoelektrische Effekt bei Bestrahlung einer Zinkplatte mit sichtbarem Licht nicht stattfinden kann. Entnehmen Sie der Tabelle in der Randspalte die Austrittsarbeit von Zink.

| Material | Austrittsarbeit in eV |
|----------|-----------------------|
| Zn | 4,34 |
| W | 4,54 ... 4,6 |
| Ta | 4,19 |
| Rb | 2,13 |
| Pt | 5,32 ... 5,66 |
| Ni | 5,0 |
| Na | 2,28 |
| Mo | 4,16 ... 4,2 |
| Li | 2,2 |
| Cs | 1,7 ... 2,14 |

Austrittsarbeit der Elektronen in eV

5.2.2 Die De-Broglie-Welle

Der französische Adelige Louis de Broglie wurde stark von seinem um 17 Jahre ältereren Bruder Maurice beeinflusst. Er beschäftigte sich zunächst mit Philosophie und Geschichte, wandte sich jedoch auch wie sein Bruder der Physik zu. In seiner Doktorarbeit mit dem Titel „Recherches sur la théorie des quantes“ wagte er im Jahre 1924 den Vorschlag, dass es auch möglich sei, Massenteilchen eine Wellenlänge zuzuordnen. Seine Theorie wurde zuerst nicht wirklich ernst genommen, aber bereits 1927 durch ein Experiment bestätigt.



LOUIS-VICTOR PIERRE RAYMOND
DUC DE BROGLIE, FRANZÖSISCHER
PHYSIKER, 1892 BIS 1987, NOBEL-
PREIS FÜR PHYSIK 1929



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Broglies Hypothesen** schildern und erläutern;
- die **Bedeutung des Doppelpaltexperiments für Quantenteilchen** verstehen;
- mithilfe der **Wahrscheinlichkeitsdeutung von Born** die Funktion der Wellen bei Elektronen erläutern;
- nachvollziehen, warum **Quanteneffekte im Alltag** nicht beobachtet werden können.

Nach Experimenten mit Licht entwickelte Einstein die **Photonenhypothese**; Photonen könnten wie Teilchen mit einem Impuls $p = h/\lambda$ beschrieben werden. De Broglie vermutete, dass dieser Zusammenhang nicht nur für Photonen, sondern auch für Elektronen und andere materielle Teilchen (mit nicht verschwindender Ruhemasse) gilt.

Hypothesen von de Broglie

1. Zu jedem Teilchen gehört eine Welle mit der **Wellenlänge** $\lambda = \frac{h}{p}$.
2. Zwischen der **Frequenz** f der Welle und der **Energie** E des Teilchens besteht die Beziehung $E = h \cdot f$.

Die Wellenlänge eines Elektrons liegt in der Größenordnung von Röntgenstrahlen. Ein Nachweis von Welleneigenschaften bewegter Elektronen kann daher mit Experimenten gelingen, die auch mit Röntgenstrahlen durchgeführt werden.

Die Bestätigung der Welleneigenschaften von Elektronen gelang **Clinton Davisson** und **Lester Germer** 1927 mit einem Streuexperiment mit einem Nickelkristall. Es war nicht ihre Absicht, die Hypothesen von de Broglie experimentell nachzuweisen. Sie untersuchten die Streuung von Elektronen an Festkörpern und konnten die Ergebnisse nicht deuten.

Weitere Beugungsversuche mit Kristallen und Experimente mit Kathodenstrahlröhren bestätigten die Hypothesen von de Broglie.

Eine Anwendung dieser Erkenntnis von de Broglie findet man beim **Elektronenmikroskop**. Anstelle von Licht werden hier Elektronen verwendet, um sehr kleine Objekte vergrößert abzubilden. Der Abstand, der mit einem Mikroskop aufgelöst werden kann, hängt direkt proportional mit der Wellenlänge zusammen.

Die wissenschaftlichen Anwendungsmöglichkeiten der höchstauflösenden Elektronenmikroskopie sind vielfältig. Es kann damit das Zusammenspiel von Atomen besser verstanden werden, das die Eigenschaften von Materialien und Bauelementen bestimmt. Die Nanotechnologie, die z. B. in der Computerindustrie (Entwicklung von immer leistungsfähigeren Mikrochips) zur Anwendung kommt, basiert ebenfalls auf diesem Wissen. Auch die Biowissenschaften erlangen dadurch einen immer besseren Einblick in den Bauplan der Natur.

„Jedes Mal, wenn es dem menschlichen Geist um den Preis großer Bemühungen gelungen war, eine Seite des Buches der Natur zu entziffern, hat sich sofort gezeigt, wie viel schwieriger erst die Entzifferung der folgenden Seite sein würde.“

(LOUIS DE BROGLIE)



Fotoelektrischer Effekt



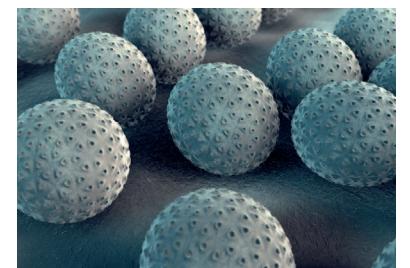
Die Elektronenwelle ist keine mechanische Welle, bei der Materie schwingt. Sie bestimmt, wie die Elektronen an einem bestimmten Ort (Raumbereich) verteilt sind.



Röntgenstrahlen haben eine Wellenlänge von ca. $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.



Beugungerscheinungen sind nur bei Wellen möglich.



Pollen, abgebildet mithilfe eines Elektronenmikroskops



Es gilt: $e \cdot U = \frac{1}{2} m_e \cdot v^2$

Die kinetische Energie des Elektrons ist gleich der elektrischen Energie, die das Teilchen nach Durchlaufen der Spannung U hat.



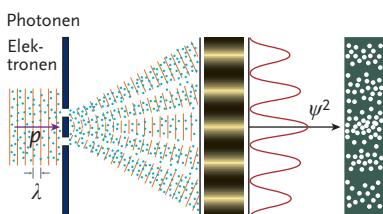
Die Wellenlänge von sichtbarem Licht liegt etwa zwischen 400 und 800 nm.



RICHARD PHILLIPS FEYNMAN,
AMERIKANISCHER PHYSIKER,
1918 BIS 1988, NOBELPREIS FÜR
PHYSIK 1965



Interferenz am Doppelspalt
in der Wellenoptik.



Doppelspaltversuch mit Elektronen bzw. Photonen, Schirmbild und Wahrscheinlichkeitsdichte

Beispiel 5.2.02: Auflösungsvermögen eines Elektronenmikroskops

Ein Elektronenmikroskop hat eine Beschleunigungsspannung von 40 kV. Wir berechnen,

- welche Auflösung das Gerät erreichen kann und
- das theoretische Verhältnis des Auflösungsvermögens eines Lichtmikroskops zu dem eines Elektronenmikroskops. Die Wellenlänge des Lichts nehmen wir mit 500 nm an.

- Ein Elektron der Masse $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg und der Ladung $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C wird durch die Spannung $U = 40$ kV beschleunigt. Es erreicht dadurch eine klassische (= nicht realistische) Geschwindigkeit von

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 40 \cdot 10^3 \text{ V}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}} = 11,86 \cdot 10^7 \text{ m/s}$$

Dem Elektron kann eine Wellenlänge zugeordnet werden.

$$\lambda = \frac{h}{m_e \cdot v} \approx \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 11,86 \cdot 10^7 \text{ m/s}} = 0,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

- Der kleinste auflösbare Abstand ist proportional zur Wellenlänge.

$$\frac{\lambda_{\text{Elektron}}}{\lambda_{\text{Licht}}} = \frac{0,6 \cdot 10^{-11} \text{ m}}{5 \cdot 10^{-7} \text{ m}} = 1,2 \cdot 10^{-5}$$

Das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops liegt um fünf Größenordnungen über dem des Lichtmikroskops.

Das Doppelspaltexperiment

Das Doppelspaltexperiment ist das **zentrale Experiment** der Quantenphysik. Richard Feynman soll es als „Herz der Quantenmechanik“ bezeichnet haben. Es wurde 2002 von „Physics World“ (einer bedeutenden Fachzeitschrift für Physik) zum schönsten physikalischen Experiment aller Zeiten gewählt.

Beim Doppelspaltexperiment von **Thomas Young** (1801) fällt monochromatisches Licht auf eine Blende mit zwei schmalen Schlitzen, an denen das Licht gebrochen wird. Die dabei entstandenen Wellen überlagern sich und es entsteht das bekannte **Interferenzmuster**. Dies war der zwingende Beweis für eine Wellenstruktur des Lichts.

1909 wurde erstmals ein Doppelspaltexperiment mit einzelnen Photonen durchgeführt. Hier ist die Lichtquelle so schwach, dass die Photonen **einzelnen** und in zufälligen Zeitabständen abgegeben werden. Trotzdem entstehen wieder die **Interferenzstreifen** auf einer Fotoplatte. Das Experiment muss jedoch lange laufen (bei den ersten Experimenten waren es ein paar Monate; heute wenige Stunden).

Claus Jönsson führte 1957 Versuche zur Interferenz von **Elektronen** am Doppelspalt durch. Es ergab sich das typische **Interferenzbild** einer **Welle**. Er erreichte mithilfe von galvanischen Methoden Spaltbreiten unter 1/1 000 mm und drang damit in ein Gebiet vor, das man heute als Nanotechnologie bezeichnet. Ähnliche Interferenzerscheinungen konnten bei Protonen, Neutronen und verschiedenen Atomen nachgewiesen werden.

Um den Doppelspaltversuch zu erklären, bietet sich ein Wellenbild an. Diese Welle ist jedoch nicht als realistisch aufzufassen. Um vollständige und quantitative Aussagen über das Doppelspaltexperiment machen zu können, benötigt man die korrekte Quantentheorie (eine mathematische Theorie). Sie beruht nicht auf Bildern, sie ist nicht anschaulich.

Max Born gelang es im Jahre 1926, die Ergebnisse der Experimente zu deuten. Erst im Jahre 1954 (28 Jahre später!) erhielt er für seine Interpretation der Quantenmechanik gemeinsam mit Walter Bothe den Nobelpreis für Physik.



MAX BORN, DEUTSCHER PHYSIKER, 1882 BIS 1970, NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1954

Bornsche Wahrscheinlichkeitsdeutung

Ein Quantenobjekt kann durch eine **Wellenfunktion** beschrieben werden. Es kann nicht der genaue Aufenthaltsort eines Teilchens angegeben werden, sondern nur die sogenannte **Wahrscheinlichkeitsdichte**. Diese entspricht dem Betragsquadrat der Wellenfunktion.

Wir können nicht beobachten, was das Photon zwischen Quelle und Schirm „ist“ und was es „macht“. Das Teilchen hat – ohne eine Messung – keinen Weg von der Quelle zum Schirm. Werden auf dem Weg zum Schirm Eigenschaften gemessen, verschwindet die Interferenz.

Teilchen werden immer als Ganze an zufällig verteilten Orten auf dem Schirm nachgewiesen. Diese Nachweisorte sind **statistisch** verteilt. Ein Nachweisort für ein bestimmtes Teilchen ist nicht vorhersagbar. Dort, wo sich die hellen Interferenzstreifen finden, werden die meisten Teilchen auftreffen, an den dunklen Stellen eher wenige.

Man kann von einer **Wahrscheinlichkeitswelle** sprechen, die sich zwischen Quelle und Schirm ausbreitet, diese erzeugt auf dem Schirm Interferenzstreifen der Aufenthalts wahrscheinlichkeit. Die Wellenfunktion erfasst die wellenhafte Ausbreitung und das teilchenhafte Verhalten beim Nachweis der Quantenobjekte in einem einheitlichen Bild.

In der Quantenmechanik ist es möglich, dass einem Quantenobjekt klassisch definierte Eigenschaften nicht zugeschrieben werden können. Das Elektron „hat“ die Eigenschaft Ort nicht, der Aufenthaltsort des Elektrons entsteht erst im Moment einer entsprechenden Messung.

Schrödinger und Einstein hatten Probleme mit dieser Interpretation der Quantenphänomene. Um die Widersprüche aufzuzeigen, erfand Schrödinger sein berühmt gewordenes Katzenparadoxon.

Das Katzenparadoxon von Schrödinger

Eine Katze wird in einen Kasten mit einer „Höllemaschine“ gesteckt. In diesem Kasten befindet sich ein radioaktives Element. Wenn es zerfällt, registriert dies ein Geigerzähler und es wird mit einem Hammer ein Gefäß mit Giftgas zerschlagen, so dass die Katze stirbt. Der radioaktive Zerfall ist ein Zufallsereignis. Solange wir die Katze nicht beobachten, können wir nicht sagen, ob sie noch lebt oder bereits tot ist. Die radioaktive Substanz befindet sich in einem **Überlagerungszustand** aus **nicht zerfallen** und **zerfallen**. Es müsste sich dann auch die Katze in einem Überlagerungszustand aus **lebend** und **tot** befinden. Erst wenn in den Kasten hineingeschaut wird (eine Messung vorgenommen wird), kann ein Zustand festgestellt werden. Eine der beiden Möglichkeiten wird durch Beobachtung zur Realität.

In der Alltagswelt beobachten wir keine Schrödingerkatzen, weil die Quanten ständig mit der Umgebung wechselwirken. Die Katze wird nicht erst zum Zeitpunkt der Messung von ihren Qualen erlöst, sondern bereits durch eine Reaktion mit der Umgebung, wie z. B. mit Luftmolekülen oder dem Tageslicht. Dieser Effekt des Zerfalls des Quantenzustands wird von den Physikern als **Dekohärenz**, eine Art Kollaps der Wellenfunktionen, bezeichnet.

„Sein Ehrgeiz bestand vielmehr darin, sich sogleich an die Aufgabe zu machen, die von den Wissenschaftsriesen vorgelegten Einsichten unters Volk zu bringen.“

(FISCHER: DIE HINTERTREPPE ZUM QUANTENSPRUNG)

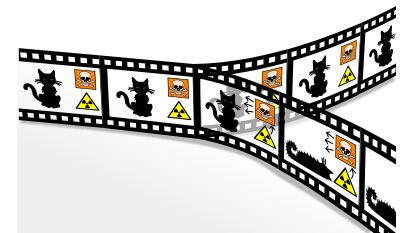
„Die Quantentheorie beschreibt die Natur, wie sie sich zeigt, wenn sie mit realen Messgeräten vermessen wird.“

(MITTELSTAEDT: PHILOSOPHISCHE PROBLEME DER MODERNEN PHYSIK)

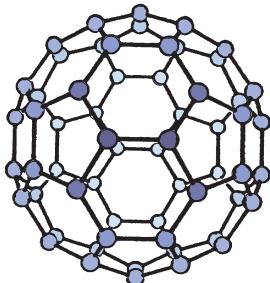
„Wie sie ‚ist‘, bleibt dabei völlig offen.“

(HÜBEL: WAS SIE SCHON IMMER ÜBER QUANTEN WISSEN WOLLTEN)

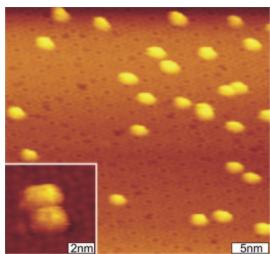
Parádoxos: griechisch für wider Erwarten.



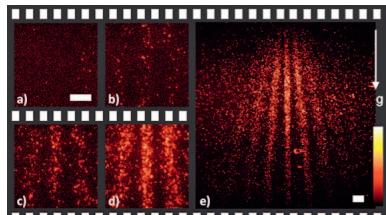
Schrödingers Katze, lebend und tot

Struktur eines C₆₀-Moleküls

Da das C₆₀-Molekül Ähnlichkeit mit einem Fußball hat, wird es auch Fußballmolekül genannt.



Fullerene auf einer Siliciumoberfläche, aufgenommen mit einem Rastertunnelmikroskop



Einzelbilder aus einem Film, der die Entstehung eines Interferenzmusters einzelner Phthalocyanin-Moleküle zeigt.

Zu den einzelnen Bildern:
a) zu Beginn, b) 2 min, c) 20 min,
d) 40 min und e) 90 min nach
Beginn aufgezeichnet.



Phthalocyanin hat eine alternierende Stickstoff-Kohlenstoff-Ringstruktur, es kommt als schwarzer, dunkelblauer oder purpurer Kristall vor.

Wo ist der Übergang von der klassischen Physik (der Alltagswelt) zur Quantenphysik? Wegen der großen Masse von klassischen Objekten, wie z. B. einem Ball, ist die De-Broglie-Wellenlänge sehr klein. Die Interferenzeffekte können nicht wahrgenommen werden.

Eine der faszinierendsten und noch immer offenen Fragen der modernen Physik ist, inwieweit Quantenphänomene an Objekten unserer Alltagswelt beobachtbar sind. Um dies zu beantworten, werden Quantenexperimente an immer größeren und schwereren Objekten durchgeführt. Und da bedarf es einiger Tricks, denn je größer und schwerer die im Experiment verwendeten Objekte sind, umso schwieriger wird es, Quanteneffekte sichtbar zu machen.



Schrödingers Katze in einem Kasten mit einer „Hölle“

Doppelspaltexperiment mit Molekülen

Bei Experimenten mit Fullerenen werden besondere Kohlenstoffmoleküle verwendet. Eines der am besten erforschten Fullerene ist das C₆₀-Molekül. Es wurde zu Ehren des Architekten **Richard Buckminster Fuller** **Buckminster-Fulleren** genannt, da es den von ihm konstruierten geodätischen Kuppeln ähnelt.

An der Universität Wien wurden bereits einige solche Versuche mit verschiedenen Molekülen unter anderem mit Phthalocyanin-Molekülen durchgeführt. Die Moleküle haben eine Wellenlänge von zwei bis drei pm und auch hier können Interferenzmuster beobachtet werden.



Ziele erreicht? – „Die De-Broglie-Welle“

- 5.2.07** Berechnen Sie die De-Broglie-Wellenlänge der C₆₀-Moleküle, die im Experiment an der Uni Wien zur Interferenz gebracht wurden. Die Masse eines Kohlenstoffatoms beträgt ca. $2 \cdot 10^{-26}$ kg und die mittlere Geschwindigkeit $v = 220$ m/s.
- 5.2.08** Erläutern Sie die Hypothesen von de Broglie.
- 5.2.09** In welchem Bereich findet die Elektronenmikroskopie Anwendung?
- 5.2.10** Warum hat das Doppelspaltexperiment mit Elektronen eine so große Bedeutung?
- 5.2.11** Warum kann man nicht von der Bahn eines Elektrons sprechen?
- 5.2.12** Wie lautet die bornsche Wahrscheinlichkeitsdeutung?
- 5.2.13** Warum ist es nicht sinnvoll, einem Ball eine Wellenlänge im Sinne von de Broglie zuzuordnen? Zeigen Sie dies anhand einer geeigneten Rechnung.
- 5.2.14** Welche Bedeutung haben die Wahrscheinlichkeitswelle und die Wahrscheinlichkeitsdichte?

5.2.3 Die heisenbergsche Unschärferelation

Werner Heisenberg hat die Physik des 20. Jahrhunderts in großem Ausmaß mitbestimmt. Er interessierte sich nicht nur für Physik, er spielte konzertreif Klavier, es war ihm ein Leichtes, fremde Sprachen zu erlernen, und er besaß zudem noch sportliches Talent.

Bereits im Alter von 24 Jahren lieferte er bahnbrechende Erkenntnisse zur Quantenmechanik und schon als 26-Jähriger war er Professor für Physik.



Mein Ziel

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **heisenbergsche Unschärferelation** erläutern.



WERNER HEISENBERG, 1902 BIS 1976, DEUTSCHER PHYSIKER, NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1932

Heisenberg erfand ein **Gedankenexperiment**, das er zur Illustration seiner bekannten Relation verwendete. Dabei wird versucht, den Ort eines Teilchens (z. B. eines Elektrons) durch Beleuchtung mit kurzwelligem Licht festzulegen. Das Objekt streut das Licht, so dass man es mit einem Mikroskop betrachten kann und Informationen über seine Lage bekommt.

Das Auflösungsvermögen ist durch die Wellenlänge des verwendeten Lichts begrenzt. Um kleinere Objekte betrachten zu können, ist Licht kleinerer Wellenlänge notwendig. Zumaldest muss ein Photon durch das Mikroskop auf das Teilchen fallen und dieses übt einen Stoß auf das Teilchen aus. Der Betrag dieses durch Streuung übertragenen Impulses liegt in der Größenordnung des Photonenimpulses. Der Impuls eines Teilchens und sein Aufenthaltsort müssen folgender Ungleichung genügen.

Die heisenbergsche Unschärferelation

Ort und Impuls eines Teilchens können nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit gemessen werden. Es gilt:

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{h}{2\pi} \quad \left(\frac{h}{2\pi} = \hbar \text{ (h-quer)} \right)$$

Das Produkt aus **Ortsunschärfe** und **Impulsunschärfe** ist immer größer als oder so groß wie das plancksche Wirkungsquantum geteilt durch 2π , kann also nie null werden. Je genauer eine Größe festgelegt ist, desto größer ist die Unbestimmtheit der anderen Größe. Impuls und Ort eines Quantenteilchens werden auch als komplementäre Größen bezeichnet.

Dieser Zusammenhang wirkt sich auch bei der Bahn eines Teilchens aus. Um diese angeben zu können, müssten für einen Zeitpunkt der exakte Ort und der exakte Impuls bekannt sein. Dies ist jedoch grundsätzlich nicht möglich und daher können Quantenobjekten **keine genau definierten Bahnen** zugeordnet werden. Nach Bohr und Heisenberg werden diese vollständig durch die Wellenfunktion beschrieben.

Beispiel: 5.2.03: Bohrsches Atommodell

Wir berechnen die Ungenauigkeit des Ortes des im Wasserstoffatom kreisenden Elektrons der K-Schale mit der Geschwindigkeit $2,19 \cdot 10^6 \text{ m/s}$. Die Masse des Elektrons beträgt $9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.



$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$



Zwei Größen sind dann komplementär zueinander, wenn die Informationen über beide nicht gleichzeitig vorhanden sein können.



Die **Unschärfe** hat nichts mit einer Messungenauigkeit im klassischen Sinn zu tun, sie liegt in der Quantennatur des Teilchens selbst begründet.



Schalenmodell des Atoms: Die innerste, dem Atomkern nächstgelegene Schale wird K-Schale genannt und enthält maximal zwei Elektronen.



Der Impuls eines Elektrons kann so berechnet werden:

$$p = m \cdot v = 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 2,19 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 1,99 \cdot 10^{-24} \text{ kgm/s}$$

Für die Unschärfe bezüglich des Ortes ergibt sich

$$\Delta x \geq \frac{h}{2\pi \cdot \Delta p_x} \approx \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}}{2\pi \cdot 1,99 \cdot 10^{-24} \text{ kgm/s}} = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Dieser Wert ist ca. halb so groß wie der von Bohr berechnete Durchmesser für die K-Schale. Eine genaue Beschreibung der Elektronenbahnen ist nicht möglich. Das bohrsche Atommodell mit seinen Bahnen dient nur zur Anschauung.

Neben dem Zusammenhang zwischen Ort und Impuls gibt es noch weitere Paare komplementärer Größen von Quantenteilchen. Eine wichtige Unschärferelation besteht zwischen ΔE und Δt , deren Produkt ebenfalls eine Wirkung ist. Dies ist z. B. für die Energiezustände der Elektronen im Atom von Bedeutung.



Ziele erreicht? – „Die heisenbergsche Unschärferelation“

5.2.15 Beschreiben Sie das Gedankenexperiment von Heisenberg.

5.2.16 Was sagt die heisenbergsche Unschärferelation aus?

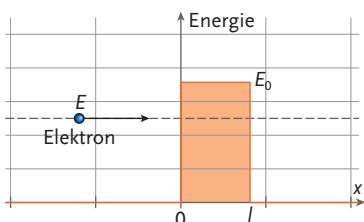
5.2.17 Warum hat die heisenbergsche Unschärfe keine Auswirkungen auf klassische Teilchen? Zeigen Sie dies anhand eines Teilchens mit $m = 0,6 \text{ mg}$ und einer Ortsunschärfe von $0,01 \text{ mm}$.

5.2.18 Warum ist es nicht sinnvoll, von der Bahn eines Elektrons zu sprechen?



5.2.4 Der Tunneleffekt

Ernest Rutherford machte 1899 Versuche mit radioaktivem Material, wie z. B. Uran. Dabei stellte er fest, dass es zwei Arten von Strahlung gibt, er nannte eine davon Alphastrahlung. Die Natur dieser Strahlung konnte erst 1928 unabhängig von zwei verschiedenen Forschergruppen erklärt werden. **George Anthony Gamow** gelang die Erklärung dieser Strahlung 1928 unabhängig von zwei anderen Physikern namens **Edward Condon** und **Ronald W. Gurney**. Er verwendete dazu die quantenmechanische Erklärung von Tunnelprozessen.



Ein Elektron mit der Energie E nähert sich einem Potenzialwall der Höhe E_0 und der Breite l



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- den **Tunneleffekt** erklären;
- mithilfe des Tunneleffekts den **Alphazerfall** verstehen;
- wichtige **technische Anwendungen** aufzählen und deren **Verwendungsgebiete** nennen;
- die **Funktionsweise des Rastertunnelmikroskops** nachvollziehen und Anwendungsgebiete angeben.



Schrödinger-Gleichung.

Ein Quantenteilchen, z. B. ein Elektron, hat eine Gesamtenergie E und bewegt sich auf eine Potenzialschwelle der Höhe E_0 und der Breite l zu. Da E kleiner ist als E_0 , würde das Elektron aufgrund der klassischen Physik reflektiert. Aus der Sicht der Quantenmechanik kann es als Materiewelle aufgefasst werden und es besteht eine gewisse **Wahrscheinlichkeit**, dass es auf der anderen Seite auftaucht.

Mithilfe der Schrödinger-Gleichung kann die Wellenfunktion des Elektrons bestimmt werden und damit auch die **Wahrscheinlichkeitsdichte**, die als Ort des Teilchens interpretiert werden kann. Nach der Barriere ist diese Wahrscheinlichkeit zwar sehr gering, aber vorhanden. Das Teilchen bewegt sich nicht durch den Potenzialwall, das Einzige was physikalisch ausgesagt werden kann, ist, dass das Teilchen in allen drei Bereichen gefunden werden kann.

Der Name **Tunneleffekt** kommt daher, dass die Teilchen das Hindernis klassisch nicht überwinden können. Man muss sich den Effekt, wenn überhaupt, eher als eine Form von Durchtunneln der Barriere vorstellen.

Der sogenannte **Durchlasskoeffizient** gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Elektron durch die Barriere hindurchkommt – also durchtunnelt kann. Dieser hängt vor allem von drei Größen ab, der Teilchenmasse, der Länge des Potenzialwalls und der Energiedifferenz zwischen Teilchen und Potenzialschwelle. Angenommen, ein Elektron hat eine Energie von 5,1 eV und nähert sich einem Potenzialwall mit 6,8 eV der Länge 750 pm. Von einer Million Elektronen werden rund 45 hindurchtunneln.

Beispiel 5.2.04: Alphazerfall

Beim Alphazerfall wird das Alphateilchen (Heliumkern) innerhalb des Atomkerns durch eine Energiebarriere gefangen gehalten. Es gibt jedoch eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass ein Teilchen durchtunnelt kann. Die lange **Halbwertszeit** von Uran 238 von $4,5 \cdot 10^9$ Jahren weist darauf hin, dass es die Teilchen sehr schwer haben, die Barriere zu überwinden.

Dem Alphateilchen hilft die **Unbestimmtheitsrelation** $\Delta E \cdot \Delta t \approx h$. Es kann sich für eine sehr geringe Zeitdauer Energie kurzfristig ausborgen. Für eine Zeitdauer Δt ist die Energie um den Wert ΔE **unbestimmt**. Dieser Energiewert ist jedoch sehr hoch, daher ist die Wahrscheinlichkeit zu entkommen sehr klein und damit die Halbwertszeit sehr lang.

Der Tunneleffekt wird in vielen technischen Anwendungen genutzt.

Tunneldiode

Hier wird ein Elektronenstrom durch die Veränderung der Höhe des Potenzialwalls schnell ein- oder ausgeschaltet. Sie wird als Bauteil bei **Verstärkern** und Schwingkreisen verwendet. Da sich die Schaltungen bis in den Gigahertzbereich eignen, werden sie in der Hochfrequenztechnik gebraucht.

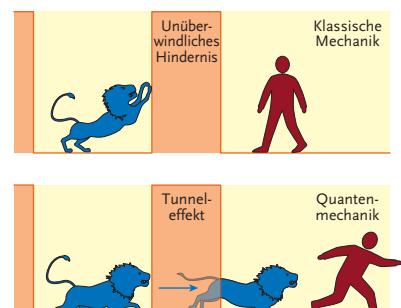
Flash-Speicher

Flash-Speicher sind digitale Speicherchips und dienen als **Speicherkarten** für Digitalkameras, Mobiltelefone und Handhelds. Der Mechanismus, der die Elektronen durch die isolierende Oxidschicht passieren lässt, wird Fowler-Nordheim-Tunneleffekt genannt, eine spezielle Art des Tunnelns.

Rastertunnelmikroskop

Mit dem Rastertunnelmikroskop (RTM) lassen sich detaillierte Karten von **Oberflächen** anfertigen, deren Strukturen sich im atomaren Bereich befinden.

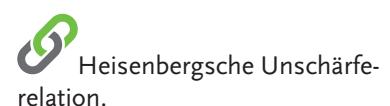
Das Prinzip: Eine sehr winzige Metallspitze wird sehr nahe (wenige Millionstel Millimeter) über die zu untersuchende Probe gebracht. Zwischen Nadel und Probe fließt ein sehr kleiner Strom (ca. 1 pA bis 10 nA), der Tunnelstrom. Beim Abrastern



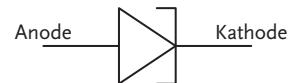
Tunneleffekt für Löwen



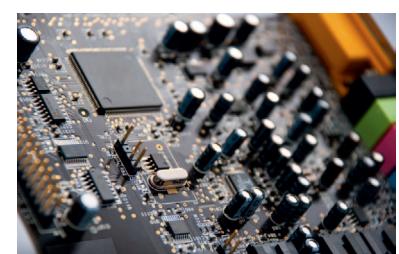
Alphastrahlung.



Heisenbergsche Unschärferelation.



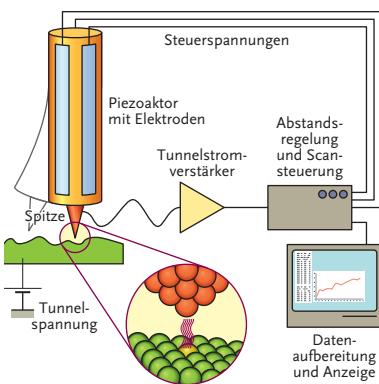
Elektronisches Schaltzeichen für eine Tunneldiode



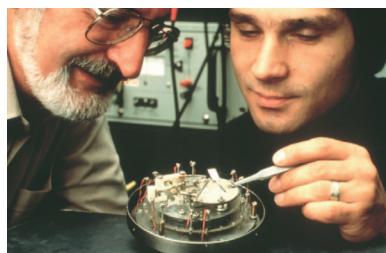
Soundcard mit Verstärkerbauteilen



Speicherkarte als Nachfolgerin des Farbfilms



Schematischer Aufbau eines Rastertunnelmikroskops



Gerd Binnig und Heinrich Rohrer mit dem ersten Rastertunnelmikroskop 1981, "Courtesy of International Business Machines Corporation, © 2012 International Business Machines Corporation"



RTM-Aufnahme von Fullerenen, Doppelpaltpunktexperiment mit Molekülen siehe Kap. D, 5.2.2.

"It was less difficult, finally, than everybody thought. That's why everybody thought you could not do it. That's why nobody did it. And that's, I would say, a crucial thing in science. Everything is new because other people think you cannot do it."

(HEINRICH ROHRER)

der Probenoberfläche wird die Höhe der Spitze mit einer Feinmechanik (Piezoelementen) so geregelt, dass der Tunnelstrom konstant bleibt. Es entsteht ein **Höhenprofil** der Oberfläche.

Da nur **elektrisch leitende** Proben (Metalle, Halbleiter) direkt untersucht werden können, müssen auf nicht leitende Proben feine elektrisch leitende Schichten durch Dampf aufgebracht werden. Da das Mikroskop sehr stark auf äußere Einflüsse reagiert, muss es so gut wie möglich von der Umwelt abgeschirmt werden, z. B. durch Schallisierung, Federaufhängung und thermische Isolation.

Im Gegensatz zur Elektronenmikroskopie (sie benötigt eine aufwendige Präparation der Proben und hohe Vakua) kann mit dem RTM auch unter Atmosphärenbedingungen gearbeitet werden.

Das Rastertunnelmikroskop ist zu einem wichtigen Analysegerät in der Oberflächenphysik, Materialforschung und der Chemie geworden. Die Ingenieure können damit Einblick in die Miniaturisierung von elektronischen Komponenten erhalten und Biologen die Grundbausteine des Lebens unter nahezu natürlichen Bedingungen untersuchen. Um ein besseres Verständnis von Batterien zu bekommen, beobachten Chemiker Reaktionen in einer elektrolytischen Lösung.

1998 gelang es dem Amerikaner **Don Eigler**, mit der Mikroskopspitze des Rastertunnelmikroskops Atome auf der untersuchten Oberfläche zu verschieben.

Heute gibt es bereits viele Arten von Rastertunnelmikroskopen, geeignet für die verschiedensten Untersuchungszwecke. Mit einem Rasterkraftmikroskop, einer Weiterentwicklung des RTM, ist es auch möglich, den atomaren Aufbau nicht leitender Oberflächen zu untersuchen.



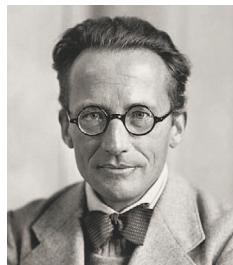
Ziel erreicht? – „Der Tunneleffekt“

- 5.2.19** Erklären Sie mithilfe des Modells eines Potenzialwalls das Prinzip des Tunneleffekts.
- 5.2.20** Was gibt der Durchlasskoeffizient an und von welchen Größen hängt er ab?
- 5.2.21** Beschreiben Sie den Aufbau und die Funktionsweise eines Rastertunnelmikroskops.
- 5.2.22** Warum und wovor muss das RTM abgeschirmt werden?
- 5.2.23** Recherchieren Sie im Internet über das Rasterkraftmikroskop. Welche besonderen Eigenschaften weist es auf? Wozu wird es benötigt?

5.2.5 Die Schrödinger-Gleichung

Erwin Schrödinger war um die vierzig Jahre alt, als er die grundlegende Gleichung der Quantenphysik im Jahre 1926 entwickelte. Sein Ziel war es, die Bewegung eines Elektrons in einem Atom zu beschreiben. Er hoffte, dies mit einer Methode tun zu können, die aus der klassischen Physik bekannt ist, mit stehenden Wellen.

Das Ergebnis der Anstrengungen war die bekannte Gleichung, die mithilfe von komplexer Mathematik das gesuchte Ergebnis lieferte, jedoch zum Unmut Schrödingers nicht mit klassischen Methoden erklärt werden konnte, sondern spezielle mathematische Rechenregeln und quantenmechanische Sichtweisen erforderte.



ERWIN SCHRÖDINGER, 1887 BIS 1961, ÖSTERREICHISCHER PHYSIKER, NOBELPREIS FÜR PHYSIK GEMEINSAM MIT PAUL DIRAC 1933



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- **grundlegende Phänomene** angeben, die mithilfe der Schrödinger-Gleichung erklärt werden können;
- nachvollziehen, dass mit der **Lösung der Gleichung** das Atommodell richtig beschrieben werden kann.

Das bohrsche Atommodell konnte die Bewegung von mehreren Elektronen in einem Atom nicht exakt beschreiben. Im Gegensatz dazu liefert die **Schrödinger-Gleichung** auch für diesen Fall eine richtige Antwort.

Diese Gleichung kann als **Fundament** für fast alle praktischen Anwendungen der Quantenmechanik gesehen werden. In der modernen Physik ist sie sehr wichtig, um grundlegende Phänomene zu erklären:

- Beschreibung der Orbitale der Atome in der Chemie
- Elektronenenergie in der Halbleiterphysik
- Merkmale der Neutronen und Protonen im Atomkern
- Beschreibung der Eigenschaften von Elementarteilchen

Schrödinger-Gleichung

Schrödinger-Gleichung für die Wellenfunktion:

$$H\psi = E\psi$$

Eindimensionale zeitunabhängige (stationäre) Schrödinger-Gleichung

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V\psi(x) = E\psi(x)$$

Die Schrödinger-Gleichung hat sehr große Bedeutung, ähnlich den newtonischen Gesetzen und der Energieerhaltung in der klassischen Mechanik. Sie beinhaltet die **Wellenfunktion** $\psi(x)$, die Vorhersagen über die Wahrscheinlichkeiten von Ereignissen oder Ausgängen ermöglicht. Die einzelnen Ausgänge sind nicht festgelegt. Für eine große Anzahl an Ereignissen liefert die Schrödinger-Gleichung die Verteilung der Ergebnisse. In Experimenten beobachtete quantenmechanische Effekte können durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben werden.

Die erste der beiden Formeln sieht sehr einfach aus, es steckt jedoch sehr viel in dieser Gleichung. Bei H und E handelt es sich nicht um Variablen, sondern um sogenannte **Operatoren**.

Die zweite Gleichung gilt für den eindimensionalen zeitunabhängigen Fall. Die **Lösungen** der zeitunabhängigen Schrödinger-Gleichung zu finden, ist oft sehr schwierig. Aber für ein Elektron in der Umgebung eines Atomkerns erhält man z. B. als Lösungen die **Atomorbitale**.

Die Gleichung wurde von Schrödinger unter der Berücksichtigung gewisser physikalischer Prinzipien als neue Theorie postuliert. Er hat ebenfalls die bereits zu seiner Zeit anerkannten quantenmechanischen Erkenntnisse genutzt.

Im Allgemeinen handelt es sich bei der Wellenfunktion um eine komplexe Funktion. Das Betragsquadrat $|\psi|^2$ der Wellenfunktion hat eine **physikalische Bedeutung** und wird als Wahrscheinlichkeitsdichte der Teilchenposition bezeichnet.



Stehende Wellen in der klassischen Physik.

"I must not give the impression that science alone interested me. As a matter of fact my early desire was to be a poet. But I speedily realized that poetry was not a paying business. Science, on the other hand, offered me a career."

(ERWIN SCHRÖDINGER)



Herstellung eines Wafers (einer Scheibe, auf der Halbleiterbauelemente durch verschiedene technische Verfahren hergestellt werden)



V ist die **potenzielle Energie** und **E** die **Energie des Systems**.

Ein **Operator** ist eine Rechenvorschrift, die auf eine ganze Funktion angewandt wird und diese in eine andere Funktion überführt.



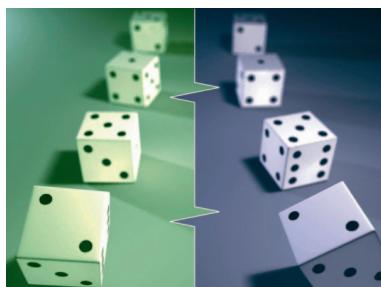
Solvaykonferenz 1927, Erwin Schrödinger, umgeben von bekannten Physikern und Physikerinnen seiner Zeit



Der Begriff der **Verschränkung** wurde 1935 vom österreichischen Nobelpreisträger Erwin Schrödinger geprägt.

„Es scheint hart, dem Herrgott in die Karten zu gucken. Aber dass er würfelt und sich telepathischer Mittel bedient (wie es ihm von der gegenwärtigen Quantentheorie zugemutet wird), kann ich keinen Augenblick glauben.“

(BRIEF VON EINSTEIN AN CORNELIUS LANCZOS, 21. MÄRZ 1942)



Zwei verschränkte Würfel würden absolut zufällige, aber immer gleiche Zahlen zeigen

Vor der Messung ist die **Polarisation** unbestimmt.



Ein Beta-Bariumborat-Kristall wird mit Laserlicht bestrahlt, es entstehen zirkularpolarisierte UV-Photonen.



Die **Lichtgeschwindigkeit** bleibt die größte Geschwindigkeit, mit der Information übertragen werden kann.

Ziele erreicht? – „Die Schrödinger-Gleichung“

- 5.2.24 Nennen Sie grundlegende Phänomene der Physik die mithilfe der Schrödinger-Gleichung erstmals erklärt werden konnten.
- 5.2.25 Was beschreiben Atomorbitale?
- 5.2.26 Worin unterscheiden sich die beiden Größen Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte?
- 5.2.27 Recherchieren Sie im Internet über die Solvaykonferenz von 1927. Warum hat diese Konferenz so große Bedeutung in der Geschichte der Quantenphysik? Welche großen Persönlichkeiten finden sich auf dem Foto?

5.2.6 Verschränkte Teilchen

Für die Besatzung des Raumschiffs Enterprise gehört das Beamen längst zum Alltag. Um schnell auf einen unbekannten Planeten zu gelangen, begibt sich die Crew in den Transporterraum. Nach dem legendären „Beam me up, Scotty“ löst sie sich auf und befindet sich im nächsten Augenblick in einer fremden Welt. Das Beamen von Menschen funktioniert nur in Science-Fiction-Filmen, die Quantenteleportation einzelner Photonen im Labor ist aber bereits gelungen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- erklären, was **Verschränkung** bedeutet;
- erklären, welche wichtigen **Eigenschaften verschränkter Teilchen** haben;
- **Anwendungen von verschränkten Teilchen** angeben.

Die **Verschränkung** ist eine seltsame, aber grundlegende quantenmechanische Eigenschaft. Zwei oder mehr Teilchen heißen verschränkt, wenn sie nicht unabhängig voneinander beschrieben werden können. Verschränkte Photonen kann man als ein **Quantenobjekt** sehen, sie sind miteinander in einem Gesamtzustand überlagert. Eine Wellenfunktion beschreibt diesen Zustand.

Die Erzeugung von verschränkten Photonen ist mithilfe eines speziellen Kristalls möglich. Die **Polarisation** ist eine Eigenschaft von verschränkten Teilchen. Diese ist für einzelne Teilchen zufällig verteilt. Ist jedoch die Polarisation des einen Teilchens bekannt, kennt man auch die des anderen. Die **Korrelation** ist von Beginn an festgelegt, sie muss nicht von einem Messort zum anderen übertragen werden. Es erfolgt auch keine Informationsübertragung mit der Verschränkung, die Grundsätze der einsteinschen Relativitätstheorie werden nicht verletzt.

Physiker/innen haben immer wieder versucht, diese Aussagen anzuzweifeln. Könnte es nicht sein, dass irgendeine verborgene Eigenschaft, die wir noch nicht kennen, für diese Ergebnisse verantwortlich ist? Albert Einstein war einer der Zweifler, er bezeichnete die Verschränkung als „spukhafte Fernwirkung“. Gemeinsam mit seinen Studenten **Boris Podolsky** und **Nathan Rosen** entwickelte er ein Gedankenexperiment, genannt **EPR-Experiment**. Sie wollten damit zeigen, dass die Quantenmechanik die Realität nicht vollständig erklären kann und die quantenmechanische Unbestimmtheit auf das Wirken verborgener Parameter zurückgeführt werden kann.

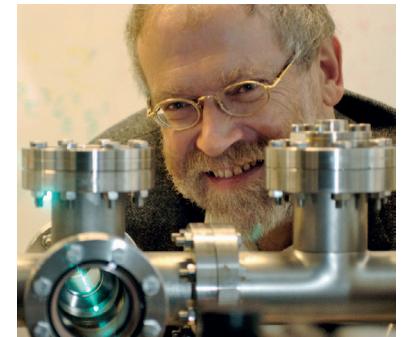
Der irische Physiker **John S. Bell** bewies 1964 in seinem berühmt gewordenen Aufsatz, dass lokale verborgene Parameter mit den statistischen Vorhersagen der Quantenmechanik nicht verträglich sind. Die nach ihm benannte mathematische Relation heißt **bell'sche Ungleichung**.

Quantencomputer

Ein herkömmlicher Computer verwendet Bits, die nur die Werte 0 oder 1 annehmen können. Der Quantencomputer arbeitet mit **Quantenobjekten** als Grundlage und benutzt Quantenbits, kurz QUBITS. Diese können als Quantenüberlagerungen von **0 und 1** existieren, genau wie ein Photon, das als Superposition verschiedener Polarisationszustände vorhanden ist. Ein Quantenrechner kann bestimmte Probleme in weniger Rechenschritten lösen und ist daher schneller als ein klassischer Rechner.

Beispiele sind die Primzahlzerlegung von großen Zahlen, die für das Knacken von Codes wichtig ist, und das Auffinden von Eintragungen in einer Datenbank. Aber auch die rechnerische Simulation der Quantenphysik könnte mit einem Quantencomputer durchgeführt werden. Sie ist ein grundlegendes Problem in der Teilchenphysik, Chemie (Quantenchemie) und Nanotechnik.

Das theoretische Wissen über Quantencomputer und ihre Funktionsweise ist großteils schon vorhanden. Um einen in der Praxis nutzbaren Rechner zu konstruieren, müssen jedoch noch sehr viele Probleme gelöst werden.



ANTON ZEILINGER, GEB. 1945,
ÖSTERREICHISCHER PHYSIKER

Quantenkryptografie

Sie ist ein Verfahren, um eine **abhörsichere Datenübertragung** zu ermöglichen. Dabei werden Daten mithilfe verschränkter Photonenpaare übermittelt. Es ist nicht möglich, eines der verschränkten Photonen abzufangen, ohne bemerkt zu werden, da dadurch der sehr empfindliche Zustand zerstört wird. Eine unerkannte Abhörung kann also nicht erfolgen. Zur sicheren Datenübertragung benötigt man einen klassischen Transfer und zusätzlich einen Übertragungskanal für die verschränkten Zustände.

Die weltweit erste **quantenkryptografisch** verschüsselte Geldüberweisung fand am Mittwoch, dem 21. April 2004, in Wien unter der Leitung von Anton Zeilinger statt. Mithilfe eines 1 500 m langen Glasfaserkabels wurden 3 000 Euro von einer Bankfiliale zum Wiener Rathaus geschickt.



Ziele erreicht? – „Verschränkte Teilchen“

- 5.2.28** Erklären Sie den Begriff Verschränkung.
- 5.2.29** Welche quantenmechanische Eigenschaften haben verschränkte Teilchen?
- 5.2.30** Wodurch unterscheidet sich ein Quantencomputer von einem herkömmlichen Rechner?
- 5.2.31** Beschreiben Sie die Funktionsweise der Quantenkryptografie.

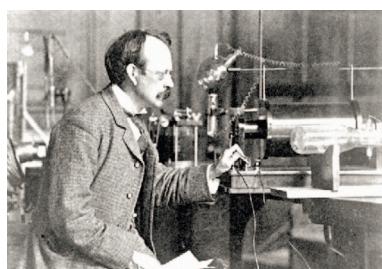


NIELS BOHR, 1885 BIS 1962,
DÄNISCHER PHYSIKER,
NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1922

Atomos: griechisch für unteilbar

Atommodelle siehe auch
NAWI I/II, Kap. C, 2.1.

Albert Einstein war überzeugt, dass wir zwischen der realen Welt und ihrer mathematischen Beschreibung unterscheiden müssen. Er schrieb: „Insofern sich die Sätze der Mathematik auf die Wirklichkeit beziehen, sind sie nicht sicher, und insofern sie sicher sind, beziehen sie sich nicht auf die Wirklichkeit.“



SIR JOSEPH JOHN THOMSON,
1856 BIS 1940, BRITISCHER PHYSIKER,
NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1906, ENTDECKER DES ELEKTRONS

Der Name Geiger ist durch den **Geiger-Müller-Zähler** weltweit bekannt. **Johannes Wilhelm Geiger**, 1882 bis 1945, war ein deutscher Physiker, der gemeinsam mit seinem Doktoranden **Walther Müller** dieses Messgerät für radioaktive Strahlung entwickelte.

5.3 Atom- und Kernphysik

Viele Menschen sind von Polarlichtern fasziniert und findige Reiseunternehmer bieten Polarlichtreisen an. An Supermarktkassen sind ebenso Laser im Einsatz wie bei der Geschwindigkeitskontrolle, in der Bauwirtschaft und der Industrie. Das warme Licht herkömmlicher Glühlampen wird von vielen Menschen dem kalten Licht von Leuchtdioden vorgezogen. Die Entdeckung und Klassifizierung der Spektrallinien durch Fraunhofer gilt in der Wissenschaftsgeschichte nach wie vor als Meilenstein. Zur Erklärung all dieser Phänomene werden Atommodelle herangezogen.

5.3.1 Das bohrsche Atommodell

Das Bemühen um Anschaulichkeit von physikalischen Modellen und ihre vereinfachende mathematische Beschreibung tritt bei Atommodellen auch im historischen Zusammenhang besonders deutlich hervor.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- verschiedene **Atommodelle** angeben und qualitativ beschreiben;
- einfache **Berechnungen** für das **bohrsche Atommodell** ausführen;
- die **Geschwindigkeit**, den **Bahnradius** und die **Energie** des Elektrons in Abhängigkeit von der Quantenzahl n im **Wasserstoffatom** ableiten.

Atome – unteilbare Urbausteine

Die griechischen Philosophen, insbesondere Leukipp, der im fünften Jahrhundert vor Christi Geburt lebte, und sein Schüler Demokrit, argumentierten, dass man bei ständiger Teilung eines Stabes auch mit immer raffinierteren Methoden nicht beliebig fortfahren könne, sondern letztlich zu **unteilbaren Bausteinen, den Atomen** gelangen müsse.

Atome – harte Kugeln

John Dalton begründete um 1800 den Atomismus neu und stellte sich Atome als kleine, homogene, völlig elastische Kugeln vor. In der Wärmelehre und der Chemie findet dieses **Harte-Kugel-Modell** noch Verwendung.

Atome – Rosinenkuchen

Sir Joseph John Thomson entwickelte 1904 das **Rosinenkuchenmodell**, wobei die Elektronen den Rosinen entsprechen und der Teig der positiven Ladung entspricht. Auch die Größe von Atomen gab Thomson bereits mit einigen 10^{-10} m (= 0,1 nm = 1 Ångström, 1 Å) an.

Atome – Elektronen sausen auf keplerschen Ellipsen um den Atomkern

Durch Streuexperimente an Goldfolien, von denen auch die dünnsten rund 7 000 Atomlagen enthielten, fand **Ernest Rutherford** mit seinen Mitarbeitern **Johannes Geiger** und **Ernest Marsden** heraus, dass die Atommasse nicht homogen über das Atomvolumen verteilt ist. Beinahe die gesamte Atommasse und daher auch die gesamte positive Ladung ist im **Atomkern** konzentriert. Sie verwendeten als Geschosse die von radioaktiven Atomen ausgesandten Alphateilchen, deren Masse

rund 7 000-mal größer ist als die Masse eines einzelnen Elektrons. Die meisten Heliumkerne wurden nicht oder nur unmerklich abgelenkt. Zu ihrem Erstaunen konnten sie einige α -Teilchen beobachten, die um sehr große Winkel abgelenkt wurden. Einige He-Kerne wurden sogar zurückgestreut. Rutherford schreibt: „Es war fast so unglaublich, als ob man eine 15-Zoll-Granate auf ein Stückchen Seidenpapier feuert, die Granate zurückkommt und man von ihr getroffen wird.“

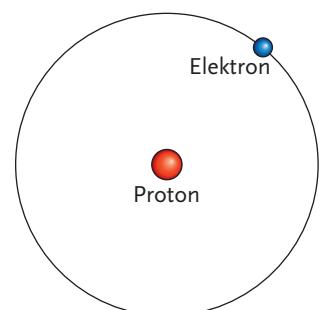
1911 formulierte er sein **Planetenmodell** des Atoms. Der Atomkern entspricht in seinem Modell der Sonne und die Elektronen entsprechen den um die Sonne kreisenden Planeten. Rutherford konnte aus den experimentellen Daten die Größenordnung von Atomkernen mit 10^{-15} m berechnen.

Im Rahmen der klassischen Physik betrachtet, enthält das **rutherford'sche Planetenmodell** folgende **Widersprüche**.

- Die Atome wären **instabil**, weil eine Kreisbewegung eine mit der Zentripetalkraft beschleunigte Bewegung ist. Daher müssten die Elektronen nach der klassischen Elektrodynamik Energie in Form von elektromagnetischen Wellen abgeben. Dadurch würde ihre Geschwindigkeit abnehmen und sich der Bahnradius kontinuierlich verkleinern.
- Die Bewegung der punktförmig angenommenen Elektronen auf Keplerellipsen kann die **räumliche Gestalt** des Wasserstoffatoms nicht erklären.
- Die experimentell beobachteten **scharfen Spektrallinien** können nicht erklärt werden. Ein Bahnwechsel eines Elektrons ist nicht explizit vorgesehen.



ERNEST RUTHERFORD, 1871 BIS 1937, NEUSEELÄNDISCHER PHYSIKER; NOBELPREIS FÜR CHEMIE 1908; SEIT 1931 BARON RUTHERFORD OF NELSON



Planetenmodell des H-Atoms



Eugene Wigner, ein ungarischamerikanischer Physiknobelpreisträger, publizierte im Jahr 1960 den berühmt gewordenen Essay „The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences“, frei übersetzt: Die unbegreifliche Effizienz der Mathematik in den Naturwissenschaften.

Beispiel 5.3.01: Coulombkraft und Gravitationskraft im H-Atom

Wir berechnen das Verhältnis der Coulombkraft zur Gravitationskraft für das Elektron im Abstand r vom Proton des Wasserstoffatoms. Dazu verwenden wir die Formeln für die Coulombkraft für zwei Ladungen q_1 und q_2 und die Gravitationskraft zweier Massen m_1 und m_2 .

$$F_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \quad F_{\text{Gravitation}} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

$$\frac{F_{\text{Coulomb}}}{F_{\text{Gravitation}}} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}}{G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}} = \frac{1}{G \cdot 4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{m_1 \cdot m_2}$$

Wegen der indirekten Proportionalität der beiden Kräfte zu r^2 hängt ihr Verhältnis nicht vom Abstand ab. Wenn wir die Konstanten

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}, \epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A} \cdot \text{s}}{\text{V} \cdot \text{m}}, q_1 = |q_2| = e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C},$$

$m_1 = m_p \approx 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ und $m_2 = m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ einsetzen, erhalten wir das Kraftverhältnis

$$\frac{F_{\text{Coulomb}}}{F_{\text{Gravitation}}} = 2,3 \cdot 10^{39}$$

Aufgrund dieses Größenunterschiedes können wir bei der Herleitung der Radien und Geschwindigkeiten des Elektrons im H-Atom die Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron vernachlässigen.

Atome – Bohr postulierte bestimmte Kreisbahnen

Um zwei Widersprüche des rutherford'schen Planetenmodells zu umgehen, nahm Niels Bohr an, dass sich ein Elektron nur auf ganz bestimmten Kreisbahnen um die als ruhend angenommenen Protonen bewegen darf und dabei keine Energie verliert. Dadurch erreicht Bohr die **Stabilität** der Atome und kann die **scharfen Spektrallinien** erklären.



Drehimpuls $L = m \cdot r \cdot v$.



Plancksches Wirkungsquantum $h \approx 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$.



Plancksches Wirkungsquantum geteilt durch $2\pi = h\text{-quer}$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi}$$



Das Wasserstoffatom ist das einfachste Atom, weil es sich nur aus einem Proton und einem Elektron aufbaut. Daher erwartete Niels Bohr, dass die mathematische Modellierung des H-Atoms den experimentellen Befunden am nächsten kommen würde.



Erster bohrscher Radius im H-Atom $r_1 \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$.

Dadurch wird die Größenordnung der Atome, wie sie bereits Sir Joseph John Thomson mit seinem Rosinenkuchenmodell angegeben hat, bestätigt.



Erste bohrsche Geschwindigkeit im H-Atom

$$v_1 \approx 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Sie beträgt rund 7,3 Promille der Vakuumlichtgeschwindigkeit.

Erstes bohrsches Postulat

Elektronen können den Atomkern nur auf **bestimmten, stabilen Bahnen** umkreisen. Für diese stabilen Kreisbahnen mit Radius r_n ist der **Drehimpuls L** für ein Elektron, das sich mit der Geschwindigkeit v_n auf der n -ten Kreisbahn bewegt, ein **ganzzahliges Vielfaches von $h/(2\pi)$** .

$$m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot h / (2 \cdot \pi) = n \cdot \hbar$$

Damit hatte Niels Bohr zusätzlich zur Coulombkraft als Zentripetalkraft die zweite Gleichung für die Bestimmung der beiden Unbekannten r_n und v_n gefunden.

Beispiel 5.3.02: Radius und Geschwindigkeit im H-Atom

Die Zentripetalkraft für die Kreisbewegung des Elektrons um das Proton ist die Coulombkraft, sodass die erste Gleichung $F_{ZP} = F_{\text{Coulomb}}$ lautet.

$$\frac{m_e \cdot v_n^2}{r_n} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_n^2}; \text{ Wir kürzen } r_n \text{ und erhalten } m_e \cdot v_n^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r_n}$$

Die zweite Gleichung ist $2 \cdot \pi \cdot m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot \hbar$

Wir lösen diese Gleichung nach r_n auf und setzen den Term in die erste Gleichung ein. Nach Umformen auf den Radius der n -ten Elektronenbahn erhalten wir

$$r_n = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2 \cdot n^2}{\pi \cdot e^2 \cdot m_e} = r_1 \cdot n^2 \quad \text{mit} \quad r_1 = \frac{\epsilon_0 \cdot h^2}{\pi \cdot e^2 \cdot m_e} \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

Die erlaubten Radien der Elektronenbahnen nehmen quadratisch mit der Quantenzahl n zu.

Rückeinsetzen liefert uns auch die Geschwindigkeit des Elektrons auf der n -ten Bahn.

$$v_n = \frac{e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot h \cdot n} = \frac{v_1}{n} \quad \text{mit} \quad v_1 = \frac{e^2}{2 \cdot \epsilon_0 \cdot h} \approx 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Erwartungsgemäß nimmt die Geschwindigkeit mit wachsender Entfernung vom Kern ab, weil die Coulombkraft mit $1/r^2$ abnimmt.

Radien und Geschwindigkeiten im bohrschen H-Atom

Die Radien nehmen quadratisch mit der Quantenzahl n (= Bahnindex) zu und die Geschwindigkeiten sind indirekt proportional zu n .

$$r_n = r_1 \cdot n^2 \quad \text{mit} \quad r_1 \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

$$v_n = \frac{v_1}{n} \quad \text{mit} \quad v_1 \approx 2,2 \cdot 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Bisher haben wir ein Elektron auf einer Bahn um den ruhenden Atomkern (das Proton) kreisen lassen. Nun stellen wir uns die Frage, was mit dem Elektron passiert, wenn wir dem H-Atom z. B. durch eine Laserstrahlung Energie zuführen. Mit anderen Worten: Unter welchen Bedingungen kann das Elektron die Bahn wechseln?

Zweites bohrsches Postulat

Die Elektronen der Atomhülle können von einer erlaubten Bahn (Index n_1) auf eine andere erlaubte Bahn (Index n_2) wechseln. Die **Energiedifferenz ΔE** wird als Strahlungsquant (Photon) absorbiert oder emittiert.

Die Frequenz des Strahlungsquants ergibt sich aus der Gleichung $h \cdot f = |\Delta E| = |E_{n_2} - E_{n_1}|$.

Um die Frequenz f des Photons, das den Bahnwechsel des Elektrons hervorruft bzw. ermöglicht, berechnen zu können, müssen wir die Energie des Elektrons auf der n -ten Bahn berechnen.

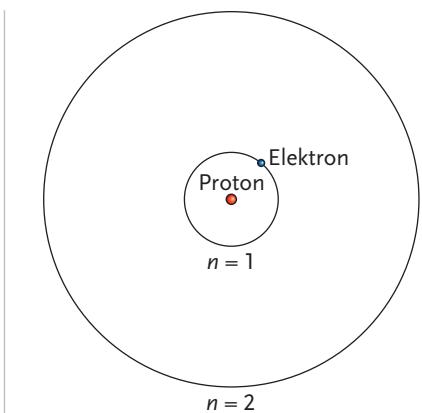
Beispiel 5.3.03: Energien im H-Atom

Wir schreiben die Formeln für die kinetische und die potenzielle Energie eines Elektrons im elektrischen Feld eines Protons auf der n -ten Bahn an.

$$E_{\text{kin}} = \frac{m_e \cdot v_n^2}{2} \quad E_{\text{pot}} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r_n}$$

Die negative potenzielle Energie bedeutet, dass sich das Proton und das Elektron mit der Coulombkraft anziehen. Man sagt, das Elektron ist an das Proton gebunden. Wenn wir die Geschwindigkeit und den Radius in Abhängigkeit von der Quantenzahl n einsetzen, ist auch die Gesamtenergie nur mehr von der Bahnquantenzahl n abhängig. Eine kurze Rechnung liefert

$$E_n = E_{\text{kin}} + E_{\text{pot}} = -\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0 \cdot h^2 \cdot n^2} = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{mit} \quad E_1 = -\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0 \cdot h^2} \approx -13,6 \text{ eV.}$$



Das **H-Atom-Modell** von Bohr: eingezeichnet sind die erste und die zweite erlaubte Elektronenbahn. Das Elektron befindet sich gerade auf der Bahn eins und hat dadurch die stärkste Bindung an das Proton. Das Elektron ist im Grundzustand.

Energie im bohrschen H-Atom

Die **Bindungsenergie** E_n eines Elektrons auf der Bahn mit der Quantenzahl n ist indirekt proportional zu n^2 .

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{mit} \quad E_1 \approx -13,6 \text{ eV}$$

Führt man einem Elektron (auf der ersten Bahn) im H-Atom 13,6 eV zu, so ist das Elektron nicht mehr an das Proton gebunden; das H-Atom ist positiv ionisiert.

Mit der Formel $E = h \cdot f$ können wir mit der Bindungsenergie $\frac{E_1}{n^2}$ die Frequenz f berechnen.

Spektrallinien im bohrschen H-Atom

Die **Frequenz** f eines Strahlungsquants (Photons) beträgt für die Bahnen mit den Quantenzahlen n_1 und n_2

$$f = \frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0 \cdot h^3} \cdot \left| \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right|.$$

Diese Formel hatten **Johann Jakob Balmer** und **Johannes Robert Rydberg** bereits auf experimentellem Wege gefunden, wobei Rydberg mit $c = \lambda \cdot f$ noch auf die inverse Wellenlänge umformte.

Niels Bohr konnte nun die Rydbergkonstante aus der Elektronenmasse, der Elektronenladung, der Dielektrizitätskonstante des Vakuums, der Vakuumlichtgeschwindigkeit und dem planckschen Wirkungsquantum ableiten. Die Übereinstimmung mit dem Messwert war beeindruckend und der galileische Wahlspruch „Messen, was messbar ist, und messbar machen, was noch nicht messbar ist.“ erneut bestätigt.

Beispiel 5.3.04: Die Rydbergkonstante im bohrschen H-Atom

Der Messwert für die **Rydbergkonstante** R beträgt $10\,973\,731,568\,539 \text{ m}^{-1}$. Setzen wir in den bohrschen Ausdruck $\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c_0}$ die Konstanten ein, so erhalten wir $10,969 \cdot 10^6 \text{ 1/m}$, was einer prozentuellen Abweichung von rund 0,4 Promille entspricht.

$1 \text{ eV} = 1 \text{ e} \cdot 1 \text{ V};$
 $1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Erste bohrsche Energie
 $E_1 \approx -13,6 \text{ eV}$

Durch die Übereinstimmung mit der experimentell ermittelten Ionisierungsenergie von Wasserstoff, das ist jene Energie, mit der dem Wasserstoff das Elektron entrissen werden kann, wurde das bohrsche Atommodell bestätigt.

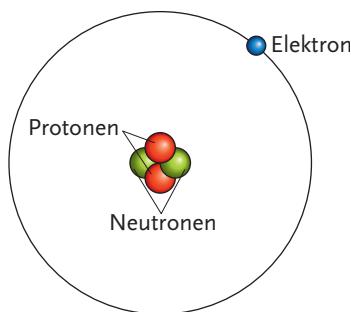


JOHANN JAKOB BALMER, 1828 BIS 1898, SCHWEIZER MATHEMATIKER

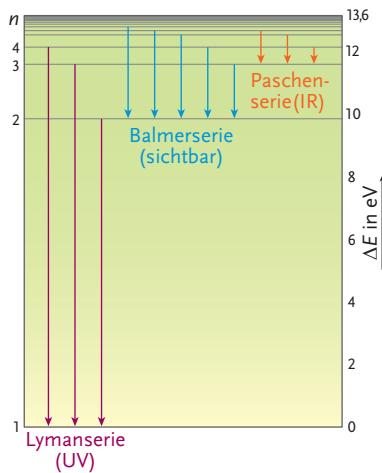
Zu Ehren von **Rydberg** wird die Konstante $\frac{m_e \cdot e^4}{8 \cdot \epsilon_0^2 \cdot h^3 \cdot c_0}$ als Rydbergkonstante R bezeichnet.



JOHANNES ROBERT RYDBERG,
1854 BIS 1919, SCHWEDISCHER
PHYSIKER



Zu den Aufgaben 5.3.05 und 5.3.06: Planetenmodell des einfach positiv ionisierten He-Atoms



Skizze zu Aufgabe 5.3.06: Energieniveauschema von Wasserstoff im bohrschen Atommodell

Wir fassen die vielen Erkenntnisse über das Wasserstoffatom gemäß dem Atommodell von Niels Bohr zusammen.

Bohrsches Atommodell des Wasserstoffs

Das Elektron kann sich mit der Geschwindigkeit v_n nur auf stabilen Kreisbahnen mit dem Radius r_n um das ruhend angenommene Proton bewegen, wenn der Drehimpuls des Elektrons die Quantenbedingung $L_n = m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot h / (2\pi)$ erfüllt.

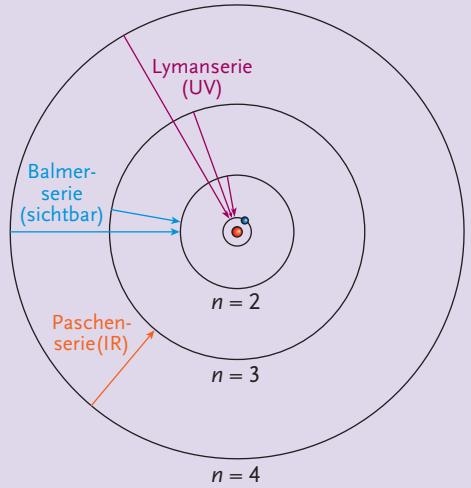
$$E_n \approx -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2},$$

$$v_n \approx \frac{2,2 \cdot 10^6}{n} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}},$$

$$r_n \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot n^2$$

Bei einem Bahnwechsel des Elektrons tritt ein Photon mit der Frequenz

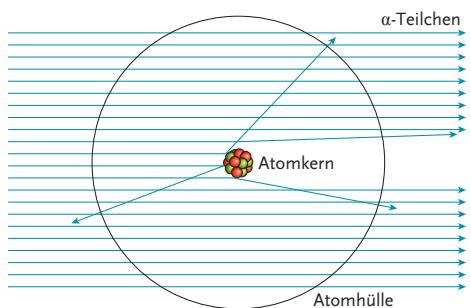
$$f = 3,3 \cdot 10^{15} \cdot \left| \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right| \cdot \text{Hz}$$



Ziele erreicht? – „Das bohrsche Atommodell“

5.3.01 Geben Sie mindestens vier **Atommodelle** an.

5.3.02 Beschreiben Sie den **Streuversuch von Rutherford** und argumentieren Sie seine Schlussfolgerungen. Beachten Sie, dass die nebenstehende Skizze nur als Hilfe gedacht ist. Sie gibt das von Rutherford ermittelte Verhältnis von Kern- zu Atomradius mit rund 1 : 105 nicht korrekt wieder.



5.3.03 Beschreiben Sie das **bohrsche Atommodell** qualitativ und quantitativ.

5.3.04 Berechnen Sie die Frequenzen und Wellenlängen der ersten fünf Spektrallinien der **Balmerserie** des H-Atoms. Die Balmerserie ergibt sich beim Zurückspringen eines Elektrons von einer höheren Umlaufbahn auf die zweite erlaubte Bahn um das Proton.

5.3.05 Für ein einfach positiv ionisiertes **He-Atom** gilt die Energiebeziehung $E_n = -54,4 \text{ eV}/n^2$. Berechnen Sie die fünf Spektrallinien dieses He-Atoms mit den größten Frequenzen.

5.3.06 Leiten Sie die **Energiebeziehung** für ein einfach positiv **ionisiertes He-Atom** in Analogie zum bohrschen Atommodell des H-Atoms ab. Berechnen Sie dazu die Geschwindigkeit und den Radius des verbliebenen Elektrons auf seiner Kreisbahn um den He-Kern in Abhängigkeit von der Bahnquantenzahl n . Stellen Sie das **Energieniveauschema** analog zur Abbildung in der Randspalte dar.

5.3.2 Das Atommodell von Bohr und Sommerfeld und das Pauliprinzip

Um die Vielfalt der Atomspektren erklären zu können, musste das sehr einfache bohrsche Atommodell, das nur eine Quantenzahl n – die Haupt- oder Energiequantenzahl – verwendet, erweitert werden. Damit konnten die experimentellen Befunde für einige Elemente mit höherer Ordnungszahl noch zufriedenstellend erklärt werden. Eine radikale Abkehr von klassischen Vorstellungen war aber unumgänglich, um der Komplexität der Atome gerecht zu werden.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- das **Bohr-Sommerfeld-Atommodell** beschreiben;
- die **Quantenzahlen n , l , m und s** qualitativ und quantitativ beschreiben;
- die **Elektronenkonfiguration** mit den vier Quantenzahlen für bestimmte Elemente des Periodensystems der Elemente angeben und die maximalen Quantenzahlkombinationen begründen.

Arnold Sommerfeld erweiterte 1915 das bohrsche Atommodell um **drei Quantenzahlen**, um ein anschauliches Modell für weitere Elemente des Periodensystems zu erhalten. Wie bei Rutherford sind bei Sommerfeld wieder Ellipsenbahnen möglich. Zur Unterscheidung von **Ellipsen** mit gleich großer Halbachse a führte Sommerfeld die **Nebenquantenzahl l** ein. Der Buchstabe l wurde wegen des damit unterschiedlichen Drehimpulses des Elektrons auf der Ellipsenbahn gewählt. Die Orientierung der Bahn wird durch die **Orientierungs- oder Magnetquantenzahl m** beschrieben. Um weitere Details in den gemessenen Linienspektren der Atome unterscheiden zu können, wurde die **Spinquantenzahl s** eingeführt.

Das Atommodell von Bohr und Sommerfeld

Die Elektronen werden durch die **vier Quantenzahlen n , l , m und s** beschrieben.

- Die **Haupt- oder Energiequantenzahl n** kann alle natürlichen Zahlen größer als oder gleich 1 annehmen.
 $n = 1, 2 \dots$
- Die **Neben- oder Drehimpulsquantenzahl l** kann alle natürlichen Zahlen größer als oder gleich 0 und kleiner als oder gleich $n - 1$ annehmen.
 $l = 0, 1, 2 \dots n - 1$
- Die **Orientierungs- oder Magnetquantenzahl m** kann alle ganzen Zahlen größer als oder gleich $-l$ und kleiner als oder gleich l annehmen.
 $m = -l, -l + 1, -l + 2 \dots -1, 0, 1, \dots l - 2, l - 1, l$
- Die **Spinquantenzahl s** kann entweder den Wert $+\frac{1}{2}$ oder $-\frac{1}{2}$ annehmen.
 $s = +\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$

Alle klassischen Rettungsversuche der Atommodelle konnten den Siegeszug der Quantenmechanik nicht aufhalten. Victor de Broglie schrieb dazu den Elektronen Welleneigenschaften zu.

Die stehenden Elektronenwellen von de Broglie

Die erlaubten Elektronenbahnen ergeben sich durch stehende Wellen, weil sich sonst die den Elektronen zugeordneten Wellen bei den zahlreichen Umläufen in einer bestimmten Zeit durch destruktive Interferenz selbst auslöschen würden.



ARNOLD SOMMERFELD, 1868 BIS 1951, DEUTSCHER PHYSIKER

Eine **Ellipse** (in erster Hauptlage) hat eine große Halbachse a und eine kleine Halbachse b mit $a \geq b$. Für den Grenzfall eines Kreises ist $a = b = r$.

Die Kreisformel $x^2 + y^2 = r^2$ für einen Kreis in Mittelpunktslage entspricht der Formel

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

für eine Ellipse in Mittelpunktslage.



Der Spin ist eine quantenmechanische Größe und hat keine klassische Entsprechung. Für ein Elektron gibt es die beiden Spinwerte $+\frac{1}{2}$ und $-\frac{1}{2}$. Die Deutung als Eigendrehimpuls greift zu kurz.

| Quan-tenzahl | Bezeichnung |
|--------------|---------------------------------------|
| n | Haupt- oder Energiequantenzahl |
| l | Neben- oder Drehimpulsquantenzahl |
| m | Orientierungs- oder Magnetquantenzahl |
| s | Spinquantenzahl |

Die Quantenzahlen im Bohr-Sommerfeld-Modell

| Quantenzahl | Werte |
|-------------|---------------------------------------|
| n | 1, 2, 3 ... |
| l | 0, 1 ..., $n - 1$ |
| m | $-l, -l + 1 \dots, 0 \dots, l - 1, l$ |
| s | $-\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$ |

Werte der Quantenzahlen im Bohr-Sommerfeld-Modell



Wirkung = Energie mal Zeit
und Wirkung = Impuls mal Wellenlänge.

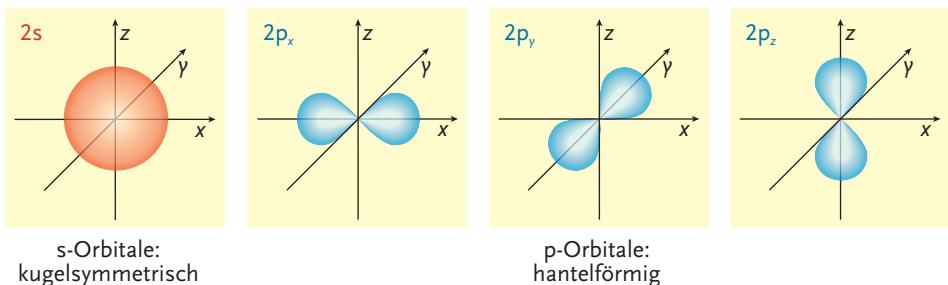
Die Quantenbedingung lautet daher $2 \cdot \pi \cdot r_n = n \cdot \lambda$.

Ersetzen wir die Wellenlänge λ durch $h/(m_e \cdot v_n)$, erhalten wir das erste bohrsche Postulat.

Die räumliche Struktur der Atome ist durch die stehenden Wellen von de Broglie noch nicht erreicht. Dazu muss man die Elektronenwellen als dreidimensionale Schwingungszustände auffassen. Das leistet die **Schrödinger-Gleichung**. Die Knotenpunkte der stehenden zweidimensionalen Wellen entsprechen dann Knotenflächen der dreidimensionalen stehenden Wellen. Diese Raumgebiete heißen Orbitale.

Orbitale

Orbitale sind räumliche Aufenthaltsbereiche für die Elektronen um den Atomkern. Sie sind nicht scharf abgegrenzt. Ein Orbital legt die Energie des Elektrons fest. Orbitale werden nach steigender Energie der Reihe nach besetzt.



WOLFGANG PAULI, 1900 BIS 1958,
ÖSTERREICHISCHER PHYSIKER,
NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1945

Ein **Elektron** wird durch die vier Quantenzahlen $|n, l, m, s\rangle$ im Atommodell von Bohr und Sommerfeld eindeutig beschrieben.

Die Elektronenschalen mit den Energiequantenzahlen $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ sind aufsteigend mit den Buchstaben K, L, M, N ... bezeichnet.

Das Pauliprinzip

Jedes Atomorbital kann **höchstens zwei Elektronen** aufnehmen, die sich in ihrer Spinquantenzahl unterscheiden müssen.

Beispiel 5.3.05: Elektronenkonfiguration für Helium und Lithium

Helium hat die Ordnungszahl zwei und damit im neutralen Zustand zwei Elektronen, die nach dem **Pauliprinzip** durch die Quantenzahlen n, l, m und s , zusammengefasst zu $|n, l, m, s\rangle = |1, 0, 0, \frac{1}{2}\rangle$ sowie $|1, 0, 0, -\frac{1}{2}\rangle$, beschrieben werden. **Lithium** hat im elektrisch neutralen Zustand um ein **Elektron** mehr als Helium. Die drei Elektronen haben daher im Grundzustand (Zustand der geringsten Energie) des Atoms entweder die drei Quantenzahlenquadrupel $|1, 0, 0, \frac{1}{2}\rangle$, $|1, 0, 0, -\frac{1}{2}\rangle$ und $|2, 0, 0, -\frac{1}{2}\rangle$ oder $|2, 0, 0, \frac{1}{2}\rangle$, $|1, 0, 0, -\frac{1}{2}\rangle$ und $|2, 0, 0, \frac{1}{2}\rangle$.



Ziele erreicht? – „Das Atommodell von Bohr und ...“

5.3.07 Beschreiben Sie das Atommodell von **Bohr und Sommerfeld**.

5.3.08 Geben Sie die vier Quantenzahlen für das Atommodell von **Bohr und Sommerfeld** an und erklären Sie ihre Bedeutung.

5.3.09 Schreiben Sie die Quantenzahlkombinationen für die sieben Elektronen von neutralem **Stickstoff** gemäß dem Pauliprinzip an, wenn Sie mit den kleinsten möglichen Quantenzahlen beginnen.

- 5.3.10** Begründen Sie die **maximale Elektronenzahl** n^2 in der n -ten Schale eines Atoms nach dem Pauliprinzip und schreiben Sie alle Kombinationen für die K-, L-, M- und N-Schale an.

| Wert von l | Buchstabe |
|--------------|-----------|
| 0 | s |
| 1 | p |
| 2 | d |
| 3 | f |

Buchstaben für die Werte der Neben- oder Drehimpulsquantenzahl l

5.3.3 Kernphysik

Die Reaktorkatastrophen von Fukushima im Jahr 2011 und von Tschernobyl im Jahr 1985 haben die Kernkraftbefürworter nur kurz in ihrem Engagement gebremst. Die USA planen wie andere Staaten einen weiteren Ausbau. Eine Umfrage im Jahr 2012 ergab in den Vereinigten Staaten von Amerika eine 60%ige Zustimmung zum extensiven Ausbau der Kernenergie.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die wichtigsten Kenngrößen von **Atomkernen** qualitativ beschreiben;
- die Größe und Dichte von **Atomkernen** quantitativ erfassen;
- die **Kerndichte** ableiten.

Die Streuversuche von Ernest Rutherford und anderen belegten übereinstimmend, dass die **Ladung der Atomkerne** ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung e beträgt. Die Kernladungszahl ist identisch mit der Ordnungszahl Z des chemischen Elements im Periodensystem. Die Streuexperimente ergaben auch eine **Größenabschätzung** für die Atomkerne. Die **Kernmassen** stimmten recht gut mit den aus der Chemie bekannten Atommassen überein. Die endgültige Klärung lieferte aber James Chadwick mit der **Entdeckung des Neutrons** 1932.

Kernladung, Kernmasse und Kerngröße

Der Atomkern eines chemischen Elements mit der Ordnungszahl Z besteht aus Z Protonen und N Neutronen.

- $Z + N = A$ heißt **Massenzahl** und gibt die Anzahl der Kernbestandteile = Nukleonen an.
- Die **Kernmasse** berechnet sich näherungsweise als $m_{\text{Kern}} \approx A \cdot u$.
- Der **Kernradius** ergibt sich näherungsweise als $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot A^{1/3}$. Dabei bezeichnet r_H den Kernradius des H-Atoms mit $r_H \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$.

Beispiel 5.3.06: Kernradien für spezielle Isotope

Wir berechnen die Kernradien für ausgewählte Elemente des Periodensystems der Elemente, um ein Gefühl für die in der Natur auftretenden Atomkernradien zu erhalten.

Für das Borisotop mit der Massenzahl 8 gilt: $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot 8^{1/3} = 2 \cdot r_H$.

Für das Magnesiumisotop mit der Massenzahl 27 gilt: $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot 27^{1/3} = 3 \cdot r_H$.

Für das Zinkisotop mit der Massenzahl 64 gilt: $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot 64^{1/3} = 4 \cdot r_H$.

Für das Tellurisotop mit der Massenzahl 125 gilt: $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot 125^{1/3} = 5 \cdot r_H$.

Für das Radonisotop mit der Massenzahl 216 gilt: $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot 216^{1/3} = 6 \cdot r_H$.

Somit gilt: die Atomkerne der größten bekannten Atome haben nicht mehr als den rund sechsfachen Wasserstoffkernradius.



Elementarladung

$$e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

Ladung des Elektrons = $-e$

Ladung des Protons = $+e$



Wie sicher ein Kernkraftwerk (auch als Atomkraftwerk, AKW, bezeichnet) ist, soll in der Europäischen Union auch mittels sogenannter Stresstests überprüft werden. Die im Oktober 2012 veröffentlichten Ergebnisse zeigen Mängel bei allen überprüften europäischen AKWs. Die AKWs in den Nachbarländern Österreichs haben besonders schlecht abgeschnitten.



JAMES CHADWICK, 1891 BIS 1974,
ENGLISCHER PHYSIKER, NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1935 FÜR DIE
ENTDECKUNG DES NEUTRONS



Massen der Nukleonen
 $m_p \approx 1,673 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 $m_n \approx 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
 $m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$



Atomare Masseneinheit
 $1 \text{ u} \approx 1,6605402 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$



Masse des Elektrons in Units
 $m_e \approx 0,000\,548\,58 \text{ u}$

| Nukleon | Masse |
|-----------|-------------|
| Proton p | 1,007 276 u |
| Neutron n | 1,008 665 u |

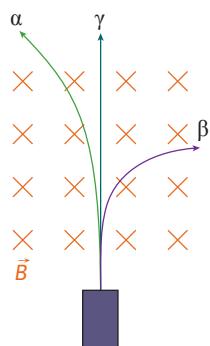
Das Neutron hat eine um rund 0,14 % größere Masse als das Proton.

Diagnose: griechisch für Unterscheidung, Entscheidung.

Therapeia: griechisch für das Dienen, die Bedienung, die Dienstleistung, die Pflege der Kranken.



Am späten Freitagabend des 8. November 1895 beobachtete Wilhelm Conrad Röntgen, erstmals Röntgenstrahlung als – wie er es selbst beschrieb – „sich keine dienstbaren Geister mehr im Hause befanden“.



Strahlungsquelle

Durch das Magnetfeld werden natürliche radioaktive Strahlen getrennt:

- α-Strahlen werden in diesem Fall nach links und
- β-Strahlen nach rechts abgelenkt, während die
- γ-Strahlen nicht abgelenkt werden.

Weil wir nun sowohl die Kernmassen als auch die Kerndurchmesser näherungsweise in Abhängigkeit von der Massenzahl A angeben können, ist auch die Kerndichte berechenbar.

Kerndichte

Die Dichte von Atomkernen ist für das gesamte Periodensystem der Elemente relativ gleich und beträgt $1,4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$.



Ziele erreicht? – „Kernphysik“

- 5.3.11** Geben Sie die Näherungsformeln für die **Atomkernmasse** und den **Atomkernradius** an. Beschreiben Sie, wie stark diese Größen in der Natur variieren.
- 5.3.12** Ermitteln Sie die ungefähre Masse eines gedachten Stecknadelkopfes, der nur aus **Nukleonen** besteht.
- 5.3.13** Berechnen Sie die **Atomkernmasse** und den **Atomkernradius** für das Kohlenstoffisotop, das zur Altersbestimmung verwendet wird.
- 5.3.14** Ermitteln Sie den Radius einer **Kugel aus Nukleonen**, die die Masse der Erde besäße. Führen Sie zuvor eine nachvollziehbare Schätzung durch.
- 5.3.15** Leiten Sie die **mittlere Kerndichte** ab und begründen Sie, warum sie von der Massenzahl beinahe unabhängig ist.

5.3.4 Radioaktivität

Die Bedeutung der Kernenergie für die weltweite Energieversorgung haben wir bereits beschrieben. Zwischen- undendlager für radioaktive Abfälle sind jährlich durch spektakuläre Transporte in diese Lager in den Medien. In der modernen Medizin sind Radionuklide sowohl für die Diagnose als auch für die Therapie unersetzlich. Historisch betrachtet, trug die Röntgenstrahlung, die **Conrad Wilhelm Röntgen** im Jahr 1895 entdeckte, zur positiven Einstellung der Bevölkerung zur Technisierung der Medizin entscheidend bei.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **drei natürlichen Strahlenarten** angeben und beschreiben;
- den α- und β-Zerfall quantitativ beschreiben und in **Nuklidkarten** grafisch darstellen;
- das **Zerfallsgesetz** ableiten und anwenden.

Die **Radioaktivität** wurde durch **Antoine Henri Becquerel** im Jahr 1896 und die starken radioaktiven **Strahlungsquellen Polonium und Radium** wurden durch **Marie und Pierre Curie** 1898 entdeckt. Die **drei natürlichen Strahlenarten (α-, β- und γ-Strahlen)** werden durch ihre Ablenkbartigkeit in elektrischen und magnetischen Feldern und anhand ihres Durchdringungsvermögens unterschieden.

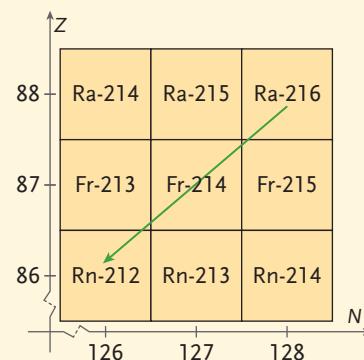
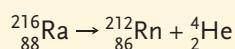
α- und β-Strahlen werden in einem Magnetfeld abgelenkt, sodass es sich um geladene Teilchen handeln muss. Weil diese geladenen Teilchen aus dem Atomkern kommen, findet bei einem Alpha- und Betazerfall eine **Elementumwandlung** statt.

Alpha-, Beta- und Gammateilchen

- **α -Teilchen** sind **Heliumkerne**, also zwei Protonen und zwei Neutronen, die aneinander gebunden sind. Die kinetische Energie von α -Teilchen beträgt einige MeV. Sie werden bereits von Papier, dünnen Folien und den obersten Hautschichten absorbiert.
- **β -Teilchen** sind **sehr schnelle Elektronen aus dem Atomkern**. Dabei wird im Atomkern ein Neutron in ein Proton, das im Kern verbleibt, und ein Elektron, das emittiert wird, umgewandelt. Die Geschwindigkeit kann bis zu 99 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit betragen. Die Geschwindigkeitsverteilung ist aber im Gegensatz zu den α -Teilchen nicht scharf abgetrennt. β -Teilchen haben viel größere Reichweiten als α -Teilchen und werden von dünneren Metallblechen absorbiert.
- **γ -Teilchen** sind **elektromagnetische Wellen** mit Wellenlängen zwischen 10^{-13} m und 10^{-10} m, also harte Röntgenstrahlen. γ -Strahlung ist die durchdringendste Strahlenart. Nur mehrere Zentimeter dicke Metallplatten schwächen sie merklich ab. γ -Strahlen begleiten stets einen α - oder β -Zerfall.

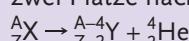
Beispiel 5.3.07: Alphazerfall von Radium

Ein Radiumkern zerfällt unter Aussendung eines Heliumkerns in einen Radonkern. Die Halbwertszeit von Radium-216 beträgt nur rund 182 Nanosekunden.



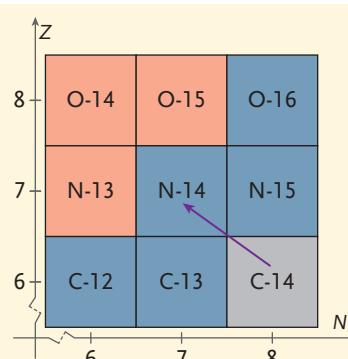
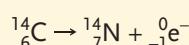
Alphazerfall

Durch Aussendung eines α -Teilchens nimmt die Ordnungszahl um zwei und die Massenzahl um vier ab. In der **Nuklidkarte** kommt es zu einer Verschiebung um zwei Plätze nach links und zwei Plätze nach unten.



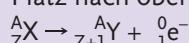
Beispiel 5.3.08: Betazerfall von Kohlenstoff C-14

Kohlenstoff C-14 wird bei der Radiokarbonmethode zur Altersbestimmung benutzt. Unter Abgabe eines Betaminusteilchens, also eines Elektrons, wandelt er sich in Stickstoff um.



Betazerfall

Durch Aussendung eines β -Teilchens nimmt die Ordnungszahl um eins zu und die Neutronenzahl um eins ab, sodass die Massenzahl konstant bleibt. In der Nuklidkarte kommt es zu einer Verschiebung um einen Platz nach links und einen Platz nach oben.



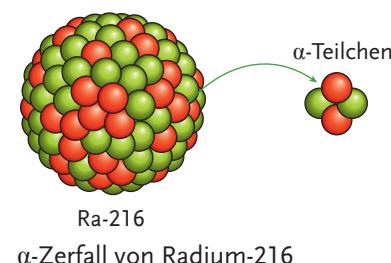
Geladene Teilchen erfahren in einem Magnetfeld die Lorentzkraft.

$$\vec{F}_{\text{Lorentz}} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$



Durch die Entdeckung der Elementumwandlung beim radioaktiven Zerfall durch Ernest Rutherford und Frederick Soddy im Jahr 1900 war auch die Vorstellung von der Unveränderlichkeit der Atome widerlegt.

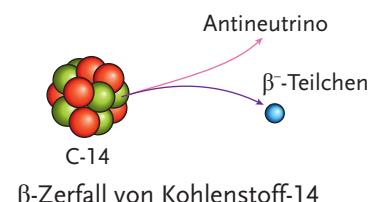
Frederick Soddy, 1877 bis 1956, erhielt 1921 den Nobelpreis für Chemie.



α -Zerfall von Radium-216



In einer **Nuklidkarte** sind die Elemente des PSE mit ihren Isotopen nach steigendem Z und N dargestellt.



β -Zerfall von Kohlenstoff-14



Siehe Kap. C, 6.



Die bisherigen Protagonisten (Haupt- oder Erst-Handelnde) dieses Kapitels 5.3.4 erhielten alle den Nobelpreis. Beispielsweise Conrad Röntgen 1901 (als erster), Henri Becquerel, Marie und Pierre Curie im Jahr 1903.

 Zu Neutrinos siehe
Kap. D, 5.5.

Halbwertszeit τ , $N(\tau) = N_0/2$

| Isotop | Halbwertszeit τ |
|------------------|------------------------|
| Sauerstoff O-15 | 124 s |
| Radon Rn-222 | 3,83 d |
| Jod I-131 | 8,05 d |
| Kobalt Co-60 | 5,26 a |
| Cäsium Cs-137 | 30 a |
| Radium Ra-226 | 1 601 a |
| Kohlenstoff C-14 | 5 730 a |
| Plutonium Pu-244 | $8,0 \cdot 10^7$ a |
| Uran U-235 | $7,1 \cdot 10^8$ a |
| Uran U-238 | $4,5 \cdot 10^9$ a |
| Thorium Th-232 | $1,41 \cdot 10^{10}$ a |

Halbwertszeiten ausgewählter Isotope

Das beim Betazerfall ebenfalls emittierte Antineutrino ist für die Darstellung in einer Nuklidkarte ohne Bedeutung. Das Neutrino als Vertreter einer neuen Teilchenart (ungeladenes Lepton) wurde 1930 von Wolfgang Pauli postuliert und erst 1956 experimentell nachgewiesen.

Das Zerfallsgesetz

$N(t)$ ist die Anzahl der radioaktiven Atomkerne zur Zeit t . Es gilt

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

λ ist die materialabhängige **Zerfallskonstante**.

Für die **Halbwertszeit** τ und die **Zerfallskonstante** λ gilt: $\lambda = \ln(2)/\tau$.

Beispiel 5.3.09: Das Zerfallsgesetz für Uran U-238

Wir berechnen, wie viele Kerne pro Sekunde in einem Kilogramm U-238 zerfallen.

Der Tabelle in der Randspalte entnehmen wir $\tau = 4,5 \cdot 10^9$ a.

Damit ist die Zerfallskonstante $\lambda = \ln(2)/\tau \approx 1,5 \cdot 10^{-10} 1/a \approx 4,75 \cdot 10^{-18} 1/s$.

Die Anzahl der zu Beginn vorhandenen Kerne erhalten wir mithilfe der molaren Masse und der Avogadrokonstante.

$$N_0 = m \cdot N_A / m_{\text{mol}} \approx 1 \text{ 000 g} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} / 238 \text{ g} \approx 2,53 \cdot 10^{24}$$

Die Anzahl der zerfallenden Kerne pro Sekunde ist der Betrag der Zerfalls geschwindigkeit, also $\left| -\frac{dN(t)}{dt} \right|$.

Wegen der Exponentialregel und der Kettenregel für das Differenzieren gilt

$$\left| -\frac{dN(t)}{dt} \right| = \lambda \cdot N(t) = 4,75 \cdot 10^{-18} /s \cdot 2,53 \cdot 10^{24} = 1,23 \cdot 10^7 /s.$$

Pro Sekunde zerfallen also rund 12,3 Millionen Uran-238-Kerne. Es entstehen ebenso viele Thorium-234-Kerne. Diese zerfallen durch Emission eines β -Teilchens wiederum in Palladium-234-Kerne. Diese Uran-Radium-Zerfallsreihe endet beim stabilen Blei-206.

Die Zahl der pro Sekunde zerfallenden Kerne heißt Aktivität.

Die radiologische Aktivität

Für ein radioaktives Präparat ist die radiologische **Aktivität**

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

Daher gilt

$$A(t) = \lambda \cdot N(t). \text{ Einheit der Aktivität } [A] = 1/s = 1 \text{ Becquerel (1 Bq)}$$



Ziele erreicht? – „Radioaktivität“

5.3.16 Geben Sie die drei natürlichen **Strahlenarten** an. Wie kann man sie unterscheiden?

5.3.17 Berechnen Sie, wie viel Prozent der Ausgangsmenge von Jod I-131, Cäsium Cs-137, Radium Ra-226, Kohlenstoff C-14 und Uran U-238 nach a) zehn Tagen, b) einem Jahr, c) 100 Jahren und d) 1 000 Jahren noch vorhanden sind. Skizzieren Sie die zugehörigen **Zerfallskurven**, d. h., stellen Sie $N(t)$ grafisch dar.

 Die Avogadrokonstante N_A gibt die Anzahl der Teilchen pro Mol an, $N_A \approx 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

- 5.3.18** Verifizieren Sie den oben festgestellten Zusammenhang zwischen **Halbwertszeit** und Zerfallskonstante. Geben Sie das Zerfallsgesetz auch in der Form $N(t) = N_0 \cdot a^t$ und $N(t) = N_0 \cdot 2^{t/b}$ an.
- 5.3.19** Recherchieren Sie über **radioaktive Abfälle in Österreich**. Als Anregung dienen der medizinische Bereich, die Industrie und das AIT in Seibersdorf.
- 5.3.20** Leiten Sie das **Zerfallsgesetz** ab. Gehen Sie davon aus, dass die momentane Änderungsrate der Atomkernanzahl direkt proportional zur momentanen Anzahl der radioaktiven Kerne ist.



Zur Aufgabe 5.3.19: Im Jahre 1956 wurde die Österreichische Studiengesellschaft zur friedlichen Nutzung der Atomenergie gegründet, die in Seibersdorf (südöstlich von Wien) das Österreichische Reaktorzentrums Seibersdorf errichtete. Der für radioaktive Abfälle zuständige Bereich nennt sich jetzt Nuclear Engineering Seibersdorf.

5.3.5 Kernspaltung und Kernfusion

Während mithilfe der **Kernspaltung** seit Jahrzehnten die rasch wachsende Energieversorgung vieler Staaten bewältigt wird, hatten die jahrzehntelangen Bemühungen, die **Kernfusion** auch zur kommerziellen Energieversorgung heranzuziehen, bisher keinen Erfolg. In Europa sind bereits mehrere unterschiedliche Fusionsreaktoren im Forschungsbetrieb, aber ein Durchbruch scheint noch in weiter Ferne. Die Sonne zeigt, dass Kernfusion eine Erfolgsstory sein kann. Im südfranzösischen Forschungszentrum Cadarache wird der internationale Fusionsreaktor ITER errichtet. Um das Jahr 2050 soll ITER mehr Energie liefern, als für die Heizung des Plasmas aufgebracht werden muss.



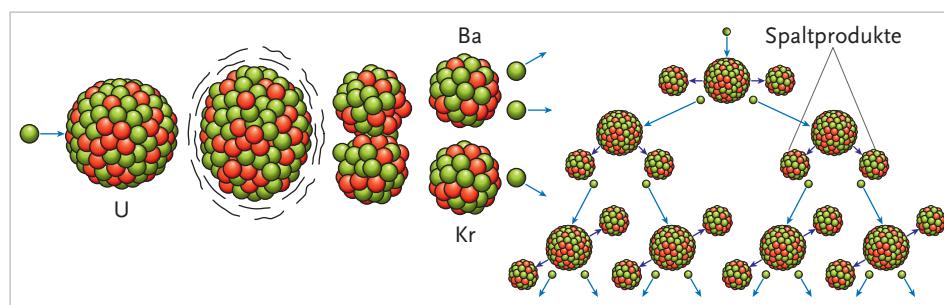
Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Kernspaltung** und die **Kernfusion** beschreiben;
- eine typische Kernspaltung als Reaktionsgleichung anschreiben und die **kritische Masse** erklären;
- typische **Reaktortypen** unterscheiden.

Otto Hahn und sein Assistent **Fritz Straßmann** entdeckten am 17. Dezember 1938 die **induzierte Kernspaltung**. **Lise Meitner** und **Otto Frisch** lieferten im Jänner 1939 die erste theoretische Erklärung dafür.

Wir können uns die induzierte Kernspaltung **modellhaft** folgendermaßen vorstellen: Das in den Atomkern eindringende **Neutron** verformt den Kern und versetzt ihn in Schwingungen. Bildet sich dabei eine Einschnürung, stoßen sich die räumlich getrennten Ladungsschwerpunkte ab und die beiden Spaltprodukte fliegen mit hoher Energie auseinander. Dabei können wieder Neutronen emittiert werden, die – wenn ihre Energie nicht zu hoch ist – wiederum weitere Spaltungen induzieren können (Kettenreaktion).



LISE MEITNER, 1878 BIS 1968,
ÖSTERREICHISCH-SCHWEDEISCHE
KERNPHYSIKERIN



Coulombkraft zwischen zwei Punktladungen q_1 und q_2 im Abstand r .

$$F_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

Für immer kleinere Abstände r zwischen zwei Protonen wächst die abstoßende Coulombkraft über alle Grenzen. Das wird uns bei der Fusion noch beschäftigen.



Einige Elemente des Periodensystems mit mehr als 90 Protonen: Protactinium Pa, Uran U, Neptunium Np, Plutonium Pu, Americium Am, Curium Cm, Berkelium Bk, Californium Cf, Einsteinium Es, Fermium Fm; ab Neptunium spricht man von **Transuranen**.



Otto Hahn und Fritz Straßmann entdeckten die Kernspaltung bei der Untersuchung von Transuranen.

Kernspaltung

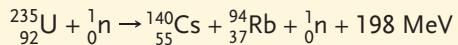
Atomkerne mit mehr als 90 Protonen sind wegen der **Coulombabstoßung** der Protonen **nicht stabil**. Sie zerfallen meist unter Aussendung eines Alphateilchens und reduzieren so ihre Protonen- und Massenzahl.

Wird ein Kern mit einem energiereichen Teilchen (z. B. einem Neutron) beschossen, kann eine Spaltung eingeleitet (induziert) werden.

Bei einer Kernspaltung wird sehr viel Energie freigesetzt.

Beispiel 5.3.10: Induzierte Spaltung von U-235

Wird Uran-235 durch ein Neutron in Cs-140 und Rubidium-94 gespalten, so werden ein Neutron und eine Energie von rund 200 MeV frei.



Zur Reaktordynamik finden Sie zahlreiche faszinierende Details in Lehrbüchern (und Atlanten) zur Atom- und Kernphysik.



Die kritische Masse von radioaktivem spaltbarem Material wird auch in Medien und sogar in Agentenfilmen thematisiert.



Neutronen bewegen sich nach der Emission bei einer Kernspaltung mit rund 3 % der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Durch **Moderatoren** werden sie auf eine Geschwindigkeit von rund 2 000 m/s abgebremst. Man spricht dann von **thermischen Neutronen**. Thermische Neutronen rufen mit großer Wahrscheinlichkeit eine Kernspaltung hervor.



Thermische Neutronen haben eine Energie von rund 25 meV. Diese Energie ergibt sich in der Thermodynamik bei Raumtemperatur mit der Formel $E = N \cdot k \cdot T/2$.

Dabei bezeichnet N die Anzahl der Freiheitsgrade, k die Boltzmannkonstante und T die absolute Temperatur (Temperatur in Kelvin).

Damit eine Kernspaltung zu einer kontrollierbaren Kettenreaktion führt,

- muss mindestens die **kritische Masse** an spaltbarem Material vorhanden sein
- und die Zahl der eine Spaltung herbeiführenden **Neutronen** muss konstant gehalten werden. Der Vermehrungsfaktor k muss 1 sein.

Der Vermehrungsfaktor k wird durch die Wahrscheinlichkeiten der vier häufigsten **Prozesse von Neutronen** im Reaktor bestimmt.

- Einfang des Neutrons im Brennstoff mit anschließender Spaltung und Freisetzung neuer Neutronen,
- Einfang des Neutrons im Brennstoff ohne anschließender Spaltung,
- Einfang des Neutrons in anderen Materialien des Reaktors und
- Entweichen des Neutrons aus dem Reaktor.

Beispiel 5.3.11: Kritische Masse von U-235

Damit bei Uran-235 eine Kettenreaktion von Kernspaltungen ablaufen kann, muss eine Masse von mindestens 50 kg vorhanden sein.

Mit einer Dichte von rund 19,1 kg/dm³ ergibt sich ein Kugelradius von rund 8,5 cm für die kritische Masse von U-235.

Zur Kontrolle einer Kernspaltungskettenreaktion verwendet man einerseits **Absorber** wie Bor oder Cadmium. Diese absorbieren Neutronen sehr stark, sodass die Anzahl der zu Kernspaltungen beitragenden Neutronen gesteuert werden kann. Andererseits helfen bei einer Kettenreaktion die **Selbstregulierung** durch den Temperaturverlauf und die **Verlangsamung** der Kettenreaktion durch verzögerte Neutronen. Diese werden erst Sekunden bis Minuten nach der eigentlichen Spaltung frei. Die Dauer einer Spaltung hat hingegen eine Größenordnung von 0,1 µs.

Typisches Spaltmaterial

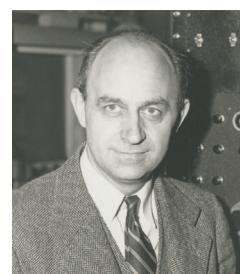
- Bei **Natururan** (U-238 mit 0,7 % U-235) ist die Einfangwahrscheinlichkeit durch U-238 für die Neutronen so hoch, dass ein **Moderator** verwendet wird. Er bremst die Neutronen ab, sodass eine ausreichende Anzahl an Kernspaltungen stattfinden kann. Als Moderator dient Deuterium in Form von schwerem Wasser, D₂O. Deuterium D ist ein Wasserstoffisotop H-2.
- Bei **angereichertem Uran** (Natururan mit einem U-235-Anteil von 3 bis 30 %) kann als Moderator normales Wasser, H₂O, verwendet werden.
- **Reines Uran-235** ist wegen der starken Neutronenproduktion kaum steuerbar und wird daher für Atombomben verwendet.
- **U-233 und Plutonium-239 (Pu-239)** gleichen in ihrem Spaltverhalten **U-235**.

- Reines Uran-238 ist für eine Kettenreaktion nicht geeignet, weil die Einfangwahrscheinlichkeit für Neutronen zu hoch ist.

Unter der Führung von **Enrico Fermi** konnte die **erste kontrollierte Kernspaltungskettenreaktion** am 2. Dezember 1942 in Chicago verwirklicht werden.

Die bei der Kernspaltung entstehende **Wärme** wird bei Zweikreisanlagen mithilfe eines Kühlmittels aus dem Reaktorkern zum Wärmetauscher transportiert (Primärkreis). Der im Sekundärkreis des Wärmetauschers erzeugte Dampf treibt eine Turbine an, die der Generator zur Stromerzeugung angekoppelt ist, an.

Vergleichen Sie zum Primär- und Sekundärkreis die Abbildung zur Aufgabe 5.3.26. Bei Einkreisanlagen wird der im Reaktor erzeugte Dampf direkt in die Turbine geleitet (Direktkreislauf). Zur kommerziellen Nutzung der Kernspaltung sind vor allem Leichtwasserreaktoren in Betrieb.



ENRICO FERMI, 1901 BIS 1954,
ITALIENISCHER PHYSIKER,
NOBELPREIS FÜR PHYSIK 1938

Leichtwasserreaktor

Beim **Leichtwasserreaktor** wird angereichertes Uran verwendet. Daher kann als Moderator **normales (leichtes) Wasser** verwendet werden, das gleichzeitig als **Kühlmittel und als Wärmeüberträger** zur Turbine dient. Das angereicherte Uran wird in Form von Urandioxid, UO_2 , zu Tabletten gepresst. Diese werden wegen der Wärmeableitung in metallische Hüllrohre eingeschlossen und bilden die **Brennstäbe**. Zwischen diesen sind verschiebbare **Absorberstäbe** angeordnet.

Der **Siedewasser-** und der **Druckwasserreaktor** sind die beiden wichtigsten Typen von Leichtwasserreaktoren. Intensiv geforscht wird an **Hochtemperaturreaktoren** (Wärmeabgabe vom Spaltstoff bei rund 800 bis 900 °C), bei denen als Kühlmittel meist Helium verwendet wird. Auch in **Brutreaktoren** (kurz: Brüter), bei denen neben der Energienutzung die Herstellung von neuem Spaltmaterial im Vordergrund steht, wird viel Forschungsaufwand investiert.

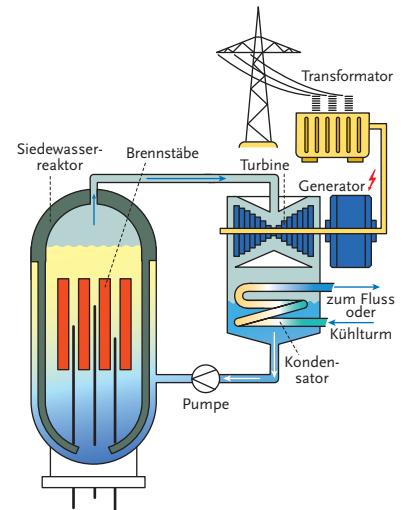
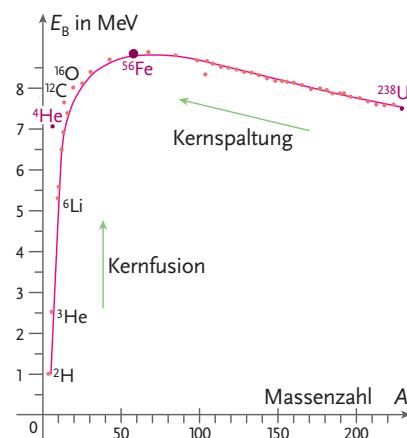
Weil die Entdeckung der Kernspaltung durch Hahn und Straßmann in die Wirren des Zweiten Weltkrieges fiel, lag eine militärische Nutzung nahe. Die erste Kernspaltungsbombe mit Uran-235 als Spaltmaterial wurde am 6. August 1945 über Hiroshima, die zweite mit Plutonium-239 als Spaltmaterial am 9. August 1945 über Nagasaki abgeworfen.

Kernspaltungsbomben

Bei einer **Kernspaltungsbombe** wird durch eine **unkontrollierte Kettenreaktion** in reinem Uran-235 oder Plutonium-239 innerhalb kürzester Zeit (rund 100 ns) ungeheure Energie freigesetzt, sodass die Temperatur im Explosionszentrum rund 10 000 000 °C und in 100 m Entfernung noch immer rund 7 000 °C beträgt.

Kernfusion

Die nebenstehende Abbildung zeigt, dass bei der Verschmelzung (Fusion) zweier leichter Kerne zu einem Kern mit einer Massenzahl kleiner als 50 Energie freigesetzt wird. Ebenso wird bei der Kernspaltung von schweren Elementen Energie frei. E_B ist die Bindungsenergie pro Nukleon.



Schema eines Siedewasser-reaktors

| Nukleon | Masse |
|-----------|-------------|
| Proton p | 1,007 276 u |
| Neutron n | 1,008 665 u |

Das Neutron hat eine um rund 0,14 % größere Masse als das Proton

Masse des Elektrons in Units $m_e \approx 0,000\ 548\ 58\text{ u}$

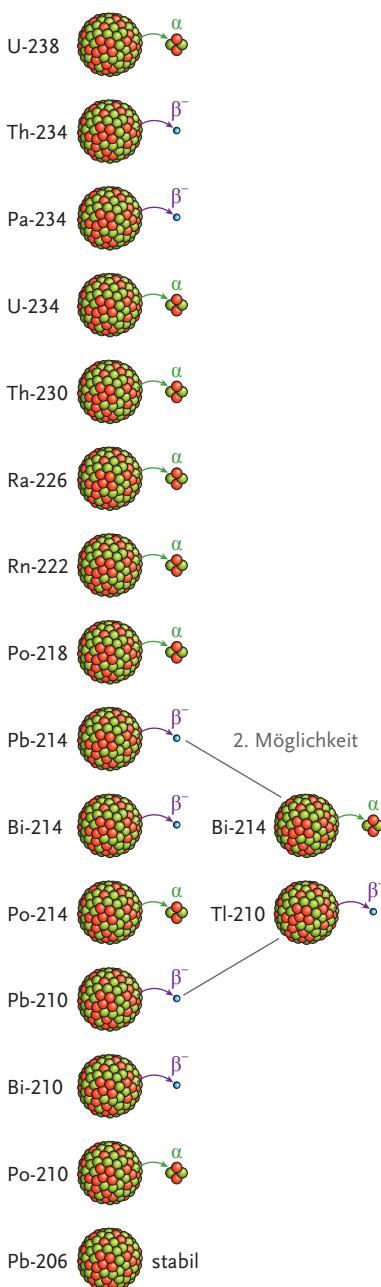


Zum Bau des Fusionsreaktors ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) finden Sie beispielsweise einen Beitrag im Novemberheft 2012 von Spektrum der Wissenschaft. Die technischen Probleme sind noch zahlreich und viele sind nach den Jahrzehnten dauernden Anstrengungen bereits etwas skeptisch, was die kommerzielle Nutzung der Kernfusion angeht.

| Kraft | Relative Stärke | Reichweite |
|--------------------------|-----------------|------------------------|
| Gravitationskraft | 10^{-38} | ∞ |
| Elektromagnetische Kraft | 10^{-2} | ∞ |
| Schwache Kraft | 10^{-13} | $< 10^{-18} \text{ m}$ |
| Starke Kraft | 1 | $< 10^{-13} \text{ m}$ |

Die starke Kraft ist eine der vier fundamentalen Kräfte

 Zu den vier fundamentalen Kräften siehe auch Kap. 5.5.



Skizze zu Aufgabe 5.3.23: Die Uran-238-Zerfallsreihe

Beispiel 5.3.12: Fusion von zwei Protonen und zwei Neutronen

Ein neutrales Helium-4-Atom besteht aus zwei Protonen, zwei Neutronen und zwei Elektronen. Addieren wir die sechs Einzelmassen, erhalten wir rund 4,032 98 u für die Massensumme der Bestandteile.

Die experimentelle Atommasse von Helium-4 beträgt aber nur 4,002 60 u. Der **Massendefekt** von 0,030 38 u gilt für das Atom. Wegen der geringen Elektronenmasse im Vergleich zu der Protonen- und Neutronenmasse kann dieser Massendefekt, multipliziert mit dem Quadrat der Vakuumlichtgeschwindigkeit, als Näherungswert für die Energiefreisetzung bei einer Fusion von zwei Protonen und zwei Neutronen verwendet werden.

Um ein Gefühl für die Größenordnung der Energiefreisetzung bei Fusionsprozessen zu erhalten, vergleichen wir sie mit der Verbrennungsenergie von Steinkohle.

Beispiel 5.3.13: Helium gegen Steinkohle

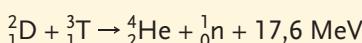
Das Verbrennen von 1 kg Steinkohle liefert rund 8 kWh = 28,8 MJ.

Der Massendefekt von 0,030 38 u entspricht einer Energie von $E \approx 4,53 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ pro He-Atom. Für 1 kg Helium ergibt das rund $6,84 \cdot 10^{14} \text{ J}$.

Man müsste also rund 23 000 000 kg Steinkohle verbrennen, um die gleiche Energie wie bei der Fusion mit 1 kg Helium als Fusionsprodukt freizusetzen.

Um zwei Atomkerne zu einer Fusion zu bringen, muss ihr Abstand so weit verringert werden, dass die **starke Kraft** (Kernkraft) die beiden Ursprungskerne zu einem neuen Kern vereint. Weil die Kernkraft eine sehr kleine Reichweite hat, muss die mit kleinerem Abstand immer stärker werdende Coulombabstoßung der Protonen überwunden werden. Daher müssen die zu fusionierenden Atome als Gas sehr hoher Temperatur vorliegen. Weil **Deuterium** im Meerwasser mit rund 30 Gramm pro Kubikmeter in ausreichender Menge vorhanden ist, versucht man eine kontrollierte **Fusion von Deuterium und Tritium** zu erreichen. **Tritium** T ist ein Wasserstoffisotop H-3. Man kann Tritium aus dem in der Erdkruste vorkommenden Lithium durch Neutronenbeschuss gewinnen.

Beispiel 5.3.14: Fusion von Deuterium und Tritium



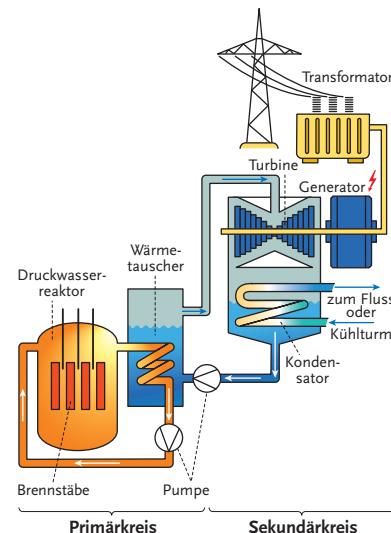
Das Atomspergesetz vom 5. Dezember 1978 schließt die Nutzung der Kernenergie in Österreich aus. Die Bemühungen zur Inbetriebnahme von Zwentendorf – eine am 5. November 1978 abgehaltene Volksabstimmung verhinderte die Inbetriebnahme des bereits fertiggestellten Kernkraftwerks Zwentendorf – wurden nach der Reaktorkatastrophe von Tschernobyl am 26. April 1986 eingestellt. **1999** wurde das Atomspergesetz in den Verfassungsrang erhoben. Seitdem trägt es die Bezeichnung **Bundesverfassungsgesetz für ein atomfreies Österreich**.

Am Ende dieses Kapitels lassen wir noch einen der beiden Physiknobelpreisträger von 1959, **Emilio Segrè** (1905 bis 1989), zu Wort kommen. In der deutschen Übersetzung seines Buches From X-rays to Quarks – Modern Physicists and Their Discoveries heißt es: „Die Entdeckung der Röntgenstrahlung, des Elektrons und des Zeeman-Effekts, aber besonders die Entdeckung der Radioaktivität markieren in den Jahren um 1895 einen Wendepunkt in der Physik.“



Ziele erreicht? – „Kernspaltung und Kernfusion“

- 5.3.21** Erklären Sie die **kritische Masse** und geben Sie ein Beispiel an.
- 5.3.22** Beschreiben Sie typische **Spaltmaterialien**.
- 5.3.23** Beschreiben Sie die in der Randspalte auf S. 368 abgebildete **U-238-Zerfallsreihe** und geben Sie für alle Zerfälle die Zerfallsprozesse in der Form wie in den Beispielen 5.3.07 und 5.3.08 an.
- 5.3.24** Schreiben Sie eine mögliche **Reaktionsgleichung** für die durch ein Neutron induzierte Spaltung von U-238 in Barium und Krypton an.
- 5.3.25** Recherchieren Sie über die Wirkung von **Kernspaltungsbomben** und von **Wasserstoffbomben**.
- 5.3.26** Recherchieren Sie über die Rolle von Robert Oppenheimer, Enrico Fermi und John von Neumann in **Los Alamos**. In Los Alamos war in der Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts das geheime Atomforschungszentrum der Vereinigten Staaten von Amerika untergebracht. Informieren Sie sich über die Argumente von Albert Einstein pro und kontra Atomwaffen und seinen Brief an den US-Präsidenten Franklin Roosevelt.
- 5.3.26** Recherchieren Sie zu **Kernspaltungsreaktoren**, insbesondere über Siedewasser- und Druckwasserreaktoren und über **Fusionsreaktoren**.



Skizze zu Aufgabe 5.3.26

5.4 Astrophysik, Gravitation

Die **Astrophysik** erfreut sich auch unter wissenschaftlichen Laien immer größerer Beliebtheit und wird in vielen Zeitschriften regelmäßig behandelt. Die Abkürzung SETI für *Search for Extraterrestrial Intelligence* – Suche nach außerirdischer Intelligenz – findet sich auch in Tageszeitungen immer häufiger. In verbreiteten Internetsuchmaschinen finden sich zum Stichwort **Astrophysik** durchschnittlich mehr als 2,6 Millionen Einträge.

Die **Astrophysik** untersucht die physikalischen Eigenschaften von Himmelskörpern und bildet mit der **Himmelsmechanik** und der **sphärischen Astronomie** die **drei klassischen Grunddisziplinen der Astronomie**.

Die Astronomie ist die Lehre von den Gestirnen und den physikalischen Gesetzen des Weltalls.

Die sphärische Astronomie ermöglicht die Angabe der Positionen von Gestirnen an der Sphäre (Himmelskugel) mittels geeigneter Koordinatensysteme und leitet ihre Bewegungsgesetze ab.

Die Himmelsmechanik beschreibt die Dynamik der Himmelskörper und ermittelt deren Bahnen unter Anwendung des **Gravitationsgesetzes**.



Das Abbild einer typischen Spiralgalaxie

Astron: griechisch für Stern.
Nomos: griechisch für Lehre, Gesetz.

5.4.1 Gravitationsfeld und Planetenbewegung



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die **Stärke** und **Richtung** der **Kraft** zwischen zwei Punktmassen angeben und den Begriff **Gravitationsfeld** wiedergeben;
- das **Gravitationsfeld** für eine punktförmige isolierte Masse skizzieren und die **Gravitationsfeldstärke** berechnen.



Im Alltag ist zwischen **Astronomie** (Gestirnswissenschaft) und **Astrologie** (Para- oder Pseudowissenschaft) zu unterscheiden. Die Astrologie versucht, aus den Positionen von Himmelskörpern Ereignisse, Schicksale und Persönlichkeitsmerkmale von Menschen zu deuten bzw. prognostisch zu bestimmen.

Newton'sches Gravitationsgesetz:

Zwei Punktmassen m_1 und m_2 im Abstand r ziehen sich immer mit der Gravitationskraft

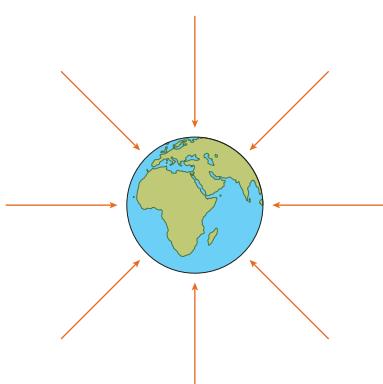
$$F_{\text{Gravitation}} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

an.

Universelle Gravitationskonstante:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2} = \\ = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^3}{\text{kg}^2}$$

Ein **geostationärer Satellit** ist ein künstlicher Erdsatellit, der auf einer geostationären Umlaufbahn der Erddrehung mit einer Eigengeschwindigkeit von etwa 3,07 km/s folgt. Dadurch befinden sich geostationäre Satelliten im Idealfall immer über demselben Punkt der Erdoberfläche bzw. des Äquators.



Feldlinienbild des Gravitationsfeldes der Erde, aus großer Entfernung betrachtet

Gravitationsgesetz und Gravitationsfeld

- Der **Betrag der Kraft** zwischen zwei Punktmassen m_1 und m_2 ist direkt proportional zum Produkt der Einzelmassen und indirekt proportional zum Quadrat ihres Abstands.
- $$F_{\text{Gravitation}} = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$
- Die **Gravitationskraft** wirkt **stets anziehend** in Richtung der Verbindungsgeraden der beiden Massenmittelpunkte.
 - Um die Kraftwirkung einer Masse M auf eine sich in ihrer Umgebung befindende Masse m zu beschreiben, bietet sich das **vektorielle Gravitationsfeld** mit dem Betrag $g(M, r)$ an.
 - Die **Gravitationsfeldstärke** $g(M, r)$ ist die Kraft auf die Einheitsmasse im Abstand r , also die **Gravitationsbeschleunigung**, und wird in N/kg bzw. m/s² angegeben.
 - Für eine beliebige Masse m am Ort r im **Gravitationsfeld** der Masse M ergibt sich die Gravitationskraft als $F_G = m \cdot g(M, r)$.
 - Jede Masse m ist von einem **Gravitationsfeld** $\vec{g}(m, \vec{r})$ mit der Gravitationsfeldstärke $g(m, r)$ umgeben.
 - Eine **Punktmasse** m besitzt ein **symmetrisches Gravitationsfeld**; die Gravitationsfeldstärke bzw. Gravitationsbeschleunigung g ist direkt proportional zu m und indirekt proportional zum Quadrat von r . Ihr Betrag berechnet sich mit dem newtonischen Gravitationsgesetz als $g(r) = \frac{G \cdot m}{r^2}$, wobei G die **universelle Gravitationskonstante** ist.

Beispiel 5.4.01: Gravitationsfeldstärke der punktförmig gedachten Erde

Wenn unsere Erde zu einem Punkt verdichtet wäre, können wir seine Gravitationsfeldstärke im Abstand r gemäß $g(r) = \frac{G \cdot m_E}{r^2}$ berechnen.

- Für $r = 6\,371$ km erhalten wir

$$g(6\,371 \text{ km}) = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}{(6,371 \cdot 10^6)^2} \text{ N/kg} = 9,81 \text{ N/kg} = 9,81 \text{ m/s}^2.$$

Das ist genau jene Gravitationskraft pro Kilogramm also jene Gravitationsbeschleunigung, die im Mittel an der **Erdoberfläche** wirksam ist.

- Für $r = (6\,371 + 35\,786)$ km = 42 156 km erhalten wir

$$g(42\,156 \text{ km}) = \frac{6,67 \cdot 10^{-11} \cdot 5,97 \cdot 10^{24}}{(4,2156 \cdot 10^7)^2} \text{ N/kg} = 0,224 \text{ N/kg} = 0,224 \text{ m/s}^2.$$

Das ist genau jene Gravitationsbeschleunigung bzw. Gravitationskraft pro Kilogramm, die im Mittel auf der Umlaufbahn eines **geostationären Satelliten** wirkt.

Um ein Gravitationsfeld grafisch darzustellen, verwendet man **Feldlinienbilder**. Die Feldlinien verlaufen in Richtung der wirkenden Kraft und geben damit die Bewegungsrichtung einer Punktmasse im dargestellten Gravitationsfeld an. Die Feldstärke, also die Gravitationsbeschleunigung, und damit die Kraft sind proportional zur Dichte der Feldlinien.

Sind mehr als zwei Massen vorhanden, ist das Superpositionsprinzip anzuwenden. Die **Gesamtfeldstärke** ergibt sich für jeden Punkt als **Vektorsumme** der einzelnen Feldstärken.

Beispiel 5.4.02: Gravitationsfeldstärke für ein Massenquartett

Vier gleiche Punktmassen M sind in den Ecken eines Quadrats mit der Seitenlänge a fix positioniert.

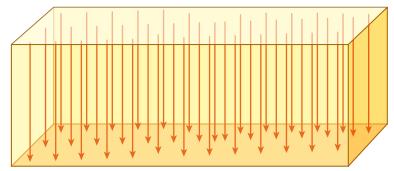
- Für den Mittelpunkt des Quadrats verschwindet die Gravitationsfeldstärke. Eine im Mittelpunkt positionierte Probemasse bleibt daher in Ruhe.
- Für einen Seitenhalbierungspunkt ergibt sich aus Symmetrieverlegungen folgender Betrag:

$$g_{\text{ges}} = 2G \cdot \frac{M}{a^2 + \left(\frac{a}{2}\right)^2} \cdot \cos\left(\arctan\frac{1}{2}\right) \approx 1,7889 \cdot G \cdot \frac{M}{4a^2 + \frac{a^2}{4}} = 7,1556 \cdot \frac{GM}{17a^2}$$

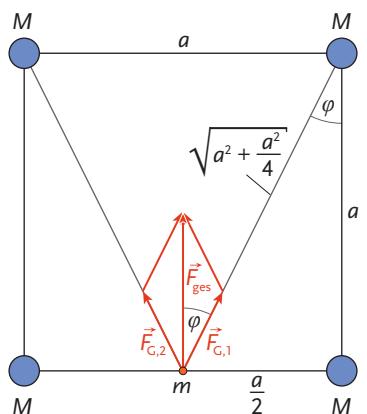
Eine im Seitenhalbierungspunkt positionierte Probemasse wird daher mit g_{ges} zum Quadratmittelpunkt hin beschleunigt.

Die in NAWI I/II vorgestellten keplerschen Gesetze der Planetenbewegung gelten streng nur für **Zweikörpersysteme**. Wir haben bei der Ableitung des dritten Kepler-Gesetzes, nach dem sich die Quadrate der Umlaufzeiten wie die Kuben der großen Halbachsen verhalten, einen ruhenden Zentralkörper – unsere Sonne – und einen einzigen kreisförmig umlaufenden Planeten angenommen. Wenn mehr als zwei Körper, wie es im Sonnensystem stets der Fall ist, im Spiel sind, lassen sich für ihre Bewegungen keine algebraischen Lösungen angeben. Die Bahnen lassen sich dann numerisch durch iterative (fortgesetzte) Integration der Bewegungsgleichungen berechnen. Für spezielle Fälle, wie beim **Dreikörperproblem**, wenn die Masse eines Körpers gegenüber den beiden anderen vernachlässigbar klein ist, lassen sich algebraische Näherungen angeben. Da fast die gesamte Masse unseres Sonnensystems im Zentralkörper Sonne vereinigt ist, sind die Keplerellipsen die erste Näherung der Planetenbahnen.

Abschließend weisen wir noch auf die Feldlinienbilder in der Elektrostatisik hin, die die Bewegungsrichtung einer positiven Probeladung im elektrischen Feld anzeigen.



Ausschnitt aus dem Feldliniengitter der Erde auf der Erdoberfläche. Die Erdkrümmung kann auf dieser sehr kleinen gewählten Skala vernachlässigt werden, sodass sich auf dieser Skala an jedem Ort eine parallele **Gravitationsbeschleunigung** ergibt



Skizze zu Beispiel 5.4.02

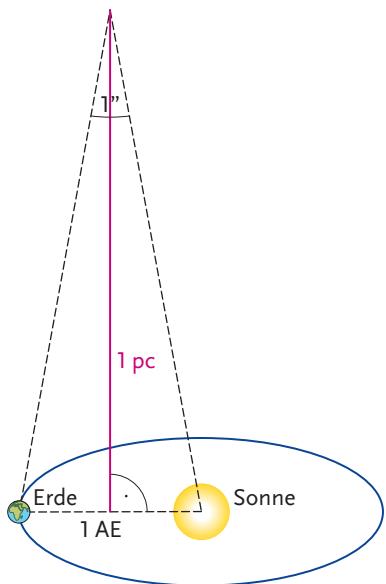


Ziele erreicht? – „Gravitationsfeld und Planetenbewegung“

- 5.4.01** Geben Sie die Formel für die **Gravitationsfeldstärke** g einer Punktmasse m im Abstand r an und skizzieren Sie mindestens acht Gravitationsfeldlinien.
- 5.4.02** Berechnen Sie die **Gravitationsfeldstärke** für eine Punktmasse von 70 kg im Abstand von 2 m, 4 m und 8 m. Welche Verhältnisse erwarten Sie?
- 5.4.03** Berechnen Sie die von Ihnen am Ort Ihrer Sitznachbarin bzw. Ihres Sitznachbarn erzeugte **Gravitationsfeldstärke**, wenn Sie Ihre Masse in einem Punkt konzentriert denken.
- 5.4.04** Berechnen Sie die **Gravitationsfeldstärke** im Halbierungspunkt der längeren Seite eines Rechtecks, wenn in den vier Eckpunkten vier gleiche Punktmassen positioniert sind und das Seitenverhältnis 2 : 1 beträgt.
- 5.4.05** Berechnen Sie die **Gravitationsfeldstärke** im Schwerpunkt eines gleichseitigen Dreiecks, wenn in den drei Eckpunkten drei gleiche Punktmassen positioniert sind. Nützen Sie Symmetrieverlegungen.
- 5.4.06** Berechnen Sie die **Gravitationsfeldstärke** im Seitenhalbierungspunkt eines regelmäßiges Sechsecks, wenn in den sechs Eckpunkten sechs gleiche Punktmassen positioniert sind.
- 5.4.07** Wie groß ist die **Gravitationsfeldstärke** unserer Erde im Mittel auf dem Erdmond? Recherchieren Sie die benötigten Daten.
- 5.4.08** Für wie viele Massen lassen sich im Allgemeinen die **Bahnen** aus dem newtonschen Gravitationsgesetz durch **algebraische Gleichungen** berechnen?



Bereits Isaac Newton hat aus seinem Gravitationsgesetz gefolgert, dass das externe Gravitationsfeld einer sphärisch-symmetrischen Massenverteilung gleich ist dem einer Punktmasse in der Sphärenmitte.



Skizze zur Veranschaulichung eines Parsec

Längeneinheiten im Universum:
1 AE = 1 Astronomische Einheit
1 Lj = 1 Lichtjahr
1 pc = 1 Parsec = 1 Parallaxensekunde

2011 ging der Nobelpreis für Physik an **Saul Perlmutter** (USA), **Brian P. Schmidt** (USA und Australien) und **Adam G. Riess** (USA) für die Entdeckung der beschleunigten Ausbreitung des Universums, die ihnen durch die Beobachtung entfernter Supernovae gelang.

Das **olberssche Paradoxon** bezeichnet den Widerspruch zwischen der Vorhersage eines hellen Nachthimmels und seiner tatsächlichen dunklen Erscheinung.

Eine **Supernova** ist das schnell eintretende, helle Aufleuchten eines Sterns am Ende seiner Lebenszeit durch eine Explosion, bei der der Stern selbst vernichtet wird.

5.4.2 Das Universum

Die zu beobachtenden Entfernungen im Universum sind so groß, dass man verschiedene Einheiten verwendet. Woraus das Universum besteht, ist jedoch nicht geklärt. Nach heutigem Wissenstand setzt sich die gesamte Masse des Universums aus 73 % dunkler Energie, 23 % dunkler Materie, die jedoch experimentell noch nicht nachgewiesen wurden, und aus 4 % normaler (sichtbarer) Materie zusammen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- eine **Astronomische Einheit**, ein **Lichtjahr** und ein **Parsec** angeben, einen Stern definieren und den sonnennächsten Stern nennen;
- mit den verschiedenen Einheiten rechnen.

Seit den Messungen von **Edwin Hubble** (Kap. 5.4.3) wussten Astronomen, dass das Universum expandiert. Doch sie glaubten, dass die Schwerkraft der Materie die Expansion allmählich verlangsamen sollte. 1998 entdeckten Kosmologen, dass sich die Ausdehnung des Kosmos sogar beschleunigt. Als Ursache wird dafür die dunkle Energie verantwortlich gemacht. Auf der Suche nach der dunklen Materie werden auch Neutrinoleskope eingesetzt. Das derzeit größte Neutrinoleskop IceCube ist am Südpol positioniert.

Längeneinheiten im Universum

- **1 Astronomische Einheit (AE)** ist die mittlere Entfernung zwischen Erde und Sonne und beträgt rund $149,6 \text{ Gm} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km}$.
- **1 Lichtjahr (Lj)** ist die Strecke, die Licht bei geradliniger Ausbreitung in einem Jahr (im Vakuum) zurücklegt: $1 \text{ Lj} \approx 63\,240 \text{ AE} \approx 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km}$.
- In einer Entfernung von **1 Parsec (pc)** erscheint eine Strecke mit einer Länge von einer Astronomischen Einheit unter einem Winkel von einer Bogensekunde: $1 \text{ pc} \approx 3,26 \text{ Lj} \approx 3,085 \cdot 10^{13} \text{ km}$

Beispiel 5.4.03: Planetenentfernungen in AE

Die in NAWI I/II behandelten Planeten unseres Sonnensystems Merkur, Venus, Erde, Mars, Jupiter, Saturn, Uranus und Neptun haben mittlere Entfernungen von 0,39 AE bis 30,06 AE zur Sonne.

Die Milchstraße(ngalaxie) umfasst rund 300 Milliarden Sterne und die Zahl der Galaxien wird mit rund 100 Milliarden angenommen. Obwohl die Zahl der Sterne so groß ist, machen Sie nur rund 0,4 % der Gesamtmasse im Universum aus. Denn 90 % der gewöhnlichen Materie bestehen aus Gas, das dünn im intergalaktischen Raum verteilt ist.

Stern

Ein **Stern** ist ein massereicher, selbst leuchtender kugelförmiger **Gaskörper**, dessen **Strahlungsenergie** durch **Kernfusion** in seinem Inneren aufgebracht wird.

Beispiel 5.4.04: Sternentfernungen in AE, Lj und pc

Der sonnennächste Stern ist Proxima Centauri. Sein Abstand zu unserem Sonnensystem beträgt etwa 268 000 AE, also rund 4,2 Lichtjahre bzw. 1,3 pc.

Alrischa ist ein Doppelstern im Sternbild Fische und ist etwa 140 Lichtjahre bzw. rund 42,9 Parsec entfernt.



Ziele erreicht? – „Das Universum“

- 5.4.09** Geben Sie 1 AE , 1 Lj und 1 pc in Kilometern und Metern in normierter Gleitkommadarstellung an.
- 5.4.10** Berechnen Sie die Entfernung des **Polarsterns** von $(431 \pm 27) \text{ Lj}$ in Parsec.
- 5.4.11** Ermitteln Sie die Entfernung des Sterns **Alkor** von unserem Sonnensystem in astronomischen Einheiten bzw. Lichtjahren, wenn seine Entfernung mit $(25,056 \pm 0,082) \text{ pc}$ bekannt ist. Alkor ist der freiäugig sichtbare Begleiter des hellen Sterns Mizar im Sternbild Großer Wagen und wird daher „das Reiterlein“ bzw. „der Augenprüfer“ genannt.

5.4.3 Die Entwicklung von Sternen

Sterne haben die Menschen seit jeher in ihren Bann gezogen. Die Weisen aus dem Morgenland sollen einem Stern gefolgt sein und in Romanen, Fernsehserien und Filmen werden sogar Lebewesen auf Planeten um Sterne außerhalb unserer Galaxie thematisiert. Sterne bilden sich aus interstellarem Gas, das sie in ihrem Inneren durch Fusionsprozesse im Lauf der Zeit umwandeln. Die veränderte Materie wird teilweise wieder an den ungebundenen Raum abgegeben.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- einige **Zustandsgrößen** von Sternen und das **Hubblegesetz** angeben;
- den Unterschied zwischen **scheinbarer** und **absoluter Helligkeit** erklären und die Formel für die **absolute Helligkeit** angeben und anwenden;
- das **Hertzsprung-Russell-Diagramm** interpretieren.

Zustandsgrößen von Sternen

Bei einem Gas beschränkt man sich im Allgemeinen auf die drei Zustandsgrößen Druck p , Volumen V und Temperatur T . Ein Stern kann durch viele Zustandsgrößen wie Masse, Leuchtkraft, Radius, Temperatur, Spektralklasse, mittlere Dichte, mittlere Energieerzeugung je Kubikzentimeter und Sekunde, Schwerbeschleunigung an der Oberfläche, Rotationsgeschwindigkeit, Magnetfeld und chemische Zusammensetzung beschrieben werden. Wir werden die Helligkeit, die Leuchtkraft, die effektive Temperatur und die Spektralklassen genauer beschreiben.

Helligkeit – scheinbar und absolut

- Die **Helligkeit** ist ein Maß für die von einem Himmelskörper je Quadratmeter empfangene Strahlungsleistung. Die Maßeinheit der Helligkeit ist die **Größenklasse** mit dem **Einheitenzeichen m**. Dabei wird das Zeichen m hochgestellt hinter die Zahlenangabe, bei Dezimalangabe über das Komma geschrieben.
- Die **scheinbare Helligkeit m** ist ein Maß für die an einem **Beobachtungsort** je Quadratmeter empfangene Strahlungsleistung.
- Die **absolute Helligkeit M** ist gleich der **scheinbaren Helligkeit m**, die man in 10 pc Entfernung von einem Himmelskörper messen würde.

Wenn die Entfernung r in parsec gegeben ist, erhält man die absolute Helligkeit M gemäß $M = m + 5 - 5 \cdot \lg r = m + 5 \cdot (1 - \lg r)$. Weil für $r = 10 \text{ (pc)}$ der dekadische Logarithmus 1 liefert, stimmt die absolute Helligkeit M mit der scheinbaren Helligkeit m definitionsgemäß überein.



Die Sterne wurden bereits von **Hipparch** nach ihrer Helligkeit in **sechs Größenklassen** eingeteilt, die heute mit 1^m , 2^m , 3^m , 4^m , 5^m und 6^m bezeichnet werden. Die Sterne der ersten Klasse waren am hellsten, die der sechsten mit bloßem Auge noch sichtbar.

Magnitudo: lateinisch für Größe.

Damit man die **scheinbare Helligkeit m** nicht mit ihrer Einheit verwechselt, wird die Einheit hochgestellt. Beispiel Polarstern: $m = 2^m$.

Der Polarstern ist ein Stern der zweiten Größenklasse.

Zusammenhang zwischen **scheinbarer Helligkeit m** in **Magnitudo** und **Lichtstärke in Candela**.

1 cd, aus 1 m Abstand betrachtet, entspricht der Helligkeit eines Objektes von -13^m94 . Zum Vergleich: Die Vollmondhelligkeit beträgt -12^m55 .



1 cd entspricht der Lichtstärke von $1/60 \text{ cm}^2$ Oberfläche eines schwarzen Körpers bei einer Temperatur von 1769°C .

Zwei Größenklassen m_1 und m_2 sind mit den Intensitäten (Energie pro Zeit- und Flächeneinheit) I_1 und I_2 gemäß

$$\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right) = -0,4 \cdot (m_1 - m_2)$$

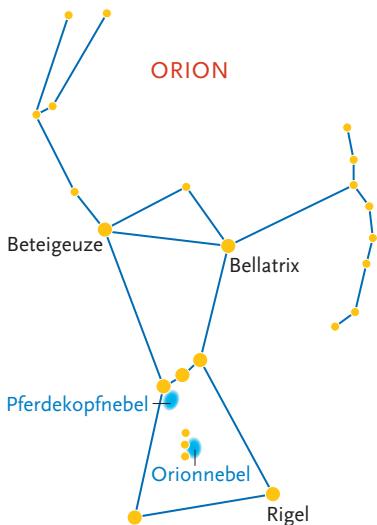
verbunden, sodass für zwei Sterne mit einer Differenz von fünf Größenklassen m_n und m_{n+5} gilt:

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{-0,4 \cdot 5} = 10^{-2} = \frac{1}{100}.$$

Die Sternintensitäten unterscheiden sich also pro fünf Größenklassen jeweils um den Faktor 100. Bei einem Unterschied von 15 Größenklassen ($\Delta m = 15^m$) beträgt das Verhältnis der Sternintensitäten 1 000 000 : 1.

Bellatrix (lat. „Kriegerin“) ist der dritthellste Stern im Sternbild Orion und ist neben Beteigeuze der rechte Schulterstern des Orion. Bellatrix ist rund 240 Lichtjahre entfernt und hat eine scheinbare Helligkeit von $1,6^m$.

Beteigeuze – der linke Schulterstern des Orion – ist ein Riesenstern und wird im Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) als roter Riesenstern klassifiziert. Er hat etwa den 662-fachen Durchmesser unserer Sonne, eine etwa zehntausendmal so große visuelle Leuchtkraft und ist von der Erde aus gesehen der zehnhellste Stern.



Das Sternbild des Orion liegt auf dem Himmelsäquator, der die Himmelskugel in eine Nord- und eine Südhälfte teilt

Die **Leuchtkraft** eines Sterns nimmt bei einer Supernova millionen- bis milliardenfach zu, er wird für kurze Zeit so hell wie eine ganze Galaxie.

Beispiel 5.4.05: Intensitätsverhältnis von Bellatrix zu Altair

Bellatrix hat eine scheinbare Helligkeit m_1 von $1,6^m$. Die scheinbare Helligkeit m_2 von Altair beträgt $0,76^m$.

Damit ist ihr Intensitätsverhältnis

$$\frac{I_1}{I_2} = 10^{-0,4 \cdot (1,6 - 0,76)} = 10^{-0,336} \approx \frac{1}{0,46}.$$

Die gemessene Intensität hängt wie die scheinbare Helligkeit von der Entfernung vom beobachteten Stern ab. Eine vom Beobachter unabhängige physikalische Größe ist die Leuchtkraft oder Strahlungsleistung eines Sterns.

Leuchtkraft und effektive Temperatur

- Die **Leuchtkraft** L ist die gesamte von einem Himmelskörper abgegebene Strahlungsleistung. Sie wird in Watt oder in Einheiten der Sonnenleuchtkraft $L_{\text{Sonne}} = 3,847 \cdot 10^{26} \text{ W}$ gemessen.
- Die Leuchtkraft L eines Sterns ergibt sich mit dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz zu

$$L = 4\pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4.$$

R gibt den Sternradius an, σ die universelle Strahlungskonstante $\left(\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}\right)$ und T_{eff} die effektive Temperatur des Sterns.
- Die Temperatur eines schwarzen Körpers, der je Quadratmeter die gleiche, über alle Spektralbereiche aufsummierte Leistung aussendet wie ein untersuchter Körper (Stern), heißt **effektive Temperatur** oder **Effektivtemperatur**.

Beispiel 5.4.06: Radius unserer Sonne

Die **Leuchtkraft** der Sonne ist mit $3,847 \cdot 10^{26} \text{ W}$ bekannt. Die **effektive Temperatur** wird mit 5778 K angegeben.

Damit berechnet sich der Sonnenradius zu

$$R = \sqrt{\frac{L}{4\pi \cdot \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4}} = \sqrt{\frac{3,847 \cdot 10^{26}}{4\pi \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 5778^4}} \text{ m} \approx 6,960 \cdot 10^8 \text{ m} = 6,960 \cdot 10^5 \text{ km}$$

Das stimmt mit dem in der Literatur angegebenen Wert von $6,957 \cdot 10^5 \text{ km}$ mit einer relativen Abweichung von rund 0,04 % sehr gut überein.

Die Sternspektren zeigen eine große Vielfalt, sodass mithilfe einer Spektralklassifikation (erstmals an der Harvardsternwarte in den USA durchgeführt) eine Ordnung nach physikalischen Parametern erreicht wird.

Spektralklassen

Die häufigsten **Spektralklassen** werden durch einen Großbuchstaben: O, B, A, F, G, K oder M gekennzeichnet, wobei nach absteigender effektiver Temperatur geordnet ist.

Neben dieser Hauptfolge OBAFGKM (Merksatz: „Oh Be A Fine Girl Kiss Me.“), zu der etwa 99 % aller klassifizierbaren Sternspektren gehören, gibt es Nebenfolgen. Die Spektralklassen der Hauptreihen unterteilt man dezimal und hängt die Ziffern 0 bis 9 den großen Buchstaben an. Einzige Ausnahme: Bei der Spektralklasse O beginnt die dezimale Unterteilung erst bei O3.

Die von der Erde aus gemessene scheinbare Helligkeit m der Sterne gibt nicht die tatsächliche Leuchtkraft L der Sterne an, diese kann erst in Verbindung mit der Entfernung ermittelt werden.

Die Einteilung von Sternen in **Leuchtkraftklassen** wurde von **William Wilson Morgan** und **Philip C. Keenan** entwickelt. Sie wird nach den Anfangsbuchstaben ihrer Nachnamen als MK-System bezeichnet.

Im MK-System unterscheidet man die sechs Leuchtkraftklassen: I = Überriesen, II = helle Riesen, III = normale Riesen, IV = Unterriesen, V = Zwerge (Hauptreihensterne) und VI = Unterzwerge.

Die Leuchtkraftklasse I wird nach abnehmender Leuchtkraft noch in die Unterklassen a, ab und b unterteilt.

Mit den Spektralklassen erhält unsere Sonne die Bezeichnung G2 V, wobei G2 die Spektralklasse und V die Leuchtkraftklasse angibt.

Beispiel 5.4.07: Proxima Centauri – der sonnenächste Stern

Proxima Centauri ist ein roter Zwerg der Spektralklasse M, also ein Hauptreihenstern. Mit der Klassifikation M5,5 zählt er zu den M-Zwergsternen und hat an seiner Oberfläche (Photosphäre) eine Temperatur von 3 040 K.

Seine Leuchtkraft berechnet sich mit einem Radius von 0,145 Sonnenradien (R_{Sonne} rund 695 700 km) zu

$$L = 4\pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4 = 4\pi \cdot (0,145 \cdot 6,957 \cdot 10^8)^2 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 3\,040^4 \text{ W} \approx 6,193 \cdot 10^{23} \text{ W}$$

Trotz seiner Nähe zur Erde (r rund 1,3 pc) beträgt seine scheinbare Helligkeit nur 11^m05. Dies ist hundertmal weniger als bei den schwächsten mit bloßem Auge sichtbaren Sternen, deren Helligkeit etwa 6^m beträgt. Die absolute Helligkeit von Proxima Centauri beträgt

$$M = m + 5 \cdot (1 - \lg r) = 11^m 05 + 5^m \cdot (1 - \lg 1,3) = 15^m 48.$$

Trägt man die absolute Helligkeit als Funktion der Temperatur bzw. der Spektralklassen von Sternen auf, so liegen die meisten Sterne auf einer Reihe, der Hauptreihe.

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm HRD

Im Hertzsprung-Russell-Diagramm **HRD** ist die Spektralklasse oder die Effektivtemperatur auf der Abszisse und die absolute Helligkeit M oder die Leuchtkraft L der Sterne auf der Ordinate aufgetragen.

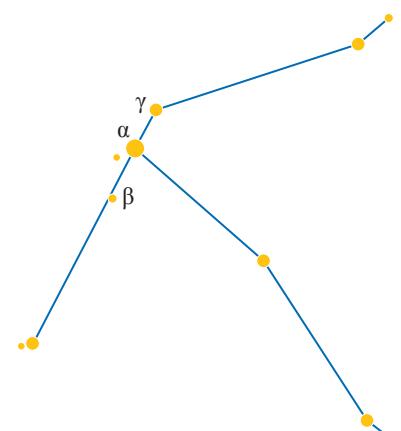


Altair ist der hellste Stern im Sternbild Aquila (Adler) und der zwölfthellste Stern am Nachthimmel ($m = 0^m 76$). Zusammen mit den Sternen **Wega** – dem Hauptstern des Sternbildes Leier – und **Deneb** – dem hellsten Stern im Sternbild Schwan – bildet Altair das **Sommerdreieck**.

$m_{\text{Wega}} = 0^m 03$ und $m_{\text{Deneb}} = 1^m 25$.



Zu den Sternspektren:
 O: heiße Sterne mit Absorptionslinien; besonders von He und H₂
 B: weiße Sterne mit Absorptionslinien des He
 A: weiße Sterne mit Absorptionslinien des H₂



Das Sternbild des Adlers ist ein markantes Sternbild des nördlichen Sommer- und Herbsthimmels



Die **visuelle** Helligkeit berücksichtigt nur die Leuchtkraft im **sichtbaren Spektralbereich**. Die absolute visuelle Helligkeit der Sonne beträgt 4^m,₈₃

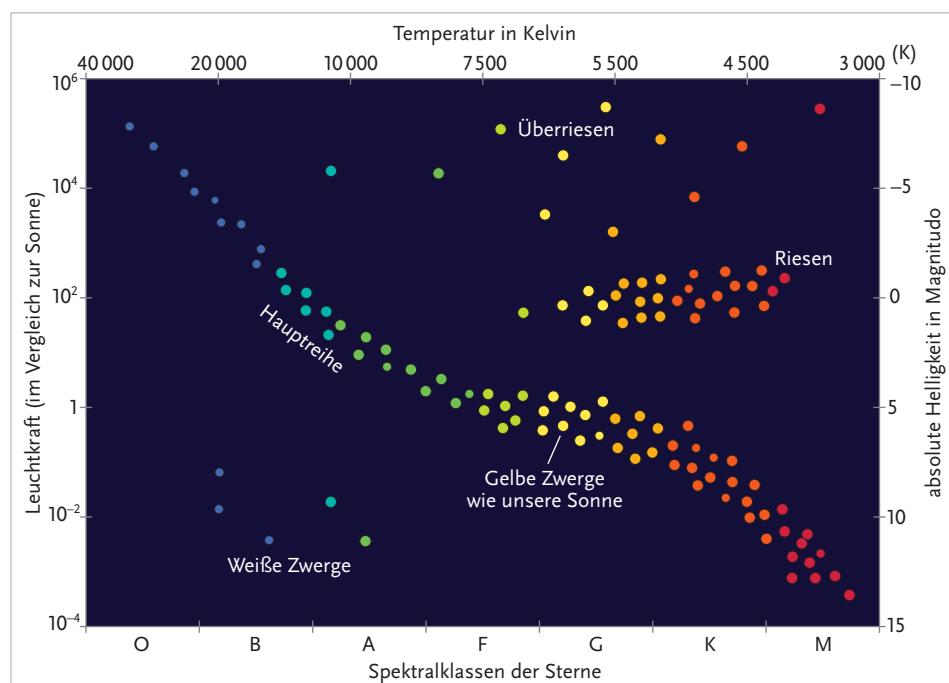
Ejnor Hertzsprung (1873 bis 1967) war ein dänischer und **Henry Norris Russell** (1877 bis 1957) ein amerikanischer Astronom.



Die **bolometrische Helligkeit** bezeichnet im Gegensatz zur visuellen Helligkeit die über das **gesamte elektromagnetische Spektrum** integrierte Leuchtkraft.

Die bolometrische Helligkeit wird manchmal mit dem Index bol bezeichnet, also M_{bol} oder m_{bol} , je nachdem ob die absolute oder scheinbare bolometrische Helligkeit gemeint ist.

Weil die Erdatmosphäre für große Teile des elektromagnetischen Spektrums undurchsichtig ist und kein Detektor den gesamten Spektralbereich erfassen kann, ist die bolometrische Helligkeit von der Erde aus nicht direkt bestimmbar.



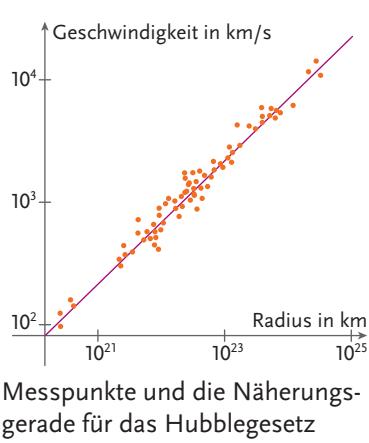
Traditionell werden die absolut hellsten Sterne oben und die Spektralklassen links beginnend aufgetragen. Im **HRD** häufen sich die klassifizierbaren Sterne in mehreren Gebieten. Die Mehrzahl liegt auf einem scharf begrenzten Ast, der **Hauptreihe**.

Die Hauptreihe erstreckt sich von den O-Sternen mit einer absoluten Helligkeit von etwa -6^m bis zu den M-Sternen mit M rund 9^m bis 16^m . Weitere Häufungsgebiete sind der **Riesenast**, der **Überriesenast** und die Gruppe der **weißen Zwerge**.

Die Hauptreihensterne verbleiben je nach ihrer Masse viele Milliarden Jahre in dieser Reihe. Bei der experimentellen Bestimmung der Sternspektren ist die Rotverschiebung zu beachten. Edwin Powell Hubble fand einen linearen Zusammenhang zwischen der Entfernung und der Fluchtgeschwindigkeit von Galaxien mit Entferungen bis ca. 15 Mpc.



EDWIN POWELL HUBBLE, 1889
BIS 1953, US-AMERIKANISCHER
ASTRONOM



Das Hubblegesetz

Die **Geschwindigkeit** v_r einer Galaxie relativ zur Erde ist proportional zur Entfernung r von der Erde.

$$v_r = H_0 \cdot r$$

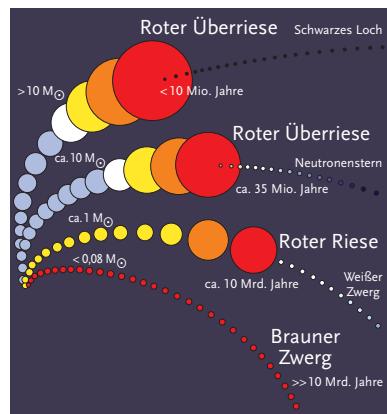
H_0 ist die Hubblekonstante mit H_0 rund 75 km/s/Mpc.

Die Expansion des Kosmos beschleunigt sich wegen der dunklen Energie (siehe Kap. 5.4.2). Diese Entdeckung wurde 2011 mit dem Physiknobelpreis gewürdigt. Daher favorisiert man heute das vierte Weltmodell der einsteinschen Relativitätstheorie, nachdem sich das Universum bis in alle Ewigkeit beschleunigt ausdehnt. Die Hypothese, dass sich die Expansion des Universums einmal umkehren könnte und das Universum auf einen Punkt zusammenschrumpft, scheidet, solange man nicht mehr Details über die Materiedichte im Kosmos und die dunkle Energie kennt, aus. Man geht derzeit davon aus, dass die beobachtete, ungleichmäßige Verteilung der Galaxien und Galaxienhaufen nur im Nahbereich der Erde, in einer Entfernung von weniger als 350 Millionen Lichtjahren, gilt. Das expandierende Universum ist sonst aber räumlich homogen und isotrop. Das haben neueste Untersuchungen an 240 000 Galaxien ergeben.



Ziele erreicht? – „Die Entwicklung von Sternen“

- 5.4.12** Geben Sie die Formel für die **Leuchtkraft** eines Sterns an.
- 5.4.13** Berechnen Sie das **Intensitätsverhältnis** der drei Sterne des Sommerdreiecks.
- 5.4.14** Wie groß ist die **scheinbare Helligkeit** eines Sterns, der ein Intensitätsverhältnis von 1 000 : 1 zur Sonne hat im Vergleich zur scheinbaren Helligkeit der Sonne?
- 5.4.15** Berechnen Sie die **effektive Temperatur** von Betelgeuze, wenn Sie den Radius und seine Leuchtkraft als bekannt voraussetzen.
- 5.4.16** Berechnen Sie den **Radius** von Pollux, wenn seine Leuchtkraft etwa das 32-Fache der Sonnenleuchtkraft und seine Effektivtemperatur rund 4 500 K beträgt.
- 5.4.17** Welchen **Radius** mit der 10-, 100- bzw. 1 000-fachen Leuchtkraft unserer Sonne muss ein Stern haben, wenn seine Effektivtemperatur rund 4 000 Kelvin beträgt?
- 5.4.18** Berechnen Sie die **Effektivtemperatur** eines Sterns mit der 10-fachen Sonnenleuchtkraft und dem dreifachen Sonnendurchmesser.
- 5.4.19** Berechnen Sie die **Leuchtkraft** eines Sterns mit dem vierfachen Sonnendurchmesser und einer Effektivtemperatur von 5 000 K.
- 5.4.20** Berechnen Sie mindestens vier Parameterkombinationen für den **Sternradius** und die **Effektivtemperatur**, wenn ein Stern die 50-fache Sonnenleuchtkraft haben soll.
- 5.4.21** Fassen Sie die **Sternleuchtkraft** als zweiparametrische Funktion von R und T_{eff} auf und skizzieren Sie L für Radien zwischen $R_{\text{Sonne}} / 1000$ und $100R_{\text{Sonne}}$ sowie für T_{eff} zwischen 3 000 K und 15 000 K.



In diesem Bild ist die Entwicklung eines Sterns in Abhängigkeit von seiner Masse im Vergleich zur Sonnenmasse M_{\odot} angedeutet



Bellatrix gehört als bläulicher Riesenstern der Spektralklasse B2 an und hat etwa die achtfache Sonnenmasse sowie etwa die 4 000-fache Sonnenleuchtkraft. In einigen Millionen Jahren wird sie zu einem roten Riesen werden, aber aufgrund ihrer etwas zu geringen Masse nicht explodieren, sondern als massereicher weißer Zwerg enden.

5.5 Higgs, das Standardmodell, SUSY und TOE

Am 4. Juli 2012 war das Higgs-Boson in beinahe allen internationalen Medien eines der Topthemen. Physikerinnen und Physiker des europäischen Forschungszentrums CERN verkündeten, am Beschleuniger LHC (Large Hadron Collider) ein neues Teilchen entdeckt zu haben, bei dem es sich um das schon 1964 postulierte Higgs-Boson handeln könnte. Das Higgs-Boson ist der letzte noch nicht experimentell nachgewiesene Baustein im Standardmodell der Elementarteilchenphysik und könnte, wenn sich das Boson als supersymmetrisches Teilchen outet, der Stringtheorie Aufschwung verleihen und vielleicht zu einer Theory of Everything (TOE) beitragen.

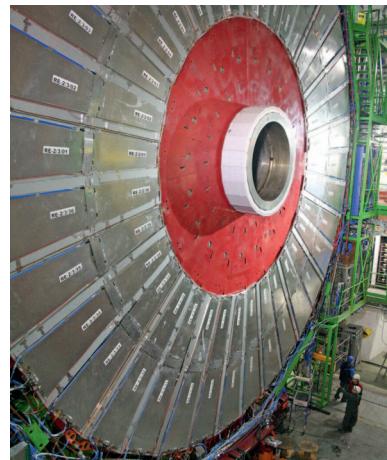
5.5.1 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- das **Standardmodell der Elementarteilchen** wiedergeben;
- die drei **fundamentalen Kräfte des Standardmodells** bezüglich ihrer Reichweite beschreiben.



Das CMS (**Compact-Myon-Solenoid**) ist ein Teilchendetektor am LHC (Large Hadron Collider) in CERN



Ein **Solenoid** ist eine Zylinderspule zum Erzeugen eines räumlich möglichst konstanten Magnetfeldes. Zum Magnetismus siehe auch Kap. 4, Elektrodynamik.

 Elementarladung
 $e \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
 Ladung des Elektrons = $-e$
 Ladung des Protons = $+e$

| Quark | Ruheenergie $m_0 \cdot c^2$ | Ladung/ e |
|---------|--------------------------------|-------------|
| up | 2 MeV | +2/3 |
| down | 5 MeV | -1/3 |
| strange | 950 MeV | -1/3 |
| charm | 1 250 MeV | +2/3 |
| bottom | 4 200 MeV | -1/3 |
| top | 173 000 MeV | +2/3 |

Die sechs Quarks, ihre Massen (in MeV) und ihre elektrischen Ladungen

 Ladung des up-Quark = +2/3e
 Ladung des down-quark = -1/3e

| Lepton | Ladung/ e |
|-------------------|-------------|
| Elektron | -1 |
| Myon | -1 |
| Tau | -1 |
| Elektron-Neutrino | 0 |
| Myon-Neutrino | 0 |
| Tau-Neutrino | 0 |

Die sechs Leptonen und ihre elektrischen Ladungen

 **Leptonen** sind Teilchen, die nur der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung unterliegen.

 **Hadronen** sind aus Quarks zusammengesetzte Teilchen, die der starken Wechselwirkung unterliegen.

Um ein Stück Materie – denken Sie beispielsweise an ein Stück Würfzucker – „erklären“ zu können, benutzen Physikerinnen und Physiker ihr Standardmodell der Elementarteilchen. Dieses besteht aus **zwölf elementaren Materieteilchen** und den **Eichbosonen**. Eichbosonen sind Wechselwirkungsteilchen. Sie übertragen also Kräfte. Das bekannteste Eichboson ist das Photon, das für die Übertragung der elektromagnetischen Kraft verantwortlich ist.

Das Standardmodell behandelt alle diese „Partikel“ als geometrische Punkte. Wie-der erkennen wir die notwendige Modellierung eines Materieteilchens als aus-dehnungslosen Massenpunkt, wie es bereits Isaac Newton vorgezeigt hat. In der Stringtheorie wird diese Einschränkung des geometrischen Punktes zugunsten ei-nes eindimensionalen Strings (Fadens) aufgegeben.

Die **zwölf elementaren Materieteilchen** sind eingeteilt in

- sechs Quarks und
- sechs Leptonen.

6 Quarks und 6 Leptonen ergeben 12 elementare Materieteilchen

- **6 Quarks:** up, down, strange, charm, bottom und top heißen sie nach ihrer Masse (zumeist angegeben gemäß $E = m \cdot c^2$ in Vielfachen von eV) geordnet.
- Die elektrische Ladung des up-, charm- und top-Quarks beträgt +2/3 der Elementarladung e .
- Die elektrische Ladung des down-, strange- und bottom-Quarks beträgt -1/3 der Elementarladung e .
- Aus den Quarks sind Protonen, Neutronen und ein Teilchenzoo sehr kurzlebi-ger Teilchen aufgebaut. Quarks tragen eine sogenannte Farbladung (rot, grün oder blau) und wurden nie einzeln beobachtet.
- **6 Leptonen:** Das **Elektron** und das **Elektron-Neutrino**, das **Myon** und das **My-on-Neutrino** und das **Tau** und das **Tau-Neutrino**.
- Leptonen lassen sich einzeln beobachten und sind immun gegen die starke Kraft (Kernkraft).

Beispiel 5.5.01: Das Proton, das Neutron und ihre Bestandteile

- Ein **Proton** besteht aus zwei up-Quarks und einem down-Quark und hat daher die Ladung $(2 \cdot 2/3 - 1/3) \cdot e = e$.
- Ein **Neutron** besteht aus einem up-Quark und zwei down-Quarks und ist daher elektrisch neutral: $(2/3 - 2 \cdot 1/3) \cdot e = 0$.

Jede Wechselwirkung (Kraft) wird durch ein **Eichboson (Eichbosonengruppe)** über-tragen.

Beispiel 5.5.02: Das Photon und die elektromagnetische Wechselwirkung

Als Sonderfall der elektromagnetischen Wechselwirkung haben wir in der Elektro-statik das **coulombsche Kraftgesetz** für zwei ruhende elektrische Punktladungen kennengelernt. Zwei elektrische Punktladungen q_1 und q_2 im Abstand r üben auf-einander die Coulombkraft

$$F_{\text{Coulomb}} = k \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

mit $k \approx 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ aus. Wir erkennen, dass selbst für beliebig große Ab-stände r die Kraft nicht verschwindet, sodass uns die **unendliche Reichweite** der elektromagnetischen Wechselwirkung einleuchtet.

Die Eichbosonen – Vermittler der Kräfte

- Das **Photon** (elektrische Ladung = 0 e, Ruheenergie = 0 eV) überträgt die **elektromagnetische Kraft** über unbegrenzte Entferungen hinweg auf elektrisch geladene Teilchen.
- Das **Z-Boson** (0 e, 91 GeV) überträgt die **schwache Wechselwirkung** bei Reaktionen, welche die Identität der Teilchen nicht ändert. Reichweite rund 10^{-18} m.
- Die **W^+/W^- -Bosonen** (+1e oder -1e, 80,4 GeV) übertragen die schwache Wechselwirkung bei Reaktionen, bei denen sich der „Geschmack“ (Flavour) und die Ladung der Teilchen ändern. Reichweite rund 10^{-18} m.
- Die acht verschiedenen **Gluonen** (0 e, 0 eV) übertragen die **starke Wechselwirkung**, wobei sie auf Quarks und andere Gluonen wirken. Sie sind immun gegen die elektromagnetische und schwache Wechselwirkung. Reichweite kleiner als 10^{-15} m.
- Das **Higgs** (2012 mutmaßlich am LHC beobachtet) (0 e, 125 bis 126 eV) soll Quarks, Leptonen und Z-/W-Bosonen mit Masse ausstatten.

Mit Quarks, Leptonen und Eichbosonen können die starke Wechselwirkung, der Elektromagnetismus und die schwache Wechselwirkung sowie (voraussichtlich) die Higgs-Wechselwirkung erklärt werden. Die Higgs-Wechselwirkung erklärt die Masse von Quarks, Leptonen und Z-/W-Bosonen durch die Wechselwirkung mit einem Higgs-Feld sowie die Herabsetzung der Reichweite der schwachen Kraft.

Die schwache Wechselwirkung wirkt auf Quarks und Leptonen. Ihr bekanntester Effekt ist der radioaktive Betazerfall, bei dem im Kern ein Neutron in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Neutrino umgewandelt wird.

Beispiel 5.5.03: Der Betazerfall

Im Standardmodell wandelt sich dabei im Kern ein d-Quark (down-Quark) in ein u-Quark (up-Quark) um. Dadurch wird ein Neutron zu einem Proton und zusätzlich entstehen ein Elektron und ein Elektron-Neutrino.

Neutrinos und Photonen sind die häufigsten Teilchen im Universum. Das elektrisch neutrale und sehr leichte Neutrino wurde vom Österreicher Wolfgang Pauli zur Erklärung der Energiebilanz beim Betazerfall vorerst noch als unbekanntes Teilchen 1930 gefordert. Enrico Fermi gab diesen mysteriösen Teilchen den Namen Neutrino, kleines Neutron. 1956 wurde das Neutrino bei einem Experiment an einem Kernreaktor erstmals nachgewiesen. Heute dienen Neutrinos auch als Sonden zur Erforschung des Erdinneren und für neuartige Teleskope in der Astronomie, weil sie mühelos Kontinente, Planten und Sterne durchdringen.



Ziele erreicht? – „Das Standardmodell der Elementarteilchen...“

- 5.5.01 Geben Sie die Protagonisten des **Standardmodells der Elementarteilchen** an.
- 5.5.02 Geben Sie die Zusammensetzung eines Protons und eines Neutrons aus drei **Quarks** an.
- 5.5.03 Recherchieren Sie aktuelle Beiträge vom LHC (large hadron collider) zum **Higgs-Teilchen**.
- 5.5.04 Begründen Sie mithilfe einer Formel die **Reichweite** der **elektromagnetischen Wechselwirkung**.

| Kraft | Reichweite |
|--------------------------|----------------|
| Elektromagnetische Kraft | ∞ |
| Schwache Kraft | $< 10^{-18}$ m |
| Starke Kraft | $< 10^{-15}$ m |

Die drei fundamentalen Kräfte im Standardmodell



Betazerfall sowie natürliche Radioaktivität siehe auch Kap. D, 5.3.4.

Zur Aufgabe 5.5.03: ATLAS ist ein Teilchendetektor am LHC in Cern. ATLAS stand ursprünglich für A Toroidal LHC Apparatus, wird aber mittlerweile nur noch als Eigenname benutzt.



Pro Sekunde werden mehrere tausend Neutrinos von unserem Körper emittiert. Denn in unseren Knochen ist der β -Strahler Kalium eingebaut.



Das Higgs-Teilchen wurde im Vorfeld der Nobelpreisverleihung für Physik 2012 als Göttesteilchen bezeichnet und die Entdecker wurden als Kandidaten für den Nobelpreis gehandelt. Dieser wurde am 9. September den beiden Quantenphysikern **Serge Haroche** (Frankreich) und **David Wineland** (USA) zugesprochen.



TOE = Theory of Everything

String: englisch für Faden.



Wunderbar zu unserem Kompetenzbereich „Physikalische Phänomene und Methoden“ passt die Aussage von Siegfried Bethke. Er ist Direktor am Max-Planck-Institut für Physik in München, spielt eine führende Rolle am CERN und ist maßgeblich am LHC-Experiment ATLAS beteiligt: „Die Entdeckung fällt allerdings in eine Zeit, in der sich allmählich das Bewusstsein der Stringtheoretiker entwickelt, dass sie ihre Theorie auch phänomenologisch verankern sollten. Sie müssen Voraussagen treffen, die in Experimenten überprüft werden können.“



SUSY = Supersymmetrie



Beachtlich ist auch die unglaubliche technische und organisatorische Leistung der rund 3 000 am ATLAS-Team Beteiligten. Die sich daraus rekrutierende etwa 300-köpfige Higgs-Gruppe wird von der deutschen Physikerin Sandra Kortner geleitet.

| Kraft | relative Stärke | Reichweite |
|--------------------------|-----------------|------------------------|
| Gravitationskraft | 10^{-38} | ∞ |
| Elektromagnetische Kraft | 10^{-2} | ∞ |
| Schwache Kraft | 10^{-13} | $< 10^{-18} \text{ m}$ |
| Starke Kraft | 1 | $< 10^{-15} \text{ m}$ |

Wann wird es eine einheitliche Theorie – eine TOE – aller vier fundamentalen Kräfte geben? Die relative Stärke der Wechselwirkungen ist relativ zur starken Kraft angegeben.

5.5.2 Theory of Everything – TOE

Das Standardmodell der Elementarteilchen kann „nur“ drei fundamentale Kräfte (starke und schwache Wechselwirkung und Elektromagnetismus) erklären. Die vierte Naturkraft – die Gravitation – widersetzt sich bisher einer Vereinheitlichung. In einer Theory of Everything – einer Theorie für alles oder kurz Weltformel genannt – möchten die Physikerinnen und Physiker alle vier fundamentalen Kräfte vereinheitlichen.



Meine Ziele

Nach Bearbeitung dieses Kapitels kann ich

- die Abkürzungen **SUSY** und **TOE** erklären;
- einen Kandidaten für TOE nennen und den Namen und das zugehörige physikalische Modell (eines Fadens) erklären.

Beim Standardmodell wurde bereits die Modellierung aller „Elementarbausteine“ als dimensionslose geometrische Punkte behandelt. In der **Stringtheorie** wird der geometrische Punkt zugunsten eines in die Länge gezogenen eindimensionalen **Strings (Fadens)** aufgegeben. An die Stelle der Elementarbausteine des Standardmodells treten jetzt submikroskopische „schwingende Fäden“. Die Stringtheorie versucht, alle vier Grundkräfte zu einer einheitlichen Theorie zusammenzufassen, wobei die Supersymmetrie (kurz SUSY) zwingend vorausgesetzt wird. Manche zweifeln an der Stringtheorie, weil die Ergebnisse der letzten rund 30 Jahre Forschungsarbeit zu dürfsig seien. Die Stringtheoretiker blicken auch deshalb gespannt zu den ungeheuer aufwendigen Auswertungen der bisherigen und künftigen Messungen am LHC bezüglich Supersymmetrie.

SUSY

Zwischen **Bosonen** (Teilchen mit ganzzahligem Spin) und **Fermionen** (Teilchen mit halbzahligem Spin) existiert eine **fundamentale Symmetrie**.

Bisher konnte diese Symmetrie nicht nachgewiesen werden und so hoffen die Stringtheoretiker auf ein supersymmetrisches Higgs-Teilchen. Erschwerend kommt hinzu, dass bereits im Standardmodell rund 25 freie Parameter existieren. Die Parameter müssen durch Messungen ermittelt werden. Diese Parameterzahl wird in der Supersymmetrie verfünffacht. Daher kann die Supersymmetrie nur wenig voraussagen, Entdeckungen aber im Nachhinein erklären.

Den Bogen zurück zur zuvor behandelten Kosmologie schaffen wir mit der Stringtheorie. Genauer mit dem vermutlich leichtesten supersymmetrischen Teilchen, das keine Ladung besitzt und derzeit der heißeste Kandidat für die dunkle Materie im Universum ist.



Ziele erreicht? – „Theory of Everything – TOE“

- 5.5.05** Beschreiben Sie, was mit **SUSY** und **TOE** gemeint ist.

- 5.5.06** Recherchieren Sie aktuelle Beiträge zur **Stringtheorie**.

A „Chemische Technologie“ – Antworten

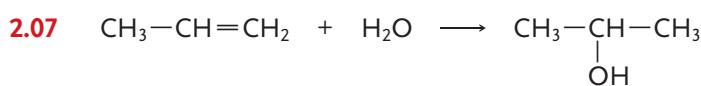
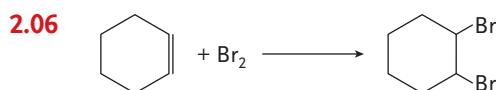
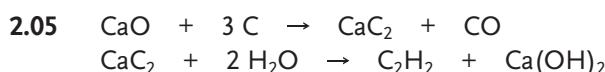
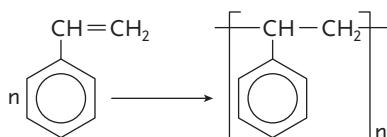
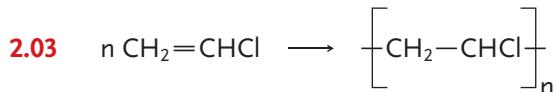
1 Fossile Brennstoffe

- 1.01** Steinkohle hat den höheren Heizwert, weil sie den höheren C-Gehalt aufweist.
(Dazu kommt, dass Braunkohle meist einen höheren Wassergehalt hat.)
- 1.02** $C_{16}H_{34}$. „Hexadecan wird wegen seiner hohen Zündwilligkeit für die Definition der Cetanzahl verwendet ($CZ = 100$).“
- 1.03** Benzin: Erdöl wird der Primärdestillation (atmosphärische Destillation) unterzogen. Benzin gehört dabei zu den Topfraktionen. Anschließend wird entschwefelt (Clausverfahren) und durch Reformieren die Octanzahl erhöht. – Ein Teil des Benzins stammt aus dem Cracken von Produkten der Vakuumdestillation (ebenfalls entschwefelt und reformiert).
Dieseltreibstoff: Die Dieselfraktion der Primärdestillation muss entschwefelt werden. Weitere Verfahrensschritte sind nicht zwingend notwendig. – Auch bei Dieseltreibstoff stammt ein Teil aus dem Cracken.
- 1.04** 98 % 2,2,4-Trimethylpentan mit 2 % Heptan.
- 1.05** Durch Alkohole und Ether.
- 1.07** $\Delta H = -33\,053 \text{ kJ}$
- 1.08** Der Autoabgaskatalysator für den Ottomotor reduziert die Schadstoffe in den Abgasen um über 90 %. Er wandelt Stickoxide, Kohlenstoffmonoxid und unverbranntes Benzin in Kohlenstoffdioxid, Wasser und Stickstoff um.
Der Partikelfilter für den Dieselmotor hält rein mechanisch einen guten Teil Rußteilchen zurück. Von Zeit zu Zeit werden die Partikel nachverbrannt.

2 Petrochemie – Kohlenwasserstoffe

2.01 0,25 Sekunden bzw. 850°C .

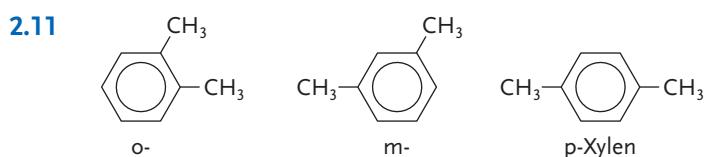
- 2.02** $\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$
 $\text{CH}_3\text{Cl} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{HCl}$
 $\text{CH}_2\text{Cl}_2 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CHCl}_3 + \text{HCl}$
 $\text{CHCl}_3 + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{CCl}_4 + \text{HCl}$



2.08 $\text{CH}_2=\text{C}=\text{CH}_2$ Propadien

- 2.09** a) $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Br}-\text{CHBr}-\text{CH}=\text{CH}_2$
b) $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2 + \text{Br}_2 \rightarrow \text{CH}_2\text{Br}-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}_2\text{Br}$

2.10 C_8H_{10}



2.12 Das mittlere C-Atom wäre sechsbindig.

2.13 Weil Benzen die Octanzahl in den Bereich von Superbenzin hebt.

2.14 C₁₄H₁₀

2.15 2; 3; 10



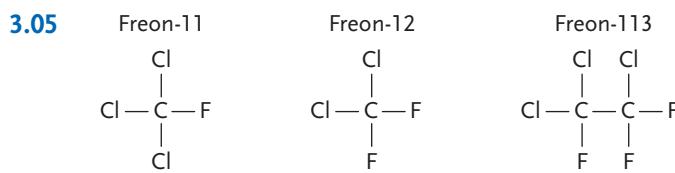
3 Halogenkohlenwasserstoffe

3.01 Die Wirkung eines Fleckputzmittels beruht auf der Fettlösekraft des Lösungsmittels (lipophiles Verhalten). Dabei spielt der eingesetzte Putzlappen und die gut saugfähige Unterlage eine wichtige Rolle. Die Nachteile chlorfreier Produkte sind die oft leichte Entflammbarkeit und in manchen Fällen die geringere Fettlösekraft.

3.02 Die Abkürzung DDT kommt vom Namen Dichlordiphenyltrichlorethan.

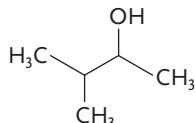
3.03 Man findet die Rückstände in fettreichen Nahrungsmitteln, weil DDT und 2,4,5-T sehr gut fettlöslich sind. Über die Nahrungskette wird es im Fettgewebe angereichert.

3.04 Das Entlaubungsmittel Agent Orange wurde in Fässern geliefert, die mit orangefarbenen Streifen gekennzeichnet waren. Die Verunreinigung von Agent Orange mit Dioxin hat bis heute weit reichende Spätfolgen, wie Missbildungen und Krebskrankungen.

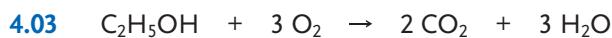


4 Alkohole – Phenole – Ether

4.01 3-Methylbutan-2-ol ist ein sekundärer Alkohol.



4.02 Die OH-Gruppe ist ein Dipol, der zu Wasserstoffbrücken und somit zu einer starken Anziehung zwischen den Alkoholmolekülen führt. Dadurch wird der Siedepunkt deutlich erhöht.



4.04 Berechnung des Sauerstoffgehalts von Methanol und Ethanol:

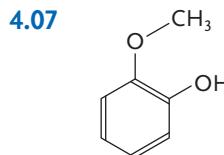
$$m(\text{CH}_3\text{OH}) = 32 \text{ u}, m(\text{O}) = 16 \text{ u} \quad \text{Sauerstoffgehalt: } 50 \%$$

$$m(\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}) = 46 \text{ u}, m(\text{O}) = 16 \text{ u} \quad \text{Sauerstoffgehalt: } 34,8 \%$$

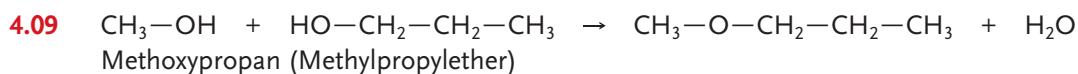
Dieser Sauerstoff im Molekül fördert zwar die Verbrennung, trägt aber nicht zum Heizwert bei. Die im Benzin enthaltenen Moleküle sind Kohlenwasserstoffe und enthalten keinen Sauerstoff.

4.05 E85 und E10 sind Mischungen von Alkohol mit Benzin. Für die Mischbarkeit ist der hydrophobe Teil im Ethanolmolekül verantwortlich. Bei reinem Ethanol wäre die Gefahr der Verfälschung mit Wasser sehr groß.

4.06 Durch die Behandlung von Steinkohlenteer mit Natronlauge bildet sich das Na-Phenolat, das sich in der Lauge löst. Die Lauge kann vom stark hydrophoben Steinkohlenteer abgetrennt werden. Durch Zugabe einer starken Säure wird das Phenolat-Ion aus seinem Salz verdrängt und liegt als Phenol vor. Eine weitere Reinigung erfolgt durch Destillation.



4.08 Die Verringerung des Siedepunktes von Ethern gegenüber Alkoholen mit der gleichen Summenformel hängt mit dem Fehlen von OH-Gruppen im Molekül zusammen. Ether bilden keine zwischenmolekularen Wasserstoffbrücken aus. Die Wechselwirkungen zwischen den Molekülen sind auf die schwachen Van-der-Waals-Kräfte beschränkt.



4.10 ein Ether ein Amin ein Phenol ein Aldehyd eine Carbonsäure ein Ester ein Keton ein FCKW

5 Aldehyde und Ketone

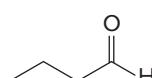
5.01 * Aldehyde sind reaktiver als Ketone.

* Aldehyde sind bei gleicher Kohlenstoffzahl in Wasser schlechter löslich als Ketone.

* Aldehyde können zu Carbonsäuren oxidiert werden, Ketone nicht.

* Ketone zeigen keine positive Reaktion mit fehlingscher Lösung.

5.02 Man gewinnt Butanal.



5.03 Propan-1-ol hat den höheren Siedepunkt, da sich zwischen den Molekülen Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden.

5.04 Durch die reduzierende Wirkung des Aldehyds werden die Silberionen zu elementarem Silber reduziert. Der Aldehyd wird zur Carbonsäure oxidiert. Die Lösung färbt sich durch das fein verteilte Silber zunächst schwarz, bis sich ein Silberspiegel an der Wand der Proberöhre abscheidet (Silberspiegelreaktion).

5.05 Die desinfizierende Wirkung von Formalin beruht auf seiner denaturierenden (die Struktur verändernden) Wirkung auf Eiweiß. Es werden die Oberflächenproteine von Mikroorganismen zerstört.

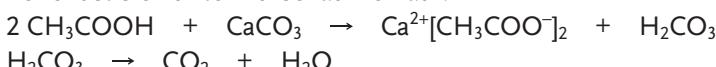
5.06 Paraldehyd und Metaldehyd gehören zu den cyclischen Ethern.

5.07 Substanzname: 3,3-Dimethylpentan-2-on

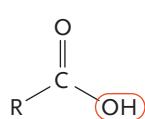
Der Ausgangsstoff zur Herstellung ist 3,3-Dimethylpentan-2-ol. Die Herstellung erfolgt durch Oxidation (Dehydrierung) des Alkohols.

6 Carbonsäuren und Carbonsäureester

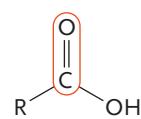
6.01 Eine Perle besteht zum überwiegenden Teil aus Calciumcarbonat. Speiseessig ist eine etwa 5%ige Lösung von Essigsäure in Wasser. Die Essigsäure ist eine stärkere Säure als die Kohlensäure. Sie verdrängt die Kohlensäure aus ihrem Salz (CaCO_3 ist ein Salz der Kohlensäure). Kohlensäure ist instabil und zerfällt in CO_2 und H_2O . Die Perle löst sich unter Aufschäumen auf.



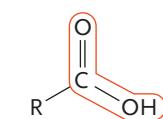
6.02



Hydroxygruppe



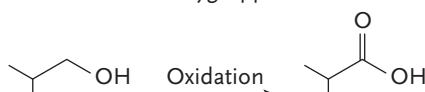
Carbonylgruppe



Carboxygruppe

6.03

Es entsteht die Methylpropansäure:

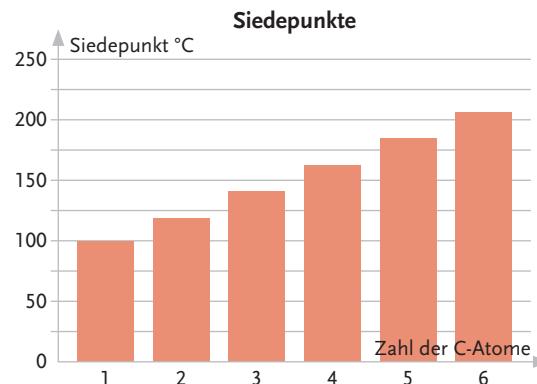
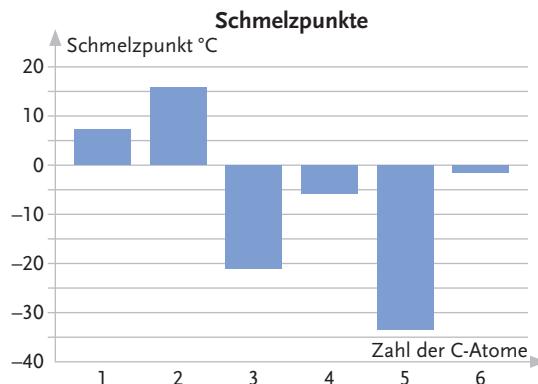


6.04

Das Chloratom übt in beiden Molekülen einen stark Elektronen anziehenden Effekt aus ($-I$ -Effekt). Dadurch ist die Bindung des Protons an der Hydroxygruppe stark polarisiert und seine Abspaltung wird erleichtert. Bei der Trichlorethansäure ist dieser $-I$ -Effekt durch die drei Chloratome wesentlich stärker. Darauf beruht der deutlich kleinere pK_a -Wert.

6.05

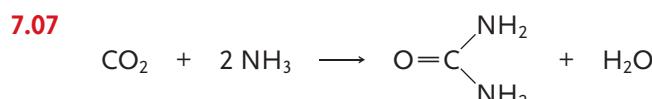
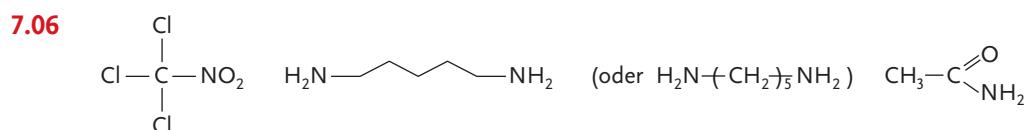
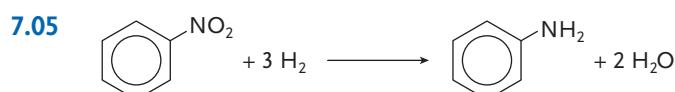
Die Siedepunkte steigen mit der C-Zahl linear an. Die Höhe der Schmelzpunkte liegt an der Bildung von Carbonsäuredimeren. Die Schmelzpunkte der ungeradzahligen Carbonsäuren sind deutlich niedriger als die Schmelzpunkte der geradzahligen Carbonsäuren. Im festen Zustand führt die Molekülstruktur bei geradzahligen Carbonsäuren dazu, dass die Wechselwirkungen zwischen den Kohlenstoffketten höher sind als bei ungeradzahligen. Die Moleküle der geradzahligen Carbonsäuren liegen enger beieinander.



- 6.06** Die Oxidation von Methansäure ergibt im ersten Schritt Kohlensäure (H_2CO_3). Sie ist instabil und zerfällt zu Kohlenstoffdioxid und Wasser. Der Nachweis beruht auf der Reaktion von gelöstem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (Kalkwasser) mit CO_2 zu unlöslichem CaCO_3 (Trübung).
- 6.07** Der Schmelzpunkt reiner, wasserfreier Essigsäure liegt bei 17 °C. Daher erstarrt die Essigsäure bereits in einem etwas kühleren Raum.
- 6.08** Die Droge ist Heroin. Sie wird durch Reaktion von Morphin mit Essigsäureanhydrid hergestellt.
- 6.09** Zur Herstellung von Dichlorprop wird Propansäure verwendet. Das Molekül hat ein Stereozentrum und ist optisch aktiv.
- 6.10** Der Zusatzstoff E 202 ist das Konservierungsmittel Kaliumsorbat, das Kaliumsalz der Sorbinsäure.
- 6.11** Als Carbonsäure wird Benzencarbonsäure verwendet.
- 6.12** Gerüstformel der Ehandisäure:
- $$\begin{array}{c} \text{OH} & & \text{O} \\ & \text{C} \text{---} & \text{C} \text{---} \text{OH} \\ & | & | \\ \text{O} & & \text{O} \end{array}$$
- 6.13** Strukturformel der Terephthalsäure:
- $$\begin{array}{c} \text{O} & & & \text{O} \\ & \text{C} \text{---} & \text{C} \text{---} & \text{C} \text{---} \text{O} \\ & | & & | \\ \text{HO} & & & \text{OH} \\ & & & | \\ & & & \text{O} \end{array}$$
- 6.14** Wenn Ca^{2+} -Ionen und Oxalationen aufeinandertreffen, bildet sich sofort schwer lösliches Ca-Oxalat. In der Niere werden Nierensteine gebildet.
- 6.15** Als **Chiralität** bezeichnet man die Eigenschaft von Molekülen, die sich, bedingt durch die räumliche Anordnung ihrer Atome, wie Bild und Spiegelbild verhalten. Die Moleküle, **Enantiomere** genannt, können nicht zur Deckung gebracht werden. Die Ursache der Chiralität ist das Vorhandensein eines **Stereozentrums** im Molekül (meist eines Kohlenstoffatoms mit vier verschiedenen Substituenten). Chirale Stoffe sind **optisch aktiv**, d. h., sie drehen die Schwingungsebene von linear polarisiertem Licht. Eine 1:1-Mischung von Enantiomeren nennt man **Racemat**. Diese Mischung ist optisch inaktiv.
- 6.16** Zwei Enantiomere der Hydroxybutandisäure (Äpfelsäure) in der Fischerprojektion:
- | | |
|---|---|
| $\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{HO} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \\ \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \\ \text{COOH} \end{array}$ | $\begin{array}{c} \text{COOH} \\ \\ \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{OH} \\ \\ \text{H} \text{---} \text{C} \text{---} \text{H} \\ \\ \text{COOH} \end{array}$ |
| <i>L</i> -Äpfelsäure | <i>D</i> -Äpfelsäure |
- 6.17** Zwei Milchsäuremoleküle reagieren miteinander und verbinden sich unter Wasserabspaltung. Es findet eine Veresterung statt.
- 6.18** $3 \text{Ca}(\text{OH})_2 + 2 \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \rightarrow \text{Ca}_3(\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7)_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$
- 6.19** Das Zwischenprodukt bei der Milchsäuresynthese ist das Lactonitril (2-Hydroxypropanitril).
- 6.20** Es handelt sich um eine Veresterung.
- $$\begin{array}{ccc} \text{OH} & & \text{O} \\ | & & || \\ \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{COOH} & + & \text{HO---CH}_3 \xrightarrow{\text{H}_2\text{SO}_4 \text{ Kat.}} \text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{COOCH}_3 & + \text{H}_2\text{O} \end{array}$$
- 6.21** Die Ausgangsstoffe zur Herstellung von Aspirin sind 2-Hydroxybenzencarbonsäure (Salicylsäure) und Ethansäure (Essigsäure) bzw. Ethansäureanhydrid. Die chemische Reaktion ist eine Veresterung.
- 6.22** Als Nebenprodukt der Umesterung entsteht der dreiwertige Alkohol Propantriol (Glycerol).
- ## 7 Organische Stickstoffverbindungen
- 7.01**
- $$\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array} + 3 \text{HNO}_3 \longrightarrow \begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ | \\ \text{O}_2\text{N} \text{---} \text{C}_6\text{H}_3\text{NO}_2 \\ | \\ \text{NO}_2 \end{array} + 3 \text{H}_2\text{O}$$
- 7.02** Es entstehen giftige Gase, die unter Tage die Bergleute gefährden könnten.



7.04 Sie können kein Proton einfangen, weil das Stickstoffatom in quartären Verbindungen kein freies Elektronenpaar besitzt.

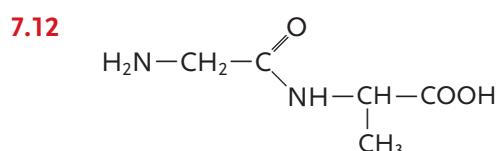


7.08 Ethansäureamid, Harnstoff, Benzenamin, Ethanamin, Natronlauge

7.09 Benzen, Anilin (Benzenamin), Ethanamin, Harnstoff



7.11 Sekundäres Amin, primäres (aromatisches) Amin, Nitroverbindung, Salpetersäureester (Nitrat), Nitril, Aminosäure, quartäres Ammoniumsalz



7.13 Pyrrol, Pyridin, Pyrrolidin

8 Makromolekulare Substanzen

8.01 Cellulose wird von β -D-Glucose aufgebaut. Dies bedingt zickzackförmige Moleküle, die als Faserstoffe geeignet sind. Stärke wird von α -D-Glucose gebildet. Dies bedingt einen spiralen Aufbau, der zu knäuelförmigen Strukturen führt. Für Stärke besitzt der menschliche Körper Verdauungsenzyme.

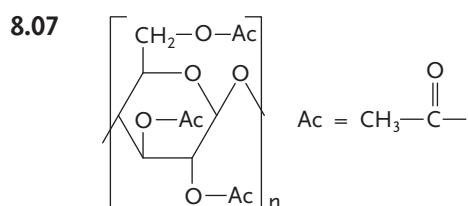
8.02 Cellulose (inklusive Hemicellulose rund 70 %) und Lignin (etwa 25 %)

8.03 CaCO_3

8.04 Viskoseverfahren und Lyocellverfahren

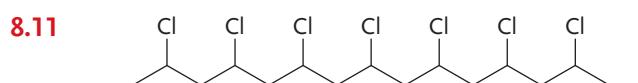
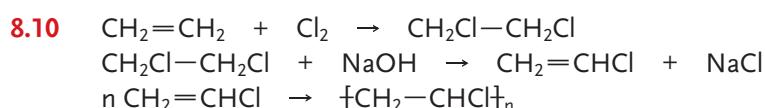
8.05 Der Viskose wird die für das Lösen der Cellulose notwendige Natronlauge durch die Schwefelsäure (Neutralisation zu Natriumsulfat) entzogen.

8.06 Weil sie sowohl gegen Natronlauge als auch gegen Schwefelsäure beständig sein müssen



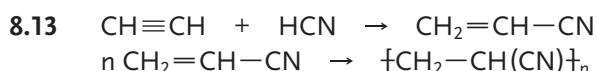
8.08 Weil Verzweigungen die Bildung einer kristallinen Ordnung erschweren

8.09 Styren (Styrol)

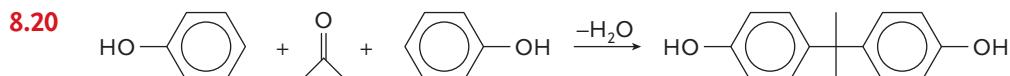
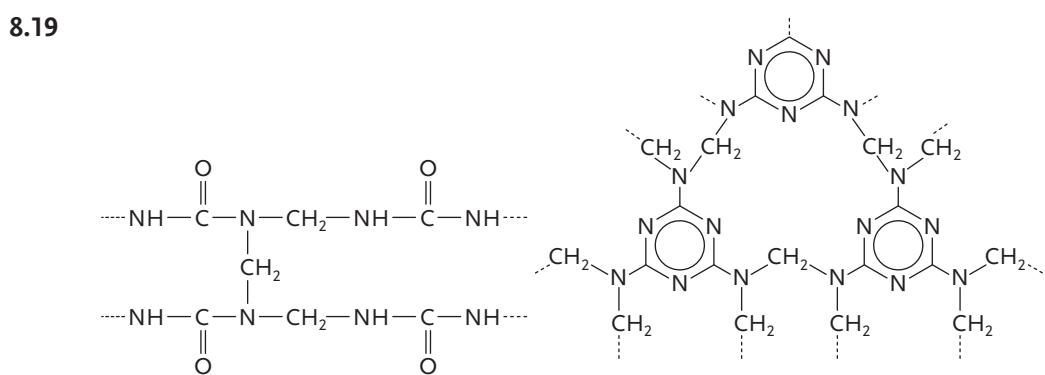
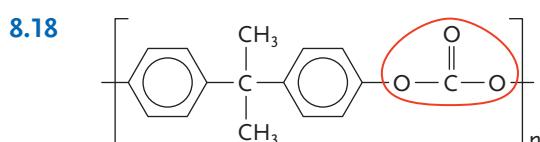
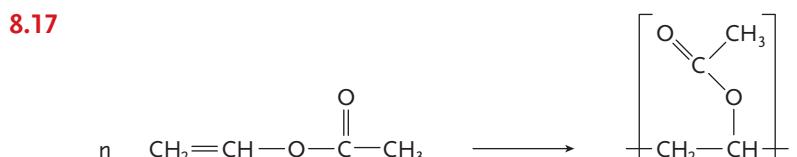
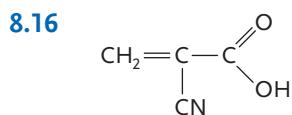
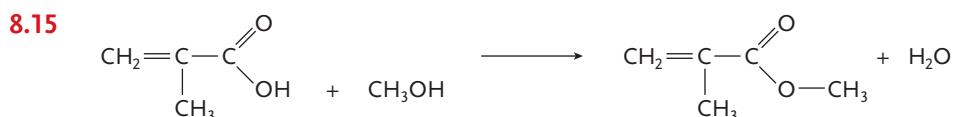


8.12 $M = 1\,120\,000 \text{ g/mol}$

Antworten



8.14 Weil die Verzweigungen der Kette kristalline Strukturen verhindern



8.21 PTFE

8.22 HOOC-CH=CH-COOH

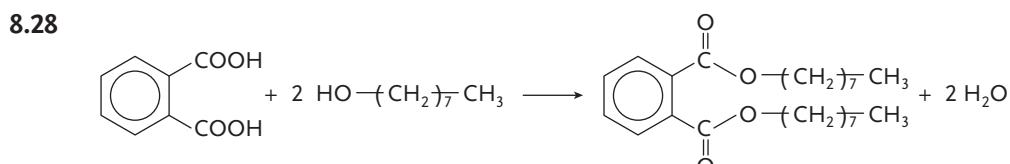
8.23 E/Z-Isomerie

8.24 Das freie Elektronenpaar sorgt dafür, dass ein durchgehendes π -Elektronensystem im Molekül vorliegt. Dieses ist verantwortlich für Leitfähigkeit und Farbe.

8.25 Einwegspritzen, Blutbeutel, Pflaster, Fasern für Nähte, Gelenkprothesen, künstliche Blutgefäße, künstliche Darmteile, künstliche Linsen nach Staroperationen, künstliche Nasen und Ohren nach Unfällen

8.26 Axialpumpe aus PU für ein menschliches Herz

8.27 Hohe Festigkeit bei geringer Masse, geringe Materialermüdung, geringe Korrosion



8.29 CaCO₃; ein Gemisch unterschiedlichster Silicate, das nicht kristallisiert

8.30 Die parallelisierten Makromoleküle machen die Fasern zugfest.

8.31 Beides ist möglich. Anorganische Farbstoffe haben eine höhere Deckkraft und bleichen weniger leicht aus, organische Farbstoffe haben eine höhere Brillanz.

8.32 Noch vorhandene Doppelbindungen der ungesättigten Fettsäuren reagieren im Laufe der Zeit mit dem Luftsauerstoff. Dadurch wird der Kunststofffilm hart und spröde.

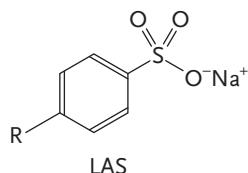
- 8.33** Thermoplaste
- 8.34** PE und PP
- 8.35** Schwer brennbar sind PVC, PC, UF, MF und CA.
- 8.36** Rußend brennen vor allem PS, PET und PC. Sie enthalten Aromaten und damit sehr viel Kohlenstoff im Verhältnis zu Wasserstoff.
- 8.37** Proteine wie Haare, Horn (und auch Wolle) zeigen wie das PA die Amidbindung (Peptidbindung).

9 Wasch- und Reinigungsmittel

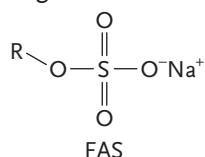
- 9.01** Tenside haben einen unpolaren, hydrophoben (wasserfeindlichen) und einen polaren, hydrophilen (wasserfreundlichen) Molekülteil. Der hydrophobe Teil ist zumeist ein linearer Kohlenwasserstoffrest, der 10 bis 20 Kohlenstoffatome umfasst. Der hydrophile Teil ist je nach Tensidart unterschiedlich aufgebaut.
Anionische Tenside haben einen negativ geladenen hydrophilen Molekülteil. **Kationische Tenside** sind quartäre **Ammoniumverbindungen** und haben einen positiv geladenen hydrophilen Molekülteil. **Amphotere Tenside** tragen im hydrophilen Teil sowohl eine positiv als auch eine negativ geladene funktionelle Gruppe. **Nicht ionische Tenside** sind im hydrophilen Teil ungeladen (aber sie sind polar).
- 9.02** Mizellen sind kugel- und stäbchenförmige Aggregate von Tensidmolekülen, die sich beim Auflösen von Tensiden im Wasser bilden. Sie haben eine Größe von wenigen Nanometern. Tritt ein Lichtstrahl durch eine Tensidlösung, wird er an den Mizellen gestreut (Tyndalleffekt).
- 9.03** Eine Seifenblase besteht aus einer sehr dünnen Lamelle aus Wasser, die durch Tensidmoleküle innen und außen stabilisiert wird. Auf beiden Seiten zeigen die Tensidmoleküle mit ihrem hydrophilen Ende zum Wasser. Die Instabilität hängt damit zusammen, dass die Lamelle sehr dünn und flüssig ist. Aufgrund der Schwerkraft fließt das Wasser der Lamelle nach unten und die Lamelle wird im oberen Teil der Blase immer dünner und reißt schlussendlich.
- 9.04** Tenside verringern die Oberflächenspannung des Wassers und ermöglichen ein Benetzen des Gewebes und das Eindringen von Tensidlösung in das Gewebe.
Tensidmoleküle treten in Wechselwirkung mit dem Gewebe und den hydrophoben Schmutzteilchen. Sie lagern sich an der Oberfläche des ebenfalls hydrophoben Gewebes an, dringen mit ihrem hydrophoben Teil in das Schmutzteilchen ein und schieben sich zwischen Gewebe und Schmutz. Das Schmutzteilchen löst sich vom Gewebe.
In den abgelösten Schmutz dringen weitere Tensidmoleküle ein. Dabei wird er in feinste Teilchen emulgiert und dispergiert. Die von den Tensidmolekülen bewirkte hydrophile Hülle der Schmutzteilchen verhindert eine Wiedervereinigung zu größeren Einheiten und ein erneutes Anlagern am Gewebe.
Das nun gereinigte Gewebe wird von der Waschlauge getrennt und mit frischem Wasser gespült. Dabei wird das Gewebe von anhaftenden Tensiden befreit. Ein Großteil des Wassers wird beim Schleudern aus der Wäsche entfernt.
- 9.05** Durch die Kochsalzzugabe löst sich das Kochsalz im Wasseranteil des Seifenleims und bildet eine Salzlösung. Dadurch wird die Emulsion zerstört. Aufgrund der nun höheren Dichte der Salzlösung mit der Restlauge (Unterlauge) trennt sie sich vom Seifenkern (mit der geringeren Dichte) ab.
- 9.06** Betrachtetes Seifenmolekül: Natriumsalz einer Fettsäure
 $R-COO^- Na^+$ R = hydrophober Alkylrest
Seife ist das Salz einer schwachen Säure mit einer starken Base. Die Fettsäureanionen entziehen dem Wasser Protonen und setzen so OH^- -Ionen frei. Die Lösung reagiert basisch.
 $R-COO^- Na^+ + H_2O \rightarrow R-COOH + Na^+ + OH^-$
- 9.07** Es wird Seifenlösung bereitet. Man fügt Seifenlösung zu den beiden Wasserproben und schüttelt. Die Wasserprobe mit dem weichen Wasser schäumt stark. Die Wasserprobe mit dem harten Wasser schäumt kaum und es bildet sich eine deutliche Trübung oder Ausflockung (Kalkseife).
- 9.08** In den 1950er-Jahren wurden die Seifen in Waschmitteln durch Alkylbenzensulfonate abgelöst. Diese Verbindungen waren ursprünglich im Alkylrest stark verzweigt. Ihre biologische Abbaubarkeit wurde damals nicht geprüft. Mikroorganismen in der Natur können stark verzweigte Alkylreste nicht vollständig abbauen, sodass die Tensidwirkung erhalten blieb. Dies bewirkte starke Schaumbildung in Flussläufen und Seen. In Verbindung mit den damals in Waschmitteln verwendeten Phosphaten zur Wasserenthärtung wurde das ökologische Gleichgewicht der Gewässer massiv gestört (Eutrophierung und in der Folge davon Fischsterben). Daher musste man den Alkylrest des Tensidmoleküls so modifizieren, dass es biologisch abbaubar ist. Linear gebaute Alkylreste mit nur einer Verzweigung genügen diesem Anspruch.

Antworten

- 9.09** Lineare Alkylbenzensulfonate (LAS) sind Salze von Sulfonsäuren; es liegt eine Bindung zwischen dem organischen Rest R und Schwefel vor.



Fettalkoholsulfate (FAS) sind Ester von Fettalkoholen mit Schwefelsäure; es liegt eine Bindung zwischen dem organischen Rest R und dem Sauerstoff der Schwefelsäure vor.



- 9.10** In einem Buntwaschmittel dürfen keine Bleichmittel enthalten sein.

- 9.11** Enzyme werden bei höheren Temperaturen denaturiert und sind daher nur in der ersten Phase des Aufheizprogramms aktiv.

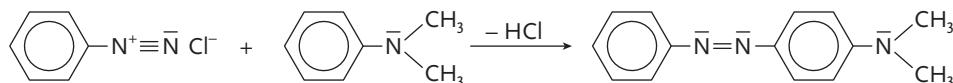
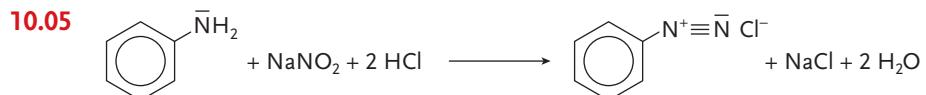
10 Farbstoffe

- 10.01** Gelb bzw. Rot

- 10.02** Das konjugierte System mit drei Doppelbindungen absorbiert im UV-Bereich. Diphenyldiazen hat 13 konjugierte Doppelbindungen (und auch die freien Elektronenpaare an den N-Atomen) und ist damit deutlich leichter anregbar.

- 10.03** Grafit hat in seinen Schichten ein nahezu unendliches konjugiertes kondensiertes Ringsystem und absorbiert damit alle Wellenlängen des sichtbaren Lichtes.

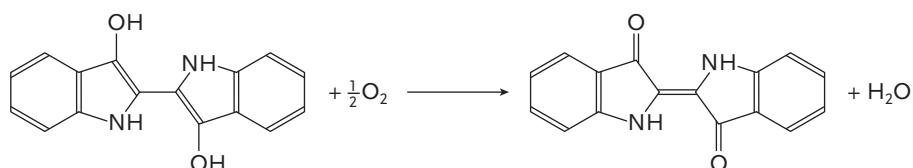
- 10.04** Chlorbenzen und Stickstoff N₂



- 10.06** Sulfonsäuregruppen sind ionisch und werden daher hydratisiert.

- 10.07** Kongorot ist ein pH-Indikator und ändert daher bei Kontakt mit sauren Substanzen die Farbe (von Rot auf Blau).

- 10.08**

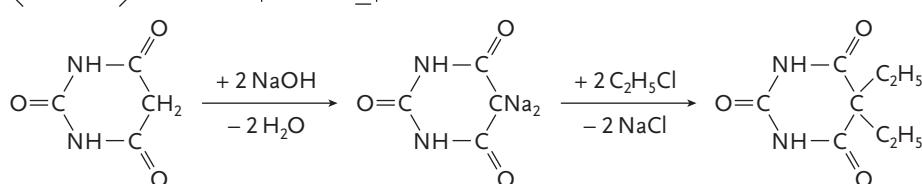


11 Pharmazeutika – Drogen – Doping

- 11.01** Antiseptika (Desinfektionsmittel), stopfende und abführende Mittel (Laxantien), Mittel gegen Wurmerkrankungen (Antihelminthika), Mittel für den Elektrolythaushalt, Mittel zur Behandlung diverser Organe (z. B. Lunge)

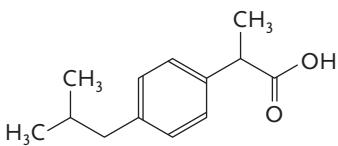
- 11.02** $\langle \text{N}=\text{N}=\text{O} \rangle \longleftrightarrow |\text{N}\equiv\text{N}-\bar{\text{O}}|$

- 11.03**

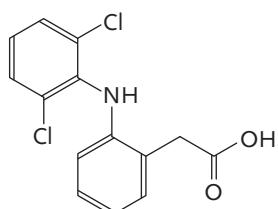


- 11.04** Mit Natronlauge (oder Enzymen)

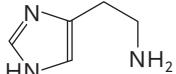
11.05



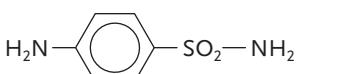
und



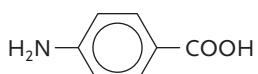
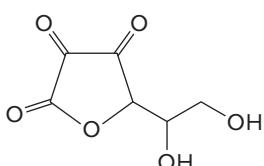
11.06



11.07

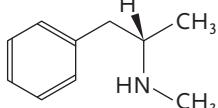


und

11.08 C₁₂H₁₇NO₂

11.10 Damit Sportler nicht behaupten können, sie hätten guten Gewissens ein handelsübliches, aber dopingverseuchtes Nahrungsergänzungsmittel zu sich genommen.

11.11



B „Biotechnologie“ – Antworten

1 Grundlagen der Biochemie und Ernährung

1.1 Proteine

1.1.01 Strukturproteine, Membranproteine, Speicherproteine

1.1.02 Bausteine der Proteine (20 Aminosäuren)

1.1.03 Primärstruktur: Abfolge der Aminosäuren; Sekundärstruktur: einzelne geordnete Abschnitte des Proteinmoleküls (Helix oder Faltblatt); Tertiärstruktur: räumliche Gestalt eines ganzen Proteinmoleküls; Quartärstruktur: Aggregat aus mehreren Proteinmolekülen (Untereinheiten)

1.1.04 Hydrophobe (unpolare) Aminosäuren bilden durch hydrophobe Wechselwirkungen einen inneren Zusammenhalt des Proteinmoleküls und damit seine Gestalt.

1.1.05 Asparaginsäure: saure Aminosäure (negative Ladung, elektrostatische Wechselwirkung); Leucin: apolare Aminosäure (hydrophobe Wechselwirkung); Tyrosin: polare Aminosäure (Wasserstoffbrücke); Lysin: basische Aminosäure (positive Ladung, elektrostatische Wechselwirkung); Threonin: polare Aminosäure (Wasserstoffbrücke)

1.1.06 Ovalbumin und Lactalbumin: globuläre Proteine; Kollagen und Keratin: fibrilläre Proteine

1.1.07 Bluteiweiß Albumin: globuläres Protein (gute Wasserlöslichkeit); Seide: fibrilläres Protein (Faserstruktur)

1.1.08 1,4 g Hühnerei * 13 % = 182 mg Protein / 6,25 = 29,12 mg N / 14 = 2,08 mMol N / 0,1 = 20,8 ml

1.2 Fette

1.2.01 Aufbau von Membranen; gespeicherte chemische Energie

1.2.02 Gemeinsame Eigenschaft = Löslichkeit in unpolaren Lösungsmitteln; Neutralfette: Triglyceride (Triacylglycerole); Lipoide: andere chemische Strukturen, z. B. Phospholipide

1.2.03 Gesättigte Fettsäuren: nur Einfachbindungen; mehrfach ungesättigte Fettsäuren: mehrere Doppelbindungen, jeweils durch eine CH₂-Gruppe getrennt = isolierte Doppelbindungen, alle in Cis-(Z)-Stellung; Transfettsäuren: Wasserstoffatome bzw. Fettsäurereste in Trans-(E)-Stellung an den C-Atomen der Doppelbindung

1.2.04 Schmelzbereich: Bei Raumtemperatur sind Öle flüssig, Fette fest.

1.2.05 Lecithin, Emulgator

- 1.2.06** Glycerin ist mit zwei Fettsäuren (apolar) und über eine Phosphorsäure mit dem Aminoalkohol Cholin (Phosphocholin = polar) verestert. Der apolare und der polare Teil des Moleküls bestimmen die Wirkung als Emulgator.
- 1.2.07** Sexualhormone, Gallensäuren, Cholecalciferol (Vitamin D)
- 1.3 Kohlenhydrate**
- 1.3.01** $C_xH_{2y}O_z$; Einteilung nach der Anzahl der C-Atome (Hexosen, Pentosen, Triosen); Aldosen und Ketosen (Aldehydgruppe an C-1-Atom oder Ketogruppe an C-2-Atom)
- 1.3.02** Ribose = Monosaccharid (Pentose), Lactose = Disaccharid (Glucose + Galactose), Raffinose = Oligosaccharid (Trisaccharid: Galactose + Glucose + Fructose), Cellulose = Polysaccharid (Vielfach-Glucosen, verknüpft mit β -1,4-glycosidischer Bindung)
- 1.3.03** Pyranide Form der Glucose: Sauerstoffbrücke zwischen der Aldehydfunktion am C-1-Atom und der OH-Funktion am C-5-Atom; furanoide Form der Fructose: Sauerstoffbrücke zwischen der Ketofunktion am C-2-Atom und der OH-Funktion am C-5-Atom
- 1.3.04** Unterschied in der Stellung der OH-Gruppe am C-1-Atom. α -Glucose: OH-Gruppe am C-1-Atom gleich ausgerichtet wie am C-4-Atom; die α -1,4-glycosidische Bindung der Stärke bedingt gleich ausgerichtete Glucosemoleküle in einem lang gestreckten, schraubenförmigen Makromolekül (Amylose). Stärke ist für den Menschen verdaulich. Die β -1,4-glycosidische Bindung der Cellulose bedingt jeweils in Folge um 180° gedrehte Glucosemoleküle in einem lang gestreckten, geradlinigen Makromolekül. Mehrere Makromoleküle können dadurch über Wasserstoffbrücken mechanisch feste Faserbündel ausbilden. Cellulose ist daher für den Menschen nicht verdaulich.
- 1.3.05** Reduzierender Charakter: Aldehydfunktion am C-1-Atom zumindest eines Monosaccharides ungebunden; nicht reduzierendes Disaccharid: keine freie Aldehydfunktion, C-1-Atom glycosidisch mit zweitem Monosaccharid verbunden.
- 1.3.06** Aldehydfunktion am C-1-Atom (bei Aldosen) bzw. Ketofunktion am C-2-Atom (bei Ketosen) reagiert unter Wasserabspaltung mit OH-Gruppe eines weiteren Zuckers. Es entsteht eine Etherbrücke.
- 1.3.07** Nicht quellfähige (unlösliche) Ballaststoffe: Darmfüllung; quellfähige (lösliche) Ballaststoffe: Nährstoff für Darmbakterien, Gallensäurebindung (Cholesterinsenkung), verlangsamte Aufnahme der Glucose

2 Molekulare Grundlagen der Zelle und Genetik

2.1 DNA und genetischer Code

- 2.1.01** Fadenförmige Chromosomen = Erbanlagen; Gene sind einzelne Abschnitte der Chromosomen. Ein Gen bestimmt ein bestimmtes Protein in der Proteinbiosynthese.
- 2.1.02** Körperzellen diploid, Geschlechtszellen haploid
- 2.1.03** Bausteine der DNA: Pentose Desoxiribose, mit Phosphat (negative Ladung) zu schraubenförmigem Makromolekül (Helix) verbunden, vier Stickstoffbasen, Adenin, Cytosin, Guanin und Thymin, sind jeweils an die Desoxiribose glycosidisch gebunden und ragen in das Innere der Helix. Zwei gegengleich ausgerichtete Makromoleküle sind über Wasserstoffbrücken der Stickstoffbasen zu einer Doppelhelix gebunden.
- 2.1.04** Cytosin und Thymin = Pyrimidinbasen; Adenin und Guanin = Purinbasen. Dabei sind die jeweils korrespondierenden Basenpaare Cytosin und Guanin (drei Wasserstoffbrücken) sowie Adenin und Thymin (zwei Wasserstoffbrücken).
- 2.1.05** Der genetische Code besteht in der Abfolge der Stickstoffbasen bzw. der korrespondierenden Basenpaare. Er ist in der Proteinbiosynthese für die Abfolge der Aminosäuren (Primärstruktur) verantwortlich.

2.2 Zellteilung und Proteinbiosynthese

- 2.2.01** Zellteilung = Entwicklung zweier genetisch identischer Tochterzellen aus einer Mutterzelle; Proteinbiosynthese = Übersetzung des genetischen Codes in eine Abfolge der Aminosäuren (Primärstruktur)
- 2.2.02** Replikation = Verdoppelung der DNA in drei Schritten: Inititionsphase (Auf trennung der DNA-Doppelhelix durch Enzym Helicase, Setzen eines Primers); Elongationsphase (Synthese eines komplementären DNA-Stranges durch Enzym DNA-Polymerase); Terminationsphase (codierte Endsequenz)
- 2.2.03** RNA: Einfachstrang statt Doppelhelix; Ribose statt Desoxiribose; Stickstoffbase Uracil statt Thymin; Messenger-RNA (mRNA), ribosomale RNA (rRNA), Transfer-RNA (tRNA)
- 2.2.04** Transkription: Ein für ein Protein spezifischer Abschnitt der DNA wird auf eine Messenger-RNA (mRNA) in Form der korrespondierenden Basenpaare übertragen. Enzym ist eine RNA-Polymerase.

2.2.05 Translation: An den Ribosomen wird die mRNA schrittweise und gemäß dem übertragenen Code von der tRNA abgetastet. Die Abfolge von drei Basen determiniert eine bestimmte Aminosäure. Die tRNA transportiert diese Aminosäure und dockt an den komplementären Basen der mRNA an. Die zuvor gebildete Peptidkette wird mit der Aminosäure verknüpft.

2.3 Molekularbiologische Analytik

2.3.01 „Polymerase chain reaction“ (Polymerase-Kettenreaktion)

2.3.02 Denaturierung: Auf trennung der DNA-Doppelhelix durch Erhitzen; Setzen eines Primers (Oligonukleotid); Elongationsphase: DNA-Polymerase bildet jeweils komplementäre Stränge.

2.3.03 Denaturierung bei ca. 90 °C, Setzen des Primers bei ca. 60 °C, Elongation bei ca. 70 °C.

2.3.04 Replikation in der lebenden Zelle: Inititionsphase = Auf trennung der DNA-Doppelhelix durch Enzym Helicase; Denaturierung in der PCR = Auf trennung der DNA-Doppelhelix durch Erhitzen auf ca. 90 °C

2.3.05 Durch Mitführen eines Vergleichsmaterials als Standard kann festgestellt werden, ob die Probe einen gleichen DNA-Ausschnitt aufweist.

2.4 Methoden der Gentechnik und DNA-Rekombinationstechnik

2.4.01 Restriktionsenzyme: schneiden aus der DNA einzelne definierte Abschnitte heraus, die sie an bestimmten Codes der Basenpaare erkennen; DNA-Ligasen verbinden DNA-Abschnitte miteinander zu rekombinanter DNA; Rekombinationsenzyme schneiden DNA-Sequenzen aus zwei DNA-Strängen und bauen sie kreuzweise, also einen Abschnitt aus Strang A in den Strang B, ein.

2.4.02 Vektoren (Genfährten) transportieren rekombinante Gensequenzen in die Zelle bzw. in den Zellkern.

2.4.03 Transfektion: Zuerst wird die Durchlässigkeit der Zellmembran durch physikalische Methoden, wie Mikroinjektion oder Elektroporation, sowie chemische Methoden, wie Calciumphosphat oder Liposomen, hergestellt. Danach können Vektoren die rekombinante DNA in die Zelle und in den Zellkern transportieren. Als Vektoren eignen sich Plasmide (bakterielle ringförmige DNA), Bacteriophagen (Viren) oder bakterielle Chromosomen.

2.4.04 Klonen = Herstellung genetisch identischer Organismen; Klonieren = Herstellen von identischen DNA-Kopien

2.4.05 In der Reproduktionsmedizin werden Klone im Labor hergestellt, indem einer entkernten Eizelle ein Zellkern des zu klonenden Organismus meist mit Mikroinjektion eingesetzt wird. Der daraus durch Replikation und Zellteilung entstandene Embryo wird einer Leihmutter zur weiteren Entwicklung bis zur Geburt eingesetzt. Beim therapeutischen Klonen werden Gewebekulturen, z. B. Säugetierzellen, zur Herstellung medizinischer Präparate, wie Impfstoffe, in einer Nährlösung in einem Fermenter vermehrt.

3 Stoffwechselprozesse

3.1 Metabolismus und Enzyme

3.1.01 Katabolismus: Chemische Verbindungen werden mit dem Ziel der Energiegewinnung abgebaut. Anabolismus: Chemische Verbindungen werden unter Aufwendung von Energie zu körpereigenen Substanzen (Gerüstsubstanzen oder Speicherstoffen) aufgebaut.

Fototrophe Organismen (grüne Pflanzen und Einzeller): bauen aus Kohlenstoffdioxid und Wasser mithilfe von Lichtenergie (Sonnenenergie) Zellbestandteile und Speicherstoffe auf.

Chemotrophe Organismen (alle anderen Organismen): benötigen Nährstoffe zur Energiegewinnung und zum Aufbau von Zellbestandteilen und Speicherstoffen.

3.1.02 Die Kohlenstoffdioxidbildung erfolgt nicht durch Oxidation von Kohlenstoff, sondern durch Decarboxylierung (Abspaltung von Kohlenstoffdioxid). Oxidationsvorgänge erfolgen nicht durch Übertragung von Sauerstoff, sondern durch Dehydrogenierung (Abspaltung von aktiviertem Wasserstoff).

3.1.03 Biochemische Reaktionen spielen sich über mehrere Stufen in einer Reaktionskette über Zwischenprodukte (Metaboliten) ab. Dabei stellt sich ein Fließgleichgewicht (englisch: steady state) gleichbleibender Konzentrationen der Metaboliten ein. Für die Gesamtreaktion ist damit nur die Gleichgewichtseinstellung zwischen dem Ausgangsstoff und dem Endprodukt entscheidend.

3.1.04 Energie wird in katabolischen Reaktionen zum Teil als Wärme frei, wesentlicher ist jedoch die Bildung energiereicher chemischer Verbindungen. Eine der bedeutendsten energiereichen Verbindungen im Stoffwechsel ist Adenosintriphosphat (ATP).

3.1.05 Enzyme sind Proteine, die als Biokatalysatoren wirken, und zwar durch Verringerung der Aktivierungsenergie einer chemischen Reaktion, wodurch die Reaktion zum Laufen kommt, weiter durch die Erhöhung der Reaktionsgeschwindigkeit. Enzyme verändern jedoch nicht das Gleichgewicht einer chemischen Reaktion.

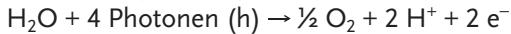
- 3.1.06** Substratspezifität: Enzyme können nur mit bestimmten Stoffen (Substraten) Komplexe bilden. Wirkungsspezifität: Enzyme können nur bestimmte Reaktionen katalysieren, diese jedoch grundsätzlich in beide Richtungen.
- 3.1.07** Klassifikation der Enzyme: DNA-Polymerase = Ligase; Lipase = Hydrolase; Glucoseoxidase = Oxidoreduktase
- 3.1.08** NAD⁺: Coenzym von Oxidoreduktasen (Übertragung von 2 H⁺ + 2 e⁻); ATP: Coenzym von Phosphorylasen (Übertragung von Phosphatgruppen; energiereiche Verbindung); CoA: Coenzym in Reaktionen, in denen Säuregruppen übertragen werden
- 3.1.09** Durch ATP. Im aeroben Stoffwechsel mit einer 19-fachen Menge an ATP gegenüber dem anaeroben hemmt ATP ein Enzym (Phosphofructokinase) des Zuckerstoffwechsels. Im anaeroben Stoffwechsel entstehen ein ATP-Mangel und ADP-Überschuss. ADP wirkt als Aktivator des Enzyms.
- 3.1.10** Gase diffundieren durch die apolare Lipiddoppelschicht (passiver Transport). Wasser und Glucose werden durch aktiven Transport unter ATP-Verbrauch in die Zellen und Organellen transportiert, Wasser durch Tunnel- oder Kanalproteine, Glucose durch Trägerproteine (Carriers).

3.2 Ausgewählte Stoffwechselwege

- 3.2.01** Amylasen (Speichel, Pankreas): verdauliche Kohlenhydrate (Stärke) zu Glucose; Lipasen (Pankreas, Darmschleimhaut): Fette zu Fettsäuren und Glycerin; Proteasen (Pepsin, Trypsin): Proteine zu Aminosäuren
- 3.2.02** Glucose + ATP → Glucose-6-Phosphat → Fructose-6-Phosphat + ATP → Fructose-1,6-diphosphat → 2 Glycerinaldehyd-3-phosphat + anorganisches Phosphat – NADH+H⁺ → 1,3-Diphosphoglycerat – ATP → 3-Phosphoglycerat → 2-Phosphoglycerat – H₂O → Phosphoenolpyruvat – ATP → Pyruvat;
Bilanzgleichung: C₆H₁₂O₆ + 2 ADP + 2 P + 2 NAD⁺ → 2 CH₃—CO—COOH + 2 ATP + 2 NADH+H⁺ + 2 H₂O
- 3.2.03** Fettsäure + ATP + CoA → Acyl-CoA – AMP → Transenoyl-CoA – FADH₂ + H₂O → Beta-hydroxyacyl-CoA → Beta-ketoacyl-CoA – NADH+H⁺ + CoA → Acyl-CoA (um 2 C verkürzt) + Acetyl-CoA;
Bilanzgleichung einer gesättigten Fettsäure aus zwölf C-Atomen:
CH₃—(CH₂)₁₀—COOH + ATP + 9 CoA-SH + 8 FAD + 8 NAD⁺ → 9 CH₃—CO—S—CoA + AMP + 2 P + 8 FADH₂ + 8 NADH+H⁺
- 3.2.04** Eine Aminotransferase überträgt die Aminogruppe der abzubauenden Aminosäure auf eine 2-Oxosäure, auf 2-Oxoglutarat bzw. Oxalacetat. Daraus entstehen als Metaboliten die 2-Oxosäure der abzubauenden Aminosäure sowie Glutamat und Aspartat. Die 2-Oxosäure der abzubauenden Aminosäure wird zum weiteren Abbau je nach Verbindung in den Citratzyklus oder in den FDP-Weg eingeschleust.
Über einige Zwischenschritte des sogenannten Harnstoffzyklus werden je zwei Aminogruppen aus Glutamat und Aspartat auf Hydrogencarbonat übertragen, wodurch der ungiftige und lösliche, somit leicht ausscheidbare Harnstoff entsteht.
- 3.2.05**
- Mit NADH+H⁺ zu Lactat → anaerober Stoffwechselweg der homofermentativen Milchsäurebakterien.
 - Unter Abspaltung von CO₂ (Decarboxylierung) zu Ethanal (Acetaldehyd) und weiter mit NADH+H⁺ zu Ethanol → anaerober Stoffwechselweg der Hefe
 - Unter gleichzeitiger Abspaltung von CO₂ und Bildung von NADH+H⁺ (oxidative Decarboxylierung) sowie Bindung an das Coenzym A zu Acetyl-CoA (aktivierter Essigsäure) → aerober Stoffwechselweg, Einschleusung in den Citratzyklus
 - Unter Bindung von CO₂ (Carboxylierung) zu Oxalacetat, das zur Auffüllung des Citratzyklus eingeschleust wird → anapleurotische Reaktion
- 3.2.06** Acetyl-CoA + Oxalacetat → Citrat – CoA – H₂O → Aconitat + H₂O → Isocitrat → Oxalsuccinat – NADH+H⁺ → 2-Oxoglutarat – CO₂ + CoA → Succinyl-CoA – NADH+H⁺ – CO₂ + anorganisches Phosphat → Succinat – GTP – CoA → Fumarat – FADH₂ + H₂O → Malat → Oxalacetat – NADH+H⁺.
Bilanzgleichung: CH₃—CO—S—CoA + 3 NAD⁺ + FAD + GDP + P + 2 H₂O → 2 CO₂ + HS-CoA + 3 NADH+H⁺ + FADH₂ + GTP
- 3.2.07**
- Zwei Mol [H⁺ + e⁻] aus NADH+H⁺ werden auf Komplex I mit dem Coenzym FMN (Flavin-Mononukleotid) übertragen.
 - Zwei Mol [H⁺ + e⁻] werden weiter auf Komplex II, Coenzym Q, übertragen.
 - FADH₂ wird direkt auf Coenzym Q übertragen. (Eine Reaktion weniger → Energieausbeute nur zwei Mol ATP je Mol FADH₂).
 - Geteilte Übertragungsreaktion: H⁺ wird abgespalten, die Elektronen (e⁻) werden auf Komplex III (Cytochrome b + c₁) übertragen. (Oxidationsstufe des Eisenzentralatoms von Fe³⁺ auf Fe²⁺).
 - Cytochrom c überträgt die Elektronen von Komplex III auf Komplex IV.

- In Komplex IV mit den Cytochromen a_1 und a_3 ändern die Elektronen die Oxidationsstufe des Hämeisens von Fe^{3+} auf Fe^{2+} , des enthaltenen Kupfers von Cu^{2+} auf Cu^+ .
Bilanzgleichung: $\text{NADH}+\text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O}$; freie Enthalpie – 219 kJ/Mol. Aus einem Mol $\text{NADH}+\text{H}^+$ entstehen drei ATP (ca. 90 kJ.)

- 3.2.08** Lichtreaktion: Lichtquanten (Photonen) spalten im Enzymkomplex der Chloroplasten mithilfe des Chlorophylls Wasser zu $\frac{1}{2} \text{O}_2$ und $2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \rightarrow$ Übertragung auf NADP^+ (Nikotinamid-Dinukleotid-Phosphat), weiter entsteht ATP. Bilanzgleichung der Lichtreaktion:



Dunkelreaktion: CO_2 wird mit ATP und $\text{NADPH}+\text{H}^+$ (aus der Lichtreaktion) an Ribulose-1,5-diphosphat gebunden (Kohlenstoffdioxidfixierung). Im Calvinzyklus entsteht aus zwei Triosen (Glycerinaldehyd-3-phosphat) ein Mol Fructose-1,6-diphosphat. Ribulose-1,5-diphosphat wird unter ATP-Aufwand gebildet.

4 Mikrobiologie

- 4.01** Bakterien (inkl. Archebakterien), Pilze (Hefen, Schimmelpilze), Mikroalgen (Cyanobakterien, früher Blaualgen), Protozoen (Urtierchen)
- 4.02** DNA (genetischer Code), Zytoplasma (Innenraum der Zelle; Stoffwechsel, Proteinbiosynthese), Zellmembran (Umhüllung, Abtrennung von Umgebung, Stofftransport)
Eukaryoten: DNA im Zellkern, strukturiertes Zytoplasma mit Organellen; Prokaryoten: DNA frei im Zytoplasma, keine Organellen
- 4.03** Clostridien: Stäbchen, grampositiv, Sporenbildung; Enterobacteriaceae: Stäbchen, gramnegativ, keine Sporenbildung; Streptokokken: kugelförmig, grampositiv, keine Sporenbildung; Bazillen: Stäbchen, grampositiv, Sporenbildung; Lactobacteriaceae: Stäbchen, grampositiv, keine Sporenbildung.
- 4.04** Aerobe Bedingungen – Hefeatmung: Abbau von Glucose zu Kohlenstoffdioxid und Wasser, 38 ATP je Mol Glucose → Vermehrung (Biomasse); anaerobe Bedingungen – Gärung: Abbau von Glucose zu Ethanol und Kohlenstoffdioxid, 2 ATP je Mol Glucose → keine Vermehrung.
- 4.05** Saccharomyces cerevisiae (Backhefe, Ethanolproduktion), Saccharomyces carlsbergensis (Bierhefe für untergäriges Bier); Penicillium roqueforti und Penicillium camemberti (Käseherstellung), Aspergillus niger (Zitronensäure), Penicillium chrysogenum (Penicillin), Aspergillus oryzae (Alphaamylase), Fusarium venenatum (Quorn, vegetarischer Fleischersatz)
- 4.06** Hefen: einzellige Pilze, Vermehrung durch Sprossung oder Teilung; Schimmelpilze: mehrzellig (Myzel, Pilzgeflecht), Vermehrung durch Sporen

5 Biotechnologische Verfahrenstechnik

5.1 Fermenter und Prozessparameter

- 5.1.01** Upstream-Processing → Fermentation → Downstream-Processing
- 5.1.02** Fermentation: Umsetzung des Substrates zum Endprodukt durch lebende Zellen (Mikroorganismen, Enzyme; z. B. vergären Hefen Glucose zu Ethanol und Kohlenstoffdioxid); Upstreaming: Aufbereitung des Substrates (z. B. Hitzebehandlung zur Sterilisation, Abbau von Stärke zu Glucose); Downstreaming: Aufarbeitung und Reinigung der Endprodukte (z. B. Destillation, Ultrafiltration)
- 5.1.03** Gefäß für die Umsetzung des Substrates durch die lebenden Zellen sowie Einrichtungen für die Zufuhr des Substrates und den Abzug der Endprodukte, mess- und regeltechnische Einrichtungen, z. B. Thermometer für die Temperaturkontrolle; Einbringung von Luft über Ringrohr oder perforierte Platte (Blasensäulenfermenter), Hochströmen der Luft im Zentralrohr, dadurch Umlösung (Airlift-Schlaufenfermenter), mikrofeine Verteilung der Luftbläschen durch Rührwerk (Rührkesselfermenter)
- 5.1.04**
- Anlaufphase (Lag-Phase): Transport der Nährstoffe durch die Zellmembran, Beginn der Stoffwechselvorgänge
 - Phase des exponentiellen (logarithmischen) Wachstums (Log-Phase): In der Generationszeit (t_G) verdoppelt sich die Zellzahl.
 - Stationäre Phase: Die Zellzahl bleibt konstant, wegen des zunehmenden Mangels an Nährstoffen, auch an Sauerstoff, oder zu hoher Konzentration der Endprodukte findet keine Vermehrung mehr statt. Der Stoffwechsel hält die Zellen noch am Leben.
 - Absterbephase: Durch anhaltenden Mangel an Nährstoffen oder Sauerstoff bzw. zu hohe Konzentration an Endprodukten sterben die Zellen ab.

- 5.1.05** Chargenweise Führing: Batchverfahren, Emerskultur, Submerskultur (auch chargenweise); kontinuierliche Führing: Submerskultur (Turbidostat oder Chemostat)
- 5.1.06** $\lg X_t = \lg X_0 + \lg 2 * t/t_G$
 $\lg X_t = \lg 1\ 000 + \lg 2 * 600/40[\text{min}]$
 $\lg X_t = 3 + 0,301\ 03 * 15$
 $\lg X_t = 7,515\ 45$
 $X_t = 32\ 768\ 000$

- 5.1.07** Redoxpotenzial oder Sauerstoff-Partialdruck

5.2 Ausgewählte Beispiele – Fermentationen

- 5.2.01** Ethanolproduktion (anaerobe Fermentation); Biomasseproduktion (aerobe Fermentation)
- 5.2.02** Homofermentative Milchsäurebakterien: fermentierte Milchprodukte (Joghurts, Sauermilch), Milchsäure für technische und pharmazeutische Zwecke sowie als Lebensmittelzusatzstoff; heterofermentative Milchsäurebakterien: Sauerkraut, Sauerteig
- 5.2.03** Schimmelpilz Aspergillus niger; Substrat: Melasse oder verzuckerte Maisstärke, pH < 3, praktisch keine Eisen- und Manganionen
- 5.2.04** Penicillin beeinträchtigt die Zellmembranbildung (Zellwandbildung) grampositiver Bakterien, z. B. der Staphylococcus; Streptomycin hemmt die Proteinbiosynthese gramnegativer Bakterien, z. B. der Enterobacteriaceae.
- 5.2.05**
- Entschlüsselung des genetischen Codes für Insulin → DNA-Basensequenz mit Rekombinationsenzymen nachgebildet.
 - Mit einem Vektor (Genfahre) wird das Gen (und ein Antibiotika-Resistenzgen) in die Zellen von E. coli eingebracht.
 - Ein komplex zusammengesetztes Substrat mit Zucker und Proteinhydrolysat sowie einem Antibiotikum wird mit dem transgenen E. coli beimpft. Das Antibiotikum bewirkt das ausschließliche Wachstum der transgenen E. coli.
 - Die Fermentation erfolgt unter Bedingungen der maximalen Zellvermehrung. Dabei wird in den Zellen Insulin auf dem Wege der Proteinbiosynthese gebildet.
 - Die Zellen von E. coli werden aus dem Fermenter abgezogen und mit Zentrifugen abgetrennt. Danach werden die Zellen durch Ultraschall aufgeschlossen.
 - Um das Insulin vor proteolytischem Abbau zu schützen, werden in den Zellen gebildete Proteasen mit geeigneten Chemikalien inaktiviert.
 - Nach einer Filtration wird das Filtrat durch eine Affinitätschromatografie-Säule geleitet. Dabei wird das Insulin spezifisch gebunden und konzentriert. Mit einem geeigneten Puffer wird das Insulin aus der Säule eluiert.

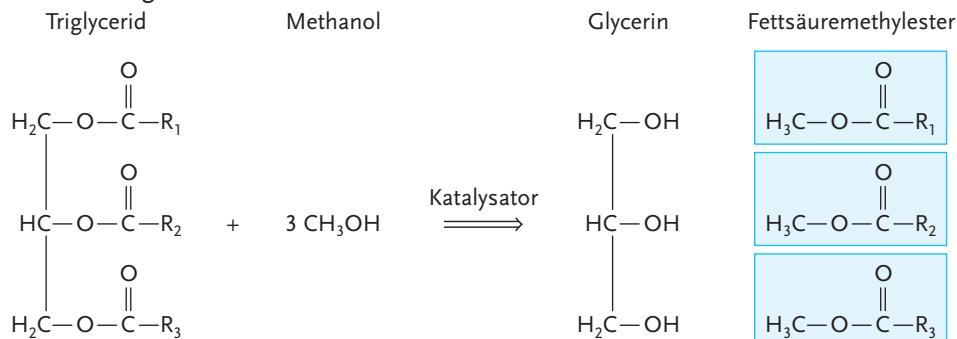
C „Naturwissenschaften, Umwelt und Gesellschaft“ – Antworten

1 Fossile und erneuerbare Energieträger

- 1.01** Primäre Energiequellen: Erdöl, Erdgas, Kohle, Torf; Wasserkraft, Sonnenenergie, Windenergie, Geothermie und Biomasse. Sekundäre Energiequellen: Strom aus Wärmekraftwerken, aufbereitete fossile Energieträger (Benzin, Heizöl, Koks, Briketts), Biogas, Biodiesel, Bioethanol und Wasserstoff.
- 1.02** Eingepresstes Wasser oder Erdgas erhöht den Lagerstättendruck wieder.
- 1.03** Der hohe technische Aufwand ist aus Kostengründen nicht vertretbar oder die nötige Infrastruktur ist nicht vorhanden.
- 1.04** Zerstörung der Landschaft und dadurch nötige aufwendige Renaturierung, Einsatz von großen Mengen von Wasser als Spül- und Pumpflüssigkeit, Energieaufwand für das Erhitzen von Wasser, Lagerung von kontaminiertem Sand und Wasser in Absetzbecken (Gefahr für das Grundwasser).
- 1.05** Durch das plötzliche Freisetzen großer Methanmengen kann es zum Blow-out kommen. Fehlt das Methanhydrat als Stütze im Meeresboden, können Gesteinsrutsche einen Tsunami auslösen.
- 1.06** In Österreich wurde 1973 als Sparmaßnahme ein autofreier Tag pro Woche verordnet. Dazu wurden die Fahrzeuge mit einem Aufkleber auf der Windschutzscheibe gekennzeichnet. In den Schulen wurde eine Woche Sonderferien im Februar eingeführt, die im Anschluss als Semesterferien weitergeführt wurden. Den umgangssprachlichen Namen Energieferien führen sie heute noch.

- 1.07** Der Landwirt muss einen Sammelbehälter für Gülle und Kosubstrate, einen Gärbehälter (Fermenter) und einen Lagerbehälter für die Biogasgülle bauen. Das entstandene Biogas wird drucklos in einem Folienbehälter gesammelt. In einem Heizhaus werden der Verbrennungsmotor und der Generator untergebracht. Die bei der Fermentation eingesetzten Stoffe stammen aus der eigenen Vieh- oder Feldwirtschaft und werden mit regional gesammelten Bioabfällen ergänzt.
- 1.08** Bei der Acidogenese bauen anaerobe Bakterien niedermolekulare organische Verbindungen zu Alkoholen, organischen Säuren, Kohlenstoffdioxid und Wasserstoff ab. Als Acetogenese bezeichnet man den weiteren Abbau dieser Verbindungen durch Essigsäurebakterien zu Essigsäure und Wasserstoff. Bei der Methanogenese erzeugen Methanbakterien aus Kohlenstoffdioxid, Wasserstoff und Essigsäure die Endprodukte Methan und Wasser.
- 1.09** RME steht für Rapsölmethylester, AME für Altölmethylester, E5 für Benzin mit einer Beimengung von 5 % Bioethanol und PEMFC für den Bautyp einer Brennstoffzelle (polymer electrolyte membrane fuel cell).

1.10 Umesterung:



R₁, R₂, R₃: verschiedene Fettsäurereste (z.B. Stearinsäure, Ölsäure, Linolensäure)



- 1.11** Brasilien musste durch die Vergrößerung der Zuckerrohranbauflächen für die Bioethanolproduktion landwirtschaftliche Nahrungsmittel importieren.
- 1.12** Mehrere Lösungen möglich

2 Halogenkohlenwasserstoffe

- 2.01** Stabil und reaktionsträge → geeignet als Treibgas und Schäummittel
Lipophil → Lösungs- und Extraktionsmittel für ebenfalls lipophile Stoffe
Nicht entflammbar → Feuerlöschmittel
Toxisch → gezielt als Pestizide einsetzbar
Gut komprimier- und expandierbar → Kältemittel
- 2.02** Sein Gefrierpunkt liegt bei 0 °C.
- 2.03** Dadurch, dass Säuglinge und Kleinkinder ihr Spielzeug gerne in den Mund stecken, saugen sie die Schadstoffe förmlich auf.
- 2.04** Mehrere Lösungen möglich
- 2.05** Kunststoffe, besonders PVC; Dispersionen, Lacke, Dichtmassen, Klebstoffe, Kosmetika und Textilien
- 2.06** Im Jahre 1943 standen Forscher im Manhattanprojekt vor dem Problem, dass sie bei der Urananreicherung mit dem extrem korrosiven Uranhexafluorid umgehen mussten. PTFE fand hier wegen seiner ausgezeichneten chemischen Stabilität erstmals technische Verwendung als Korrosionsschutz.
- 2.07** Goretex ist der Handelsname der W. L. Gore & Associates, Newark, Delaware, für eine aus PTFE bestehende mikroporöse, wasserundurchlässige, aber dampfdiffusionsoffene Membran.

3 Kunststoffe

- 3.01** Massenkunststoffe sind die vier Thermoplaste PE, PP, PVC und PS. Sie werden zu Folien, Platten, Rohren, Profilen, Hohlkörpern (Flaschen, Kanister) und Schaumstoffen verarbeitet.
Zu den technischen Kunststoffen zählt man PA, POM, PPO, PC, PET, PETP, PBTP und die Duromeren. Sie werden zu Gehäusen, tragenden Teilen und Schaltern verarbeitet.
Spezialkunststoffe sind beispielsweise PMMA, PTFE und PES. Hergestellt werden Beleuchtungskörper, Gleitlager und Trägerfolien für Schaltkreise.

- 3.02** Durch die große Bandbreite der mechanischen Eigenschaften der verschiedenen Kunststoffsorten ergibt sich ein eingeschränktes Anwendungsgebiet. Die dunklen Farben ergeben sich ebenfalls durch das Zusammenmischen verschiedener bunter Teile.
- 3.03** bis **3.06**
Individuelle Lösungen
- 3.07** Verpackungsflocken aus PS lösen sich rasch in Aceton auf. Stärkeflocken dagegen quellen in Wasser auf und lösen sich nach einiger Zeit. Die Stärke kann mit einer Iod-Kaliumiodid-Lösung nachgewiesen werden (Blaufärbung).
- 3.08** bis **3.14**
Individuelle Lösungen
- 3.15** Der Slogan „Jute statt Plastik!“ kennzeichnete in den 1980er-Jahren die bewusste Entscheidung von Konsumenten gegen die Wegwerfgesellschaft und für soziale und ökologische Verantwortung. Die Jutetasche wurde inzwischen durch Baumwolltaschen aus ökologischem Anbau und Fairem Handel ersetzt.
- 3.16** Individuelle Lösungen

4 Suchmittel und Gesellschaft

- 4.01** Zu den stoffgebundenen Süchten gehören Alkoholabhängigkeit, Drogenabhängigkeit und Medikamentenabhängigkeit. Arbeitssucht, Internetsucht, Sexsucht, Essstörungen und Spielsucht zählen zu den stoffungebundenen Süchten.
- 4.02** Stoffgebundene Süchte rufen körperliche Abhängigkeit hervor. Bei der Kaufsucht stehen nicht die gekauften Waren, sondern der „Kaufrausch“ – das Einkaufen oder Bestellen – im Zentrum des Denkens und Handelns.
- 4.03** Individuelle Antwort. Suchtmerkmale: Einengung des Verhaltensraums, Kontrollverlust, Abstinenzunfähigkeit, Auftreten von Entzugserscheinungen, Toleranzentwicklung und negative soziale Konsequenzen.
- 4.04** $\text{CH}_3\text{—CH}_2\text{—OH} \rightarrow \text{CH}_3\text{—CHO} \rightarrow \text{CH}_3\text{—COOH}$
Ethanol → Ethanal → Ethansäure
- 4.05** Berechnung der Blutalkoholkonzentration (BAK) nach Widmark:
- $$\text{BAK in \%} = \frac{m(\text{Ethanol}) \text{ in g}}{m(\text{Körpergewicht}) \cdot x} \quad x(\text{Frauen}) = 0,60$$
- 0,02 L Schnaps mit 40 Vol% enthält rund 6,4 g Alkohol:
- $$\rho = 0,8 \text{ kg/L} \quad V = 20 \text{ mL} \cdot 0,40 = 8 \text{ mL} \quad m = \rho \cdot V = 6,4 \text{ g}$$
- Eine 60 kg schwere Frau hat somit eine BAK von $\frac{3 \cdot 6,4 \text{ g}}{60 \text{ kg} \cdot 0,6} = \frac{19,2 \text{ g}}{36 \text{ kg}} \approx 0,53 \%$
- 4.06** Trinkalkohol (Ethanol) wird manchmal absichtlich mit Methanol versetzt (gepanscht). Methanol fällt beim Destillieren als sogenannter Vorlauf an und sollte eigentlich verworfen werden. Der Abbau von Methanol und Ethanol erfolgt durch das Enzym Alkoholdehydrogenase in der Leber. Aus Methanol entsteht dabei Formaldehyd und in einem weiteren Schritt die Ameisensäure. Diese beiden Stoffe greifen den Körper an, indem sie den Sehnerv bis zur Erblindung schädigen. Die Nieren, die Leber und das Zentralnervensystem werden ebenfalls angegriffen, es kann zum Atemstillstand kommen. Unbehandelt endet die Vergiftung daher meist tödlich. Als erste Maßnahme wird bei Methanolvergiftungen dem Patienten Ethanol verabreicht, damit dieses und nicht das Methanol mit Alkoholdehydrogenase abgebaut wird. Damit wird erreicht, dass Methanol nicht in Formaldehyd und Ameisensäure abgebaut, sondern ausgeschieden wird.
- 4.07** Antabuse ist ein ursprünglich gegen Wurmbefall entwickeltes Medikament mit dem Wirkstoff Disulfiram, dessen Nebenwirkung „Unverträglichkeit mit Alkohol“ bei der Alkoholentwöhnung gewollt genutzt wird. Es verhindert den Abbau von Ethanal in Essigsäure, indem es das Enzym Aldehyddehydrogenase (ALDH) blockiert. Der Körper zeigt daher bereits nach dem Trinken geringer Alkoholmengen Symptome einer Ethanalvergiftung wie Kopfschmerzen, Übelkeit, Kreislaufprobleme und Unwohlsein. Der rückfällig gewordene Alkoholkranke bestraft sich gleichsam selbst, dass er nicht trocken geblieben ist. Medikamentöse Alkoholentwöhnung ist eine Therapieform, die unter ärztlicher Aufsicht erfolgt.
- 4.08** bis **4.10**
Individuelle Lösungen
- 4.11** Nicotin löst sich bereits im Mund im Speichel auf und gelangt von dort und über die Lungenbläschen ins Blut. Im Gehirn setzt es zahlreiche Neurotransmitter mit unterschiedlichen Wirkungen auf das psychische und körperliche Befinden frei: Es beruhigt und stimuliert, steigert die Wahrnehmungs- und Gedächtnisleistung, hellt die Stimmung auf, hemmt Angst, Stress, Schmerz und Appetit. Der Herzrhythmus wird beschleunigt, der Blutdruck erhöht und die Gefäße werden verengt. Die Wirkung von Nicotin hält nur wenige Minuten an.

- 4.12** Teer, er enthält zahlreiche kanzerogene Schadstoffe. Reizgase lähmen die Flimmerhärtchen, mit denen die Atemwege zur Selbstreinigung ausgestattet sind. Um sich gegen die Schmutzpartikel zur Wehr zu setzen, bildet der Körper in den Atemwegen Schleim. Beim gewohnheitsmäßigen Rauchen kann der zähe Schleim im späteren Stadium oftmals nur mühsam abgehustet werden.

- 4.13** Individuelle Antwort

- 4.14** Nein. Das Wasser in der Shisha kühlt den Rauch, wodurch das Einatmen angenehmer ist. Es reinigt ihn aber nicht.

- 4.15** Angegeben werden müssen der Gehalt an Kondensat (Teer), Nicotin und Kohlenstoffmonooxid. Die Warnhinweise sind vergleichbar mit Risikosätzen, da sie auf mögliche Gefahren hinweisen.

- 4.16** Berechnung der Blutalkoholkonzentration (BAK) nach Widmark:

$$\text{BAK in \%} = \frac{m(\text{Ethanol}) \text{ in g}}{m(\text{Körpergewicht}) \cdot x}$$

Reduktionsfaktor x : $x_{\text{Männer}} = 0,70$, $x_{\text{Frauen}} = x_{\text{Jugendliche}} = 0,60$

$$\text{BAK}(t) = \text{BAK}_0 - v_{\text{Abbau}} \cdot t$$

BAK_0 ... Anfangskonzentration zum Zeitpunkt $t = 0$

v_{Abbau} ... konstante Abbaugeschwindigkeit; 0,1 bis 0,2 Promille pro Stunde

Die gesamte Abbauzeit bis $\text{BAK}(t) = 0$ beträgt also $t = \text{BAK}_0/v_{\text{Abbau}}$

5 Lebensmittelsicherheit und Konsumenteninformation

- 5.01** Unter Lebensmitteln versteht man Stoffe, die vom Menschen durch Essen oder Trinken zu Ernährungs- oder Genusszwecken aufgenommen werden. Sie dienen somit primär der Versorgung mit Makronährstoffen und essentiellen Nährstoffen. Als Grundnahrungsmittel werden die Nahrungsmittel bezeichnet, die in einer bestimmten Kultur mengenmäßig den Hauptbestandteil der Ernährung der Bevölkerung ausmachen.

- 5.02** Makronährstoffe sind Fette, Kohlenhydrate und Proteine. Zu den Mikronährstoffen (essenziellen Nährstoffen) zählen essenzielle Aminosäuren, essenzielle mehrfach ungesättigte Fettsäuren, Vitamine, Mineralstoffe und Spurenelemente.

- 5.03** Herkunftsbezeichnung, Kalorien- und Nährwertangaben sowie Imitate und Allergene müssen angegeben sein. Die Nährwertkennzeichnung umfasst Brennwert, Fett, gesättigte Fettsäuren, Kohlenhydrate, Zucker, Eiweiß und Salz.

- 5.04** Individuelle Lösungen.

- 5.05** Individuelle Lösungen.

- 5.06** Individuelle Lösungen.

- 5.07** Die acht essenziellen Aminosäuren Valin, Leucin, Isoleucin, Methionin, Threonin, Phenylalanin, Tryptophan und Lysin sind zusammen mit zwölf weiteren proteinogenen Aminosäuren, die der Körper im Stoffwechsel bilden kann, für den Aufbau des Körpereiweißes unbedingt erforderlich. Die essenziellen Fettsäuren sind wichtige Bausteine für Membranlipide.

- 5.08** Eine Unterversorgung mit Vitaminen verursacht Mangelerscheinungen. Bei einer ausgewogenen Ernährung mit Mischkost können keine Vitaminmangelerscheinungen auftreten.

- 5.09** Sie können in höherer Dosierung giftig wirken.

- 5.10** Sie finden Verwendung als Farbstoffe, Konservierungs- und Antioxidationsmittel, Emulgatoren, Verdickungs- und Geliermittel, Stabilisatoren, Geschmacksverstärker, Säuerungsmittel, Säurereregulatoren, Trennmittel, Backtriebmittel, Süßstoffe, modifizierte Stärke, Schmelzsalze, Mehlbehandlungs-, Festigungs- und Feuchthaltemittel und Schutz- und Treibgase.

- 5.11** Die E-Nummer ist die Europäische Registrierungsnummer eines Lebensmittelzusatzstoffes. Bei der Zulassung von Lebensmittelzusatzstoffen prüft die Europäische Lebensmittelsicherheits-Agentur (European Food Safety Agency – EFSA) einerseits die toxikologische Unbedenklichkeit und andererseits die technologische Wirkung. Auf der Lebensmittelverpackung muss die Zusatzstoffklasse, gefolgt von der E-Nummer oder der spezifischen Bezeichnung, ersichtlich sein.

- 5.12** Kontaminanten sind physikalische (z. B. Fremdkörper, wie Glas, Steine), chemische (z. B. giftige Verbindungen aus der Umwelt oder aus Organismen) oder biologische Verunreinigungen (z. B. pathogene Bakterien, Viren), die unbeabsichtigt in die Lebensmittel gelangen. Es handelt sich dabei um Stoffe, die nach ihrer Herkunft in Umweltkontaminanten, Kontaminanten aus Organismen und Kontaminanten aus Verarbeitungsprozessen unterschieden werden. Rückstände sind unerwünschte Stoffe, die im Zuge der Verarbeitung in ein Lebensmittel gelangen und in kontrollierten Restmengen vorhanden sind.

6 Strahlenbelastung und Nanotechnologie

6.01 $I(d) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}$ sowie $I(d) = I_0 \cdot 2^{-d/\delta}$

6.02 Die Ionendosis J ist die pro Kilogramm trockener Luft erzeugte Ladung; $J = \Delta Q / \Delta m$

Die Energiedosis D ist die pro Kilogramm durchstrahlter Materie abgegebene Energie; $D = \Delta E / \Delta m$

Die Äquivalenzdosis D_Q ist die mit einem Qualitätsfaktor Q multiplizierte Energiedosis, welche die biologische Strahlenwirkung besser charakterisiert; $D_Q = Q \cdot D$

6.03 Größenordnung vom Einzelatom bis zu einer Objektgröße von 100 Nanometern

6.04 Natürliche Strahlenbelastung: kosmische Strahlung, terrestrische Strahlung und innere Strahlung

Künstliche Strahlenbelastung: radioaktive Strahlungsquellen in technischen und medizinischen Geräten und Atomwaffen und Atomkraftwerke

6.05 $\delta = \ln(2)/\mu$; $\delta = 4,951 \cdot 10^{-4} \text{ m}$

6.06 3,322 mm; 6,644 mm; 13mm

6.07 Da die Wahrscheinlichkeit stochastischer Strahlenwirkungen nicht nur von der Energiedosis, sondern auch von der Art der Strahlung abhängt, wurde der Qualitätsfaktor zur Definition der Äquivalenzdosis eingeführt.

Dosimeter sind Messgeräte zur Messung der Strahlendosis – als Energiedosis oder Äquivalenzdosis – im Rahmen des Strahlenschutzes.

6.08 Fullerene sind sphärische Moleküle aus Kohlenstoffatomen. Das am besten erforschte Fullerene ist C_{60} , das zu Ehren des Architekten Richard Buckminster Fuller Buckminster-Fulleren genannt wurde, da es den von ihm konstruierten geodätischen Kuppeln ähnelt. Es besteht aus 12 Fünfecken und 20 Sechsecken, die zusammen ein abgestumpftes Ikosaeder bilden.

D „Physikalische Phänomene und Methoden“ – Antworten

1 Mechanik

1.1 Bewegungsgleichungen für Translationen

1.1.01 $m \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = m \cdot \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} = \vec{F}$

1.1.02 $m \cdot \frac{d^2h}{dt^2} = -m \cdot g \quad h(t) = -\frac{g}{2} \cdot t^2 - v_0 \cdot t + h_0$

1.1.03 $y(t) = 10 \cdot \cos(5 \cdot t) \cdot \text{cm}$

1.1.04 $m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = -D \cdot y - k \cdot \frac{dy}{dt}$

1.1.05 $m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} = -D \cdot x$

1.1.06 $m \cdot \frac{d^2y}{dt^2} = m \cdot g - 6\pi\eta \cdot \frac{dy}{dt}$
 $y(t) = C_1 + \frac{g}{k} \cdot t + C_2 \cdot e^{-k \cdot t}$

1.2 Bewegungsgleichungen für Rotationen

1.2.01 $J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} = J \cdot \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2} = \vec{M}$

1.2.02 $\varphi(t) = 10 \cos(2,214t)$

1.2.03 $J \cdot \frac{d^2\varphi}{dt^2} = -mgs \cdot \sin(\varphi) - k \cdot \frac{dy}{dt}$

2 Schwingungen und Wellen

2.1 Schwingungen

2.1.01 Feder-, Faden-, Dreh- und physisches Pendel

2.1.02 Die Beschleunigung ist zur Auslenkung direkt proportional und entgegengesetzt gerichtet.

2.1.03 31,6 rad/s; 5,0 Hz; 0,2 s; 22,4 rad/s; 3,6 Hz; 0,3 s; 44,7 rad/s; 7,1 Hz; 0,1 s; 2 kg

2.1.04 0,253 kg; $y(t) = 10 \cdot \sin(2\pi \cdot t - \pi/2) \cdot \text{cm}$

2.1.05 $y_1(t) = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot t + \pi/2) \cdot \text{cm}$, $y_2(t) = 10 \cdot \sin(\pi \cdot t + \pi/2) \cdot \text{cm}$

2.1.06 Fadenlänge und Gravitationsbeschleunigung

2.1.07 1,5 rad/s; 0,2 Hz; 4,3 s; 2,1 rad/s; 0,3 Hz; 3,0 s; 4,5 m

- 2.1.08** 0,994 m; 0,993 m für $9,802 \text{ m/s}^2$ am Äquator; 1 m für $9,867 \text{ m/s}^2$ an den Polen
- 2.1.09** 3 896
- 2.1.10** Massenträgheitsmoment und Winkelrichtgröße
- 2.1.11** 0,45 rad/s; 0,07 Hz; 14,05 s; 0,37 rad/s; 0,06 Hz; 17,21 s
- 2.1.12** $7,896 \cdot 10^{-5} \text{ kgm}^2/\text{s}^2$
- 2.1.13** 0,125 kgm^2
- 2.1.14** Massenträgheitsmoment, Masse, Gravitationsbeschleunigung und Schwerpunktsabstand
- 2.1.15** 1,81 rad/s; 0,29 Hz; 3,48 s; 0,83 mm
- 2.1.16** 0,063 m
- 2.1.17** Kombinatorik: „4 über 2“ = 6 Paare aus 2.1.14
- 2.1.18** Gleiche Frequenz
- 2.1.19** Wie die größte der beiden Einzelperioden
- 2.1.23** Alle ganzzahligen Vielfachen
- 2.1.24** Nullstellen bei $z \cdot \pi$; z eine ganze Zahl
- 2.1.25** Eine Figur, die bei einer Überlagerung von zwei senkrechten Schwingungen entsteht.
- 2.1.26** Eine breite „Acht“
- 2.1.27** Eine nicht geschlossene Lissajousfigur
- 2.1.28** Die drei Parameter sind: Amplitude, Winkelgeschwindigkeit, Nullphasenwinkel
- 2.1.29** Vergleichen Sie die Beispiele 2.1.14ff
- 2.1.30** Man vergleicht die Eigenkreisfrequenz mit der Dämpfungskonstante.
- 2.1.31** $y(t) = 5 \cdot e^{-0,358t} \cdot \sin(8,937 \cdot t - \pi/2) \cdot \text{cm}$
- 2.1.32** 43,6 %; 66,1 %; 99,5 %
- 2.1.33** $y(t) = 8 \cdot e^{-2t} \cdot \sin(31,6 \cdot t - \pi/2) \cdot \text{cm}; 13,7 \% ; 1,9 \%$
- 2.1.34** Erwünschte Resonanz: Zungenfrequenzmesser, Radioempfang, elektromagnetischer Schwingkreis ...; unerwünschte Resonanz: Eigenschwingungsanregung bei Turbinen, Brücken, Hochhäusern ...
- 2.1.35** 10 m/s
- 2.1.36** Die Periodendauer ist proportional zur Wurzel aus der Masse. Daher tritt die Resonanz bereits bei geringer Geschwindigkeit auf.
- 2.1.37** Je weiter die Dehnfugen aus einander sind, um so geringer ist die Frequenz der äußeren Kraft und um so schneller kann der Pkw fahren.
- 2.1.38** $E_{\text{kin}} = m \cdot v(t)^2/2; E_{\text{el}} = D \cdot y(t)^2/2$
- 2.1.39** $v_{\text{max}} = 71 \text{ cm/s}$
- 2.1.40** $D = 2,5 \text{ kg/s}^2$
- 2.1.41** $E_{\text{ges}} = E_{\text{kin}}(t) + E_{\text{pot}}(t) = 2\pi^2 m f^2 r^2$ konstant; Energieerhaltung; E_{ges} ist proportional zu m, f^2 und r^2 .
- 2.1.42** $E_{\text{ges}} = 0,125 \text{ J}$
- 2.1.43** Kopplungsstärke, Masse, Position der Kopplung, Abstand der Pendel
- 2.1.44** Vergleichen Sie die Randspalte beim Kapitel 2.1.8
- 2.1.45** $y(t) = 10 \cdot \sin(67,662\pi \cdot t) \cdot \text{cm}$
- ## 2.2 Wellen
- 2.2.01** Lineare, Flächen- und Raumwelle
- 2.2.02** $c = (\text{Maß für die Kopplung}/\text{Maß für die Trägheit})^{1/2}$
- 2.2.03** Rund 412 m/s
- 2.2.04** F muss um rund 96 Prozent erhöht werden. Man könnte die Dichte um rund 49 Prozent verringern; ebenso die Fläche. Wenn man Fläche und Dichte gleichzeitig verringert, genügen jeweils rund 71 % der ursprünglichen Größe.
- 2.2.05** Wellenausbreitung durch Interferenz aller Elementarwellen; Einfallswinkel = Reflexionswinkel

2.2.06 a) 45° ; b) α und $90^\circ - \alpha$; c) 30° und 60°

2.2.07 $\sin(\alpha)/\sin(\beta) = c_1/c_2 = \lambda_1/\lambda_2 = n_2/n_1$

2.2.08 $36,87^\circ$

2.2.09 $\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin(c_1/c_2)$

2.2.10 $\alpha_{\text{Grenz}} = 56,44^\circ$; $\alpha = 67,73^\circ$

2.2.11 Verstärkung: ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge; Auslöschung: ungerades ganzzahliges Vielfaches der halben Wellenlänge

2.2.13 a) $f = c/(2l)$ und $f_n = nf$; b) $f = c/(4l)$ und $f_n = (2n-1)f$; c) $f = c/(2l)$ und $f_n = nf$

2.3 Geometrische und Wellenoptik

2.3.01 800 nm bis 400 nm; IR – VIS – UV

2.3.02 1,553

2.3.03 3, 4 bzw. 6

2.3.04 regulär: $\alpha = \beta$; irregulär: es gibt viele verschiedene Reflexionswinkel

2.3.05 Retroreflexion: $\alpha = \beta = 0^\circ$

2.3.06 $\sin(\alpha)/\sin(\beta) = c_1/c_2$

2.3.07 $41,8^\circ$

2.3.08 $43,9^\circ$

2.3.09 $36,9^\circ$; für $\alpha = 30^\circ$ ist $\beta = 56,4^\circ$

2.3.10 $v = d \cdot \sin\{\alpha - \arcsin[\sin(\alpha)/n]\}/\cos\{\arcsin[\sin(\alpha)/n]\}$

2.3.11 rot, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett

2.3.12 0,014; rund 1,05 %

2.3.13 $41,6^\circ$; $42,2^\circ$

2.3.14 $41,6^\circ$

2.3.15 bis **2.3.17**

Verwenden Sie das Reflexionsgesetz; Das Lot verläuft jeweils durch den (Kugel)Mittelpunkt

2.3.18 $3r/2$; $3r/4$

2.3.19 Konvexe Linsen sind in der Mitte dicker als am Rand.

2.3.20 Konkave Linsen sind in der Mitte dünner als am Rand.

2.3.21 5 dpt

2.3.22 0,633 mm; 2,632 mm

2.3.23 $\approx 8,999 \text{ km}^2$

2.3.24 $1/f = 1/g + 1/b$

2.3.25 Beim Höhen- und Tiefenwinkel ist ein Schenkel waagrecht.

2.3.26 $173,7^\circ$

2.3.27 32 dpt

2.3.28 $0,519^\circ$; $0,518^\circ$

2.3.29 Der Krümmungsradius und damit die Brennweite der Augenlinse kann durch einen Ringmuskel verändert werden. Dies bezeichnet man als Akkommodation.

2.3.30 $D = 1/f \approx 58,8 \text{ dpt}$

2.3.31 $2 \cdot n \cdot d - \lambda/2$

2.3.32 $2 \cdot n \cdot d \cdot \cos(\arcsin[\sin(\alpha) \cdot n]) - \lambda/2$

2.3.33 860 nm

2.3.34 $30,51^\circ$

2.3.35 3,4 μm ; 9; 17

- 2.3.36** Durch Streuung, Reflexion und Brechung
2.3.37 Zur Ausblendung des ordentlichen oder außerordentlichen Strahls
2.3.38 Stoffe, bei denen der ordentliche oder außerordentliche Strahl im Stoff praktisch völlig absorbiert wird, sodass einer übrig bleibt
2.3.39 Durch mechanische oder elektrische Spannung
2.3.40 $\alpha = \arctan(n_2/n_1)$
2.3.41 $54,45^\circ$
2.3.42 Das Verhältnis von n_2/n_1 ist rund 1,732.
2.3.43 1,43
2.3.44 $\alpha = \arctan(n_2/n_1)$

2.4 Akustik

- 2.4.01** Longitudinalwelle: fest, flüssig, gasförmig; Transversalwelle: fest, Flüssigkeitsoberfläche
2.4.02 Mechanische Eigenschaften des Mediums bzw. Temperatur und Druck der Umgebung
2.4.03 0,884 mW; 0,607 Pa
2.4.04 6 931 km
2.4.05 Entfernung um 41,4 % erhöhen
2.4.06 $1,273 \cdot 10^{-6} \cdot I_0$
2.4.07 $I(r) = P_0 / (2\pi \cdot r^2)$
2.4.08 86,4 dB
2.4.09 0,015 9 mW/m²; 0,08 Pa
2.4.10 91 dB
2.4.11 317
2.4.12 2,67 dB; ja: logarithmisch zur Intensitätserhöhung
2.4.13 69 dB
2.4.14 2 001 Hz
2.4.15 Verringerung um 17,5 %
2.4.16 1 zu 2
2.4.17 Bei einseitig offener Luftsäule

3 Thermodynamik

3.1 Kinetische Gastheorie

3.1.1 Das ideale Gas

- 3.1.01** Teilchen sind klein gegenüber ihrem mittleren Abstand, Wechselwirkung nur über elastische Stöße, Wechselwirkung mit der Umgebung ebenfalls nur über elastische Stöße
3.1.02 Vor dem Stoß: Wand $p_w = 0$, Teilchen $p_x = +p$, Summe: $p_{ges} = +p$
 Nach dem Stoß: Wand $p_w = 2 \cdot p$, Teilchen $p_x = -p$, Summe: $p_{ges} = +p$
3.1.03 Bei hohem Druck

3.1.2 Zustandsgleichung eines idealen Gases

- 3.1.04** Druck $p_0 = 1\,013,25 \text{ hPa}$, Temperatur $T_0 = 273,15 \text{ K}$
3.1.05 Einsetzen von $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$, $p_0 = 1\,013,25 \text{ hPa}$, $T_0 = 273,15 \text{ K}$ und $k = 1,380\,648\,8 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ in die Gleichung des idealen Gases liefert ein Volumen von $22,4 \text{ dm}^3$.
3.1.06 2 437,3 hPa
3.1.07 27,54 °C
3.1.08 Größe und Form der Teilchen, Wechselwirkung nicht nur über elastische Stöße, andere Freiheitsgrade als nur die Translation

3.1.3 Gasgesetze

3.1.09 Druck, Volumen, Temperatur

3.1.10 Gesetz von Boyle und Mariotte: $\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}$

Gesetz von Gay-Lussac: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$

Gesetz von Amontons: $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$

Gesetz der Gleichförmigkeit: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$

Gesetz von Dalton: $p = \sum_i p_i$

Die Gasgesetze sind nicht mehr gültig für zu hohen Druck, da dann das Modell des idealen Gases nicht mehr korrekt ist.

3.1.11 Etwa die 118-fache Menge, da 1 bar etwas unter dem Normluftdruck liegt

3.1.12 8,29 cm

3.1.13 112,57 °C

3.1.14 2,425 bar, 2,885 mol

3.1.15 30,923 kg

3.1.16 12,972 Mol, $7,812 \cdot 10^{24}$ Teilchen

3.1.17 2,014 kg/m³

3.1.18 98,72 kg/m³

3.1.19 12,7 K

3.1.20 Je 0,6 bar Partialdruck, 1,2 bar Gesamtdruck

3.1.4 Zustandsänderung des idealen Gases

3.1.21 Isobar ($p = \text{konst.}$), isochor ($V = \text{konst.}$), isotherm ($T = \text{konst.}$)

3.1.22 Erstes und zweites Gesetz von Gay-Lussac, Gesetz von Boyle und Mariotte

3.1.23 Vorher 30 K, nachher 70 K

3.1.24 Erhöhung um 233,33 %, bei schneller Kompression wird Luft erwärmt

3.1.25 Vorher 60 K, nachher 120 K

3.1.26 Der Druck; er wird vom Umgebungsluftdruck vorgegeben

3.1.5 Kinetische Gastheorie: Maxwell-Boltzmann-Verteilung

3.1.27 Die mittlere Geschwindigkeit der Gasteilchen hängt von der Temperatur ab. Die Geschwindigkeiten der einzelnen Gasteilchen streuen um diesen Mittelwert. Die Richtungen der Geschwindigkeit sind gleich verteilt.

3.1.28 Vgl. hierzu den Verteilungsgraphen in der Randspalte des Kapitels.

3.2 Hauptsätze der Thermodynamik

3.2.1 Temperatur

3.2.01 Systeme unterschiedlicher Temperatur tauschen so lange Wärme aus, bis sie die gleiche Temperatur aufweisen (thermodynamisches Gleichgewicht). Nullter Hauptsatz: Sind zwei Systeme mit einem dritten im Gleichgewicht, so sind sie auch zueinander im Gleichgewicht.

3.2.02 Wärme ist die mittlere Energie der mikroskopischen Bewegung der Teilchen (Atome, Moleküle), aus denen die Materie aufgebaut ist.

3.2.03 Die Summe der kinetischen, potenziellen und inneren Energie eines Systems ist konstant.

3.2.04 Zufuhr von Energie durch Arbeit am System; Energieübertrag durch thermischen Kontakt mit einem wärmeren System

3.2.2 Erster Hauptsatz der Thermodynamik

3.2.05 9 kJ

3.2.06 74,62 kJ

3.2.07 23,23 kg

3.2.08 501,5 kJ**3.2.09** 254,7 kJ**3.2.10** 0,018 7 °C**3.2.3 Zustandsänderung des idealen Gases und erster Hauptsatz****3.2.11** isochor: $p \sim T$, isobar: $V \sim T$, isotherm: $V \sim 1/p$, adiabatisch: $\Delta Q = 0$ **3.2.12** 46 MJ**3.2.13** 582,2 kJ**3.2.14** 79,999 99 bar ~ 80 bar**3.2.15** 198,7 °C, 66,2 °C**3.2.16** a) 114,1 °C, 3,693 bar, b) 674,8 kJ**3.2.17** 389,7 K**3.2.18** 25,1 bar, 488,3 °C**3.2.19** 35,5 kW**3.2.20** 131,1 MJ**3.2.21** a) 360 K, 4,8 bar und 1,2 bar, b) 360 K, 3,6 bar, 5,333 L und 0,666 L**3.2.4 Kreisprozesse****3.2.22** Im Uhrzeigersinn: Wärme → Arbeit,
im Gegenuhrzeigersinn: Arbeit → Wärme**3.2.23** Arbeit wird in Wärme umgewandelt, 90 W**3.2.24** a) Arbeit in Wärme: 0,725 J, b) Wärme in Arbeit: 87,5 J**3.2.25** 26,799 kJ**3.2.5 Carnotscher Kreisprozess****3.2.26** Wärme muss bei möglichst hoher Temperatur T_1 aufgenommen und bei möglichst niedriger Temperatur T_2 abgegeben werden.**3.2.27** 78,5 %, 77,6 %, 99 %**3.2.28** $Q_{ab} = 630 \text{ J}$ bei 67,45 °C**3.2.29** 8,8 %; $Q_{zu} = 800 \text{ J}$, $Q_{ab} = 877,6 \text{ J}$ unter Aufwand von $W = 77,6 \text{ J}$ **3.2.6 Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik****3.2.30** Vgl. die fünf verschiedenen Formulierungen auf der ersten Seite dieses Kapitels.**3.2.31** $S = \int \frac{dQ}{T}$, $[S] = 1 \frac{\text{J}}{\text{K}}$ **3.2.32** Reversibler Prozess: $\Delta S = 0$, irreversibler Prozess: $\Delta S > 0$, spontan unmöglich Prozess: $\Delta S < 0$ **3.2.33** 605 J/K**3.2.34** Entropie ist ein Maß für die Durchmischung eines Systems und damit ein Maß für die Wahrscheinlichkeit des angenommenen Zustands, da der Zustand höherer Durchmischung wahrscheinlicher ist ($S = k \cdot \ln(W)$).**3.2.35** 70,5 °C**3.2.36** 0,356 kg**3.2.37** Der Wirkungsgrad ist der Quotient aus der Fläche innerhalb der geschlossenen Kreisprozesslinie im S-T-Diagramm und der Fläche zwischen der obersten Diagrammlinie und der x-Achse.**3.2.38** Ein Rechteck im T-S-Diagramm (Carnotprozess) hat immer eine größere Fläche als eine andere geschlossene Figur innerhalb dieses Rechtecks. (Vergleichen Sie auch das Diagramm in der Randspalte.)**3.2.7 Wärmekraftmaschinen****3.2.39** **Wärmekraftmaschine**, im Uhrzeigersinn: Große Wärmemenge wird auf hohem Temperaturniveau aufgenommen und in Arbeit und Abwärme umgewandelt.**Kraftwärmemaschine**, Gegenuhrzeigersinn: Wärmemenge wird auf niedrigem Temperaturniveau aufgenommen und mit der hineingesteckten Arbeit als Wärme auf dem höheren Temperaturniveau abgegeben.

- 3.2.40** Dampfmaschine, Ottomotor, Dieselmotor
- 3.2.41** Erster Takt: Ansaugen; zweiter Takt: adiabatisches Verdichten, isochores Zünden; dritter Takt: adiabatische Ausdehnung, (Arbeitstakt); vierter Takt: isochorer Gasausstoß und Kolbenentleerung; $\eta_{\text{ideal}} = 56\%$, $\eta_{\text{real}} = 40\%$
- 3.2.42** Erster Takt: Ansaugen; zweiter Takt: adiabatisches Verdichten, Zünden durch Verdichtung; dritter Takt: isobare Verbrennung und adiabatische Ausdehnung (Arbeitstakt); vierter Takt: isochorer Gasausstoß und Kolbenentleerung; $\eta_{\text{ideal}} = 65\%$ bis 70% , $\eta_{\text{real}} = 50\%$ (maximal); Unterschied zu Ottomotor: Zündung im Zuge der hohen Verdichtung, isobare Verbrennung und adiabatische Expansion als Arbeitstakt
- 3.2.43** 1. isotherme Wärmeaufnahme auf niedrigem Temperaturniveau; 2. adiabatische Verdichtung durch Arbeitsaufwand; 3. Abgabe einer Wärmemenge auf hohem Temperaturniveau; 4. adiabatische Expansion unter Leistung von Arbeit; COP (coefficient of power): Quotient aus der Wärmeabgabe auf hohem Temperaturniveau zur geleisteten mechanischen Arbeit des Kompressors

4 Elektrodynamik

4.1 Elektromagnetische Induktion

4.1.1 Magnetfeld und Leiterschleife

4.1.01 2,25 mV

4.1.02 26 V

4.1.03 Die Flussänderung beim Herausziehen ist negativ (U neg.) und beim Hineinbewegen positiv (U pos.).

4.1.2 Lenzsche Regel; allgemeines Induktionsgesetz

4.1.04 1,44 V

4.1.05 1,039 V

4.1.06 0,2 T

4.1.07 Das Wechselfeld der Induktionsspule erzeugt in elektrisch leitenden Töpfen Kreisströme. Wegen des ohmschen Widerstandes des Metalls wird der Topfboden erhitzt. Geschirr aus Plastik oder Glas ist nicht leitend; es werden keine Kreisströme induziert und es gibt daher keine Erhitzung.

4.1.08 Der Magnet wird beim Fall deutlich gebremst. Bei der Fallbewegung wird der magnetische Fluss durch die Wand des Alurohres geändert. Die induzierten Kreisströme verursachen ein Magnetfeld, das der Flussänderung entgegengerichtet ist. Der Fall wird gebremst.

4.1.3 Selbstinduktion einer Spule

4.1.09 Induktivität: $L = \frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l}$; Induktionsspannung: $U_L = -L \cdot \frac{dl}{dt}$;

Schaltzeichen: Vergleichen Sie den Beginn des Kapitel 4.1.3

$$\mathbf{4.1.10} [L] = \left[\frac{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A \cdot N^2}{l} \right] = 1 \frac{\text{A} \cdot \text{m}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}} = 1 \text{ H}$$

4.1.11 15,112 H

4.1.12 3,079 H

4.1.13 1,151 s

4.1.14 Von der Induktivität der Spule, von der Größe des stationären Stromes und der Dauer des Schaltvorganges

4.1.4 Energie des Magnetfeldes einer Spule

$$\mathbf{4.1.15} E_{\text{magn}} = \frac{L \cdot I_0^2}{2}$$

4.1.16 6,758 μJ

4.1.17 0,5 J; 5 W

4.1.18 a) 0,1125 J, b) 0,1125 J, c) 4,5 W, d) $E_{\text{ohm}} : E_{\text{magn}} = 2\,000 : 1$

4.2 Wechselstrom

4.2.1 Wechselspannung

4.2.01 $u = U(t) = U_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$

Momentanwert: Spannung zu einem gegebenen Zeitpunkt,
Spitzenspannung: Maximalwert der Spannung,

Phase: Drehwinkel $\varphi = \omega \cdot t$ der Schwingung,
 Frequenz: Anzahl der Schwingungen pro Sekunde,
 Periode: Zeitdauer einer Schwingung,
 Effektivspannung = Spitzenspannung / $\sqrt{2}$

4.2.02 Effektivspannung 230 V ± 10 % bei einer Frequenz von 50 Hz

4.2.03 58,94 V

4.2.04 Durch die Umdrehungsgeschwindigkeit der Leiterschleife im Magnetfeld

4.2.2 Wechselstromwiderstände

4.2.05 Ohmscher Widerstand: R ist unabhängig von f ,

$$\text{kapazitiver Widerstand: } X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$\text{induktiver Widerstand: } X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$$

4.2.06 Vergleichen Sie die Zeigerdiagramme in der Randspalte.

4.2.07 a) 677,25 Ω , 0,020 7 A, b) 338,63 Ω , 0,041 3 A, c) 33,86 Ω , 0,413 4 A

4.2.08 a) 31,42 Ω , 0,446 A, b) 62,83 Ω , 0,223 A, c) 628,32 Ω , 0,022 3 A

4.2.09 L wird um den Faktor μ_r größer, daher wird X_L um denselben Faktor größer.

4.2.3 Schaltung von Wechselstromwiderständen

4.2.10 Vergleichen Sie hierzu die Zeigerdiagramme in der Randspalte des Kapitels.

4.2.11 5,684 MΩ, 89,9°

4.2.12 2,459 kΩ, 12,55°

4.2.13 1 523 Ω, 10,06°, 20,97 Hz

4.2.14 33,82 Ω, 88,7°, 20,97 Hz, Stromresonanz

4.2.15 677,3 nF

4.2.16 244,9 Ω

4.2.17 Im Resonanzfall Phasenverschiebung 0°

4.2.4 Energie und Leistung im Wechselstromkreis

4.2.18 51,25 W

4.2.19 2,983 W, 0,079 W

4.2.20 Die Scheinleistung ist Produkt der Maximalwerte von Strom und Spannung; da Strom und Spannung nicht phasengleich sind, geht aber nur die Wirkleistung in Wärme verloren.

4.2.5 Der Trafo

4.2.21 Durch die Anzahl der Primär- und Sekundärwicklungen: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2}$

4.2.22 21,8 Sekundärwicklungen, 0,191 A primär, 7 A sekundär

4.2.23 4 545 A, 2,632 A

4.2.24 Bei einer vorgegebenen elektrischen Leistung erhält man bei höheren Spannungen kleinere Stromstärken, dadurch ist die ohmsche Verlustleistung des Stromes kleiner.

5 Moderne Physik

5.1 Relativitätstheorie

5.1.1 Die Lichtgeschwindigkeit

5.1.01 $c_0 = 299\ 792\,458 \text{ km/s} = 299\ 792\,458 \text{ m/s} \approx 1\ 079\ 252\ 849 \text{ km/h}$

5.1.02 Olaf Römer setzte die zeitliche Verzögerung des Eintritts des Jupitermondes Io in den Schatten von Jupiter mit dem Durchmesser der Erdbahn um die Sonne gemäß $v = \Delta s / \Delta t$ in Beziehung. $c_0 \approx 2,992 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

5.1.03 Rund 7 Tage; $9,059 \cdot 10^{11} \text{ m}$

5.1.04 Rund 8,492 h; $4,582 \cdot 10^9 \text{ m}$

5.1.2 Einsteinsche Postulate und die einsteinsche Lichtuhr

5.1.05 Relativitätsprinzip: Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen die gleiche mathematische Form an. Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt. Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Die Geschwindigkeit des Lichts hat im Vakuum unabhängig vom Bewegungszustand von Quelle und Beobachter immer denselben Wert c_0 .

5.1.06 $v_{\text{ges}} \approx 10,002\ 6\%$ von c_0

5.1.07 $v_{\text{ges}} \approx 99,868\ 6\%$ von c_0

5.1.08 Relativitätsprinzip: Die Naturgesetze nehmen in allen Inertialsystemen die gleiche mathematische Form an. Alle Inertialsysteme sind gleichberechtigt.

5.1.09 Eine Lichtuhr, die als periodischen Vorgang, das Hin und Her pendeln eines einzelnen Lichtteilchens (Lichtquants) zwischen zwei idealisierten planparallelen Spiegeln benutzt

5.1.10 0,943

5.1.11 $v \approx 99,994\ 999\ 9\%$ von c_0

5.1.12 $t_b = t_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$ und $l_b = l_r \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}$

5.1.13 $v = 60\%$ von c_0

5.1.14 3 599,999 999 999 938 4 s

5.1.15 Klassisch: $N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/\tau}$ mit $\tau = 2,2\ \mu\text{s}$

Relativistisch: $N(t) = N_0 \cdot 2^{-0,035t/\tau}$ mit $\tau = 2,2\ \mu\text{s}$

5.1.16 Hat ein Punkt P die Raumkoordinaten $(x \mid y \mid z)$ im Inertialsystem I, dann berechnen sich die Raumkoordinaten $(x_b \mid y_b \mid z_b)$ für das mit v nach rechts bewegte Inertialsystem I_b nach Galileo Galilei gemäß $x_b = x - v \cdot t$, $y_b = y$ und $z_b = z$; $t_b = t$.

Lorentztransformation

$$x_b = \gamma \cdot (x - v \cdot t), y_b = y \text{ und } z_b = z; t_b = \gamma \cdot \left(t - \frac{v \cdot x}{c_0^2} \right) \text{ mit } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}}$$

5.1.17 $x_b = -625,349\text{ m}$, $t_b = 6,352\ \mu\text{s}$

5.1.18 $x_b = \gamma \cdot (x - v \cdot t)$, $y_b = y$ und $z_b = z$; $t_b = \gamma \cdot \left(t - \frac{v \cdot x}{c_0^2} \right)$ mit dem Gammafaktor wie in **5.1.16**

$$E_0 = m_0 \cdot c_0^2 \quad m_d = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c_0}\right)^2}}$$

5.1.20 Relative physikalische Größen: dynamische Masse, Länge, Zeit; absolute physikalische Größen: Ruhemasse, Vakuumlichtgeschwindigkeit

5.1.21 $m_d = 1,180\ 89 \cdot 10^{-25}\text{ kg}$

5.1.22 $v = 2,982\ 897\ 294 \cdot 10^8\text{ m/s}$

5.1.23 $v = 2,997\ 924\ 564 \cdot 10^8\text{ m/s}$

5.1.24 $E^2 = m_0^2 \cdot c_0^4 + p_d^2 \cdot c_0^2$

$$5.1.25 \quad m_d = m_0 \cdot \left(1 + \frac{v^2}{2 \cdot c_0^2} + \frac{3 \cdot v^4}{8 \cdot c_0^4} + \dots \right)$$

$$5.1.26 \quad f_B = \frac{f_Q}{1 - \frac{v}{c}} \quad f_B = f_Q \cdot \sqrt{\frac{1 - \frac{v}{c_0}}{1 + \frac{v}{c_0}}}$$

5.1.27 1 000 nm

5.1.28 Die Aussagekraft der Sonografie kann durch die Anwendung des Dopplereffekts erhöht werden. Man unterscheidet eindimensionale Verfahren von zweidimensionalen, farbcodierten Anwendungen.

$$5.1.29 \quad I_O = I_h \cdot (1 - g \cdot \Delta h / c_0^2) \\ t_O = t_h \cdot (1 - g \cdot \Delta h / c_0^2)$$

5.1.30 $9,161 \cdot 10^{11}\text{ m}$

5.1.31 $1/(2\ 001)$

5.1.32 1.000 000 003 905 beträgt das Verhältnis der Zeiten auf Grund der ART; 0,999 999 999 947 712 beträgt das Verhältnis der Zeiten aufgrund der SRT.

5.1.33 Längenkontraktion, Zeitdilatation in der SRT wegen v/c_0 ; Längenkontraktion, Zeitdilatation in der ART wegen $g \cdot \Delta h / c_0^2$;

5.1.34 $8,988 \cdot 10^4 \text{ m/s}^2$

5.1.35 $1,9 \cdot 10^7 \text{ m}$

5.1.36 Die Periheldrehung ist die Verschiebung des Perihels, des sonnennächsten Punktes, auf der Bahn eines um die Sonne laufenden Körpers.

5.2 Quantenphysik

5.2.1 Die Lichtquantenhypothese

5.2.01 $W_A = 5,48 \text{ eV}$, Platin

5.2.02 Die Energieabgabe erfolgt nicht kontinuierlich, sondern nur in Vielfachen von kleinsten „ h “-Einheiten.

5.2.03 In der Medizin, im Bereich der bildgebenden Verfahren, diagnostischen Radiologie und Nuklearmedizin, bei Solarzellen, Belichtungsmessern und Sensoren

5.2.04 Eine Zinkplatte wird auf einem Elektroskop befestigt. Danach wird z. B. ein PVC-Stab durch Reibung aufgeladen und die Ladung auf die Zinkplatte gebracht. Das Elektroskop zeigt einen Ausschlag, es ist negativ aufgeladen. Jetzt wird eine Quecksilberdampflampe auf die Zinkplatte gerichtet.

5.2.05 Streuung von Strahlung an einem Körper führt zu einer Frequenzverminderung.

5.2.06 Für $\lambda = 400 \text{ nm}$ ergibt sich eine negative kinetische Energie von $-1,22 \text{ eV}$.

5.2.2 Die de Broglie-Welle

$$\text{5.2.07} \quad \lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{60 \cdot 2 \cdot 10^{-26} \cdot 220} \approx 2,51 \cdot 10^{-10} \text{ m} \approx 2,5 \text{ pm}$$

5.2.08 1. Zu jedem Teilchen gehört eine Welle mit der Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$.

2. Zwischen der Frequenz f der Welle und der Energie E des Teilchens besteht die Beziehung $E = h \cdot f$. Jedem Teilchen mit Ruhemasse kann eine Wellenlänge zugeordnet werden.

5.2.09 In der Nanotechnologie, die wiederum Anwendung in der Computerindustrie und Automobiltechnik findet. Zum besseren Verständnis der Eigenschaften von Atomen und Molekülen und ihres Zusammenwirkens. Darstellung kleinster Objekte, die mit dem Lichtmikroskop nicht mehr aufgelöst werden können.

5.2.10 Es ist ein direkter Nachweis für die Richtigkeit der Hypothesen von de Broglie und damit wieder ein Beweis für die quantenmechanischen Theorien.

5.2.11 Weil keine Aussage darüber gemacht werden kann, was das Elektron zwischen Quelle und Schirm ist und macht. Es können nur Wahrscheinlichkeitsaussagen über das Auftreffen des Teilchens auf dem Schirm gemacht werden.

5.2.12 Ein Quantenobjekt kann durch eine Wellenfunktion beschrieben werden.

Es kann nicht der genaue Aufenthaltsort eines Teilchens angegeben werden, sondern nur die sogenannte Wahrscheinlichkeitsdichte. Diese entspricht dem Betragsquadrat der Wellenfunktion.

5.2.13 Wegen der großen Masse von klassischen Objekten, wie z. B. einem Ball, ist die De-Broglie-Wellenlänge sehr klein. Die Interferenzeffekte können nicht wahrgenommen werden. Ein Ball mit der Masse $0,5 \text{ kg}$ und der Geschwindigkeit 3 m/s hat eine Wellenlänge von $4,42 \cdot 10^{-34} \text{ m}$.

5.2.14 Die Wellenfunktion beschreibt ein Quantenobjekt. Sie breitet sich zwischen Quelle und Schirm aus. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist das Betragsquadrat der Wellenfunktion und gibt (nach erfolgter Integration) die Wahrscheinlichkeit an, ein Teilchen in einem bestimmten Raumbereich zu finden.

5.2.3 Die heisenbergsche Unschärferelation

5.2.15 Von Heisenberg selbst stammt dieses Gedankenexperiment, in dem die Position eines Elektrons mit Licht gemessen werden soll. Es muss Licht sehr kurzer Wellenlänge verwendet werden, um den Ort eines Teilchens sehr genau zu bestimmen. Je kurzwelliger jedoch das Licht ist, desto größer ist seine Energie, wodurch ein starker Impuls auf das zu messende Teilchen übertragen wird. Durch die immer genauere Ortsmessung verändert man den Impuls des Teilchens immer mehr.

5.2.16 Die Unschärferelation besagt, dass Ort und Impuls eines Quantenobjekts prinzipiell nicht gleichzeitig beliebig genau bestimmt werden können. Das Produkt aus Orts- und Impulsunschärfe ist immer größer als oder so groß wie das plancksche Wirkungsquantum geteilt durch 2π .

$$\text{5.2.17} \quad \frac{h}{2\pi \cdot m \cdot \Delta x} = 1,775 \cdot 10^{-23} \text{ m/s};$$

die Unschärfe ist so klein, dass eine Messung nicht relevant ist. Die Bewegung eines Teilchens dieser Größenordnung kann mit der klassischen Physik beschrieben werden.

5.2.18 Nach Bohr und Heisenberg wird ein Quantenobjekt vollständig durch die Wellenfunktion beschrieben. Es ist nicht sinnvoll, über den Ort des nicht beobachtbaren Quantenteilchens zu sprechen. Die Teilchen haben keine reelle Existenz, sie werden erst durch die Messung zur Realität.

5.2.4 Der Tunneleffekt

5.2.19 Ein Quantenteilchen, z. B. ein Elektron, hat eine Gesamtenergie E und bewegt sich auf eine Potenzialschwelle der Höhe E_0 und der Breite l zu. Da E kleiner ist als E_0 würde das Elektron aufgrund der klassischen Physik reflektiert. Aus der Sicht der Quantenmechanik kann es als Materiewelle aufgefasst werden und es besteht eine gewisse Wahrscheinlichkeit, dass es auf der anderen Seite auftaucht.

5.2.20 Der sogenannte Durchlasskoeffizient gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Elektron durch die Barriere hindurchkommt. Er hängt vor allem von drei Größen ab, der Teilchenmasse, der Länge des Potenzialwalls und der Energiedifferenz zwischen Teilchen und Potenzialschwelle.

5.2.21 Eine winzige Metallspitze wird sehr nahe (wenige Millionstel Millimeter) über die zu untersuchende Probe gebracht. Zwischen Nadel und Probe fließt ein sehr kleiner Strom, der Tunnelstrom. Beim Abrastern der Probenoberfläche wird die Höhe der Spitze mit einer Feinmechanik (Piezoelementen) so geregelt, dass der Tunnelstrom konstant bleibt. Es entsteht ein Höhenprofil der Oberfläche.

5.2.22 Da das Mikroskop sehr stark auf äußere Einflüsse reagiert, muss es so gut wie möglich von der Umwelt abgeschirmt werden, z. B. durch Schallisolation, Federaufhängung und thermische Isolation.

5.2.23 Ein wichtiges Werkzeug in der Oberflächenchemie, minimale Kräfte zwischen Spitzte und Probe werden gemessen, um die Oberflächenstruktur anzugeben, z. B. die von lebenden Zellen, allgemein von nicht leitenden Proben, Anwendung in den Biowissenschaften

5.2.5 Die Schrödinger-Gleichung

5.2.24 Beschreibung der Orbitale der Atome in der Chemie, Erklärung der Eigenschaften von Elementarteilchen, Merkmale der Neutronen und Protonen im Atomkern

5.2.25 Wellenfunktionen von Elektronen in einem Atom, sie beschreiben die räumliche Verteilung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Elektrons

5.2.26 Wellenfunktion ist die Lösung der Schrödinger-Gleichung, im Allgemeinen eine komplexe Größe. Der Betrag von ψ zum Quadrat ist immer reell und positiv. Daher hat nur das Quadrat eine physikalische Bedeutung und wird als Wahrscheinlichkeitsdichte bezeichnet.

5.2.27 Benannt nach Ernest Solvay, einem belgischen Großindustriellen, internationale Zusammenkunft wichtiger Persönlichkeiten der Physik, um über aktuelle Forschungsthemen zu diskutieren; Albert Einstein, Max Planck, Werner Heisenberg, Louis de Broglie, Niels Bohr, Marie Curie

5.2.5 Verschränkte Teilchen

5.2.28 Die Verschränkung ist eine grundlegende quantenmechanische Eigenschaft. Zwei oder mehr Teilchen heißen verschränkt, wenn sie nicht unabhängig voneinander beschrieben werden können.

5.2.29 Verschränkte Photonen kann man als ein Quantenobjekt sehen, sie sind miteinander in einem Gesamtzustand überlagert. Eine Wellenfunktion beschreibt diesen Zustand.

5.2.30 Ein herkömmlicher Computer verwendet Bits, die nur die Werte 0 oder 1 annehmen können. Der Quantencomputer arbeitet mit Quantenobjekten als Grundlage und benutzt Quantenbits, kurz Qubits. Diese können als Quantenüberlagerungen von 0 und 1 existieren.

5.2.31 Sie ist ein Verfahren, um eine abhörsichere Datenübertragung zu ermöglichen. Dabei werden Daten mithilfe verschränkter Photonenpaare übermittelt.

5.3 Atom- und Kernphysik

5.3.1 Das bohrsche Atommodell

5.3.01 Das daltonsche Harte-Kugel-Modell, das thomsonsche Rosinenkuchenmodell, das rutherford'sche Planetenmodell, das bohrsche Atommodell, das bohr-sommerfeldsche Atommodell

5.3.02 Rutherford und seine Mitarbeiter schossen mit He-Kernen auf dünne Goldfolien und detektierten die Geschosse. Obwohl die Goldfolien rund 7 000 Atomlagen stark waren, wurden sehr viele Alphateilchen nicht oder kaum merklich abgelenkt, sodass Rutherford zwischen Atomkern und Atomhülle unterschied. Die Rückstreuung sehr weniger He-Kerne um große Winkel unterstützte seine Argumentation, dass fast die gesamte Masse und Ladung im winzigen Atomkern (Durchmesser $\approx 10^{-15}$ m) konzentriert sein müssen.

- 5.3.03** Für das H-Atom gilt: Das Elektron kann sich mit der Geschwindigkeit v_n nur auf stabilen Kreisbahnen mit Radius r_n um das ruhend angenommene Proton bewegen, wenn der Drehimpuls des Elektrons die Quantenbedingung $L_n = m_e \cdot r_n \cdot v_n = n \cdot \hbar / (2\pi)$ erfüllt.

$$E_n \approx \frac{-13,6 \text{ eV}}{n^2}, v_n \approx \frac{2,2 \cdot 10^6}{n} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}, r_n \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m} \cdot n^2$$

Bei einem Bahnwechsel des Elektrons tritt ein Photon mit der Frequenz $f = 3,3 \cdot 10^{15} \cdot \left| \frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right| \cdot \text{Hz}$ auf.

Bei Atomen mit mehreren Protonen und nur einem Elektron sind die Rechnungen analog auszuführen.

- 5.3.04** Balmerserie:

$$4,567 \cdot 10^{14} \text{ Hz}, 6,166 \cdot 10^{14} \text{ Hz}, 6,906 \cdot 10^{14} \text{ Hz}, 7,308 \cdot 10^{14} \text{ Hz}, 7,550 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

$$6,564 \cdot 10^{-7} \text{ m}, 4,862 \cdot 10^{-7} \text{ m}, 4,341 \cdot 10^{-7} \text{ m}, 4,102 \cdot 10^{-7} \text{ m}, 3,971 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

und in Nanometer: 656,4 nm, 486,2 nm, 434,1 nm, 410,2 nm, 397,1 nm

- 5.3.05** Helium

$$1,169 \cdot 10^{16} \text{ Hz}, 1,233 \cdot 10^{16} \text{ Hz}, 1,263 \cdot 10^{16} \text{ Hz}, 1,279 \cdot 10^{16} \text{ Hz}, 1,288 \cdot 10^{16} \text{ Hz}$$

$$25,64 \text{ nm}, 24,31 \text{ nm}, 23,74 \text{ nm}, 23,44 \text{ nm}, 23,27 \text{ nm}$$

- 5.3.06** $E_n = -54,4 \text{ eV}/n^2$

5.3.2 Das Atommodell von Bohr und Sommerfeld und das Pauliprinzip

- 5.3.07** Arnold Sommerfeld erweiterte das bohrsche Atommodell um **drei Quantenzahlen**. Wie bei Rutherford sind wieder Ellipsenbahnen möglich. Zur Unterscheidung von Ellipsen mit gleich großer Halbachse a führte Sommerfeld die **Nebenquantenzahl** l ein. Die Orientierung der Bahn wird durch die **Orientierungs-** oder **Magnetquantenzahl** m beschrieben. Um weitere Details in den gemessenen Linienspektren der Atome unterscheiden zu können, wurde die **Spinquantenzahl** s eingeführt

- 5.3.08** Die Elektronen werden durch die **vier Quantenzahlen** n, l, m und s beschrieben.

Die **Haupt-** oder **Energiequantenzahl** n kann alle natürlichen Zahlen größer als oder gleich 1 annehmen.

Die **Neben-** oder **Drehimpulsquantenzahl** l kann alle natürlichen Zahlen größer als oder gleich 0 und kleiner als oder gleich $n - 1$ annehmen.

Die **Orientierungs-** oder **Magnetquantenzahl** m kann alle ganzen Zahlen größer als oder gleich $-l$ und kleiner als oder gleich l annehmen.

Die **Spinquantenzahl** s kann entweder den Wert $+1/2$ oder $-1/2$ annehmen.

- 5.3.09** $|1, 0, 0, 1/2\rangle, |1, 0, 0, -1/2\rangle, |2, 0, 0, 1/2\rangle, |2, 0, 0, -1/2\rangle, |2, 1, 0, 1/2\rangle, |2, 1, 0, -1/2\rangle, |2, 1, 1, 1/2\rangle$

- 5.3.10** In der n -ten Schale kann das Quadrupel $|n, l, m, s\rangle$ bei gleichem l und m jeweils 2-s-Werte annehmen. l kann die Werte 0 bis $n-1$ annehmen und m jeweils $-l$ bis l , sodass n^2 Möglichkeiten bestehen.

5.3.3 Kernphysik

- 5.3.11** $m_{\text{Kern}} \approx A \cdot u$, $r_{\text{Kern}} \approx r_H \cdot A^{1/3}$; r_H = Kernradius des H-Atoms; $r_H \approx 1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$; die Kernmasse variiert von 1 u bis ca. 270 u; der Kernradius von r_H bis ca. 6,4 r_H .

- 5.3.12** $5,864 \cdot 10^{11} \text{ kg}$

- 5.3.13** $2,32 \cdot 10^{-26} \text{ kg}; 3,374 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

- 5.3.14** $r \approx 217 \text{ m}$

- 5.3.15** $3u/(4 \cdot r_H^3 \cdot \pi); 1,4 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$

5.3.4 Radioaktivität

- 5.3.16** α -, β - und γ -Strahlen; durch ihre Ablenkbartigkeit in elektrischen und magnetischen Feldern und anhand ihres Durchdringungsvermögens können sie unterschieden werden.

- 5.3.17** Wir geben jeweils die Prozentsätze der noch vorhandenen Kerne nach zehn Tagen, einem Jahr, 100 Jahren und 1 000 Jahren an, falls sie noch wesentlich größer als null sind.

Iod I-131: 42,3 %;

Cäsium Cs-137: 99,9 %; 97,9 %; 9,9 %

Radium Ra-226: 100 %; 100 %; 95,8 %; 64,9 %

Kohlenstoff C-14: 100 %; 100 %; 98,8 %; 88,6 %

Uran U-238: 100 %; 100 %; 100 %; 100 %

- 5.3.18** $\tau = \ln(2)/\lambda$; $b = -\tau$; $a = e^{-\lambda}$

5.3.19 Seibersdorf Laboratories bündelt das Wissen aus 30 Jahren Forschung und Entwicklung mit bestem Service. Das Geschäftsfeld Radiation Safety and Applications steht für Forschung und Entwicklung zum Schutz von Mensch und Umwelt bei der Anwendung von ionisierender Strahlung und repräsentiert die jahrzehntelange Seibersdorfer Tradition auf diesem Gebiet.

5.3.20 $N(t) = N_0 \cdot 2^{-t/\tau}$

5.4 Astrophysik, Gravitation

5.4.01 $g(m, r) = Gm/r^2$

5.4.02 $1,17 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}^2; 2,92 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2; 7,30 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}^2$

5.4.03 Individuelle Lösungen

5.4.04 $GM/(b^2\sqrt{2}); b = a/2$

5.4.05 $8,196 GM/a^2$

5.4.06 GM/a^2

5.4.07 $2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$

5.4.08 Für 3, wenn $m_1 \ll m_2, m_3$

5.4.09 $1 \text{ AE} = 1,496 \cdot 10^8 \text{ km} = 1,496 \cdot 10^{11} \text{ m}; 1 \text{ Lj} \approx 9,5 \cdot 10^{12} \text{ km} \approx 9,5 \cdot 10^{15} \text{ m};$
 $1 \text{ pc} \approx 3,085 \cdot 10^{13} \text{ km} \approx 3,085 \cdot 10^{16} \text{ m}$

5.4.10 $(132,21 \pm 8,28) \text{ pc}$

5.4.11 $(5,2 \cdot 10^6 \pm 1,7 \cdot 10^4) \text{ AE}; (81,683 \pm 0,267) \text{ Lj}$

5.4.12 $L = 4\pi \cdot R^2 \cdot \sigma \cdot T_{\text{eff}}^4$

5.4.13 $1,96 : 1 : 0,64$

5.4.14 Um 7,5 Größenklassen negativer (heller)

5.4.15 2 243 K

5.4.16 $6,5 \cdot 10^6 \text{ km};$ rund 9,3-facher Sonnenradius

5.4.17 $4,6 \cdot 10^6 \text{ km} \approx 6,6 \cdot R_{\text{Sonne}}; 1,5 \cdot 10^7 \text{ km} \approx 20,8 \cdot R_{\text{Sonne}}; 4,6 \cdot 10^7 \text{ km} \approx 65,8 \cdot R_{\text{Sonne}}$

5.4.18 5 926 K

5.4.19 $3,47 \cdot 10^{27} \text{ W}$

5.4.20 R_{Sonne} und $T_{\text{eff}} \approx 15\,350 \text{ K}; 50 \cdot R_{\text{Sonne}}$ und $T_{\text{eff}} \approx 2\,170 \text{ K}; 100 \cdot R_{\text{Sonne}}$ und
 $T_{\text{eff}} \approx 1\,535 \text{ K}; 500 \cdot R_{\text{Sonne}}$ und $T_{\text{eff}} \approx 686 \text{ K}$

5.5 Higgs, das Standardmodell, SUSY und TOE

5.5.01 Zwölf elementare Materienteilchen (6 Quarks und 6 Leptonen) und Bosonen

5.5.02 Proton: zwei up-Quarks und ein down-Quark; Neutron: ein up- und zwei down-Quarks

5.5.03 Individuelle Lösungen

5.5.04 Wegen F_{Coulomb} prop. $1/r^2$ ist die Reichweite unendlich.

5.5.05 SUSY = Supersymmetrie; TOE = Theory of Everything

5.5.06 Individuelle Lösungen

Bildnachweis

- S. 12: OMV-Raffinerie (<http://www.barcotec.at/>);
Glockenboden (<http://rvtp.de>)
- S. 13: Formel 1 1936 (<http://www.seriouswheels.com>);
Formel 1 Heute (<http://www.motorvision.de>);
Nicolaus August Otto (© Heiner Zechmann)
- S. 14: Rudolf Diesel (© Heiner Zechmann)
- S. 15: Dieselmotoren (<http://www.bimmertoday.de>);
Schmieröl (© Heiner Zechmann)
- S. 16: Steamcracker (Grafik 8 der BASF-Folienserien Steamcracker II)
- S. 17: Carbidlampen (Urheber unbekannt)
- S. 18: Gegenstände aus Polypropen (© Heiner Zechmann)
- S. 20: Querschnitt eines Winterreifens (© Heiner Zechmann)
- S. 21: Joseph Loschmidt (<http://www.armstrongwynne.org>)
- S. 25: BASF-Stammwerk in Ludwigshafen
(<http://www.premiumorange.com>);
Rohrleitungen (OMV-Homepage Fotoreport)
- S. 27: Etikette eines Fleckputzmittels (Urheber unbekannt)
- S. 28: Icmesa (<http://www.anstageslicht.de>)
- S. 29: Frauen beim Destillieren (<http://de.wikipedia.org>);
Alkotestgerät (<http://www.bundespolizei.de>)
- S. 32: Ascanio Sobrero (<http://communicatescience.com>)
- S. 34: Joseph Lister (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 36: Wattebausch mit Ether getränk (© Johannes Jaklin)
- S. 38: Oxidierte Kupferspirale in Ethanol (© Johannes Jaklin)
- S. 39: Fehlingsche Lösung vor der Reaktion (<http://www.fehling-lab.de>)
- S. 41: Etikette mit dem Hinweis auf die Vergällung mit MEK
(<http://www.versuchschemie.de>)
- S. 42: Kleopatra (<http://tinkawelt.files.wordpress.com>);
- S. 45: Kristalline Ethansäure (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 47: Etikette einer Fischkonserve mit Konservierungsmitteln
(© Johannes Jaklin); Emil Fischer (<http://ro.wikipedia.org>)
- S. 48: Polarimeter (<http://2.bp.blogspot.com>)
- S. 58: Fingerabdruck (© Heiner Zechmann)
- S. 59: Sandoz Österreich in Kundl (<http://www.sandoz.at>)
- S. 61: Hermann Staudinger (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>); Papiermaschine (OMYA Firmenbroschüre)
- S. 66: Thermoplast (BASF-Ausbildungsbroschüre „Kunststoffphysik im Gespräch“)
- S. 67: Karl Ziegler (<http://www.stiftung-sammlung-ziegler.de>);
Giulio Natta (<http://media.web.britannica.com>)
- S. 69: Superkleber (© Heiner Zechmann)
- S. 71: Perlonseil (© Heiner Zechmann)
- S. 72: Steckdose (© Heiner Zechmann)
- S. 73: Spraydose mit PU-Schaum; Experiment PU-Schaum
(© Heiner Zechmann)
- S. 74: Reparaturset mit UP (© Heiner Zechmann)
- S. 75: Elastische Fugenmasse auf Siliconbasis (© Heiner Zechmann)
- S. 76: Kunststoffauto (<http://www.chemie-am-auto.de>); Axialpumpe
(<http://www.aerztezeitung.de>)
- S. 77: Verschiedenfarbige Granulate; Polyamidplättchen
(© Heiner Zechmann); Firma Omya in Gummern
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 78: Wicklung eines Stabhochsprungstabes (<http://s311936601.website-start.de>); Carbonfaser im Rasterelektronenmikroskop
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 79: 150-t-Kalander (<http://www.schaeffler.com>); Mundstück eines
Extruders (<http://www.lauffeuer-online.de>); Fensterprofile aus
Aluminium (<http://www.maibaum-bauelemente.de>)
- S. 80: Blasen einer PE-Folie (<http://www.scheyer.at>);
Insekt in UP-Gießharz (© Heiner Zechmann); Superkleber/Araldite
(<http://themarketingdirectors.files.wordpress.com>)
- S. 81: Elektrotauchlackierung eines Automobils
(<http://www.aktuelle-wochenschau.de>)
- S. 82: Brennprobe PMMA (© Heiner Zechmann)
- S. 83: Beilsteinprobe (© Heiner Zechmann)
- S. 84: Tyndalleffekt (<http://silver-lightning.com>)
- S. 85: Phasen der Schmutzentfernung (<http://www.chemie-schule.de>);
Wassertropfen auf Gewebe; Benetzung durch Tenside
(<http://www.seifen.at/museum>)
- S. 87: Schaumbildung am Rhein 1971 (<http://thomasmayerarchive.de>)
- S. 88: Waschnittelwerbung von 1908 (<http://www.marnach.info>);
Textilstück (<http://www.rw-textilservice.de>)
- S. 89: Historische Indigoplantage in Indien
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 90: Kaiserin Eugénie (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 94: DC von Blattfarbstoffen; Küpenfärbung (© Heiner Zechmann)
- S. 96: Hippokrates (<http://www.neuropool.com>)
- S. 98: Alexander Fleming (<http://www.beobachter.ch>);
Gerhard Domagk (<http://www.medizin.uni-greifswald.de>)
- S. 100: James Whyte Black (<http://static.guim.co.uk>)
- S. 101: Adolf Butenandt (<http://www.rsc.org>)
- S. 106: Gerardus Johannes Mulder (<http://images.ookaboo.com>)
- S. 122: Francis Crick (<http://rpmedia.ask.com/ts?u=/wikipedia/commons>);
James Watson (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 139: Hans Adolf Krebs (<http://edu.glogster.com>)
- S. 143: Louis Pasteur (<http://www.sciencekids.co.nz>);
Robert Koch (<http://www.wired.com>);
Alexander Fleming (<http://www.chemheritage.org>)
- S. 151: Fermenter in der biotechnologischen Industrie
(<http://www.lactosan.at>)
- S. 155: Modernes Sudhaus und Whirlpool der Versuchsbrauerei
der Brauunion Linz (© Alfred Mar)
- S. 161: Ölsand-Tagebau (<http://kohletagebau.blogsport.de>);
Methanhydrat (<http://www.spektrum.de>)
- S. 162: Torfmoos (© Barbara Schwaiger)
- S. 163: Torfbau in Connemara; Frästorfgewinnung
(© Barbara Schwaiger)
- S. 165: Landwirtschaftliche Biogasanlage in Pucking (<http://www.oofegas.at>); Hubert von Goisern (<http://www.hubertvongoisern.com>);
Rapsfeld (<http://t1.ftcdn.net>)
- S. 166: Grovesches Element (<http://de.academic.ru>)
- S. 167: Beispiele für Brennstoffzellen (<http://www.pressebox.de>)
- S. 185: EU Biologo (<http://www.veggietag-hannover.de>);
AMA-Biozeichen (<http://sunny7.at>)
- S. 186: Ernährungsspyramide des BM für Gesundheit
(<http://upload.wikimedia.org>)
- S. 191: Viktor Franz Hess (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>);
Richard Phillips Feynman (<https://cascience6.wikispaces.com>)
- S. 194: Isaac Newton (<http://www.arm.ac.uk>)
- S. 212: Joseph Fourier (<http://www.malaspina.com>)
- S. 214: Jules Antoine Lissajous (<http://img1.liveinternet.ru>)
- S. 220: Tacoma-Narrows-Hängebrücke (<http://www.frederikm.de>)
- S. 221: Pohlsches Drehpendel (<http://gfs.khmeyberg.de>);
Zungenfrequenzmesser (<http://de.academic.ru>)
- S. 225: Drehpendel einer Wellenmaschine (© Peter Fischer)
- S. 226: Louis-Victor de Broglie (<http://www.kvarkadabra.net>)
- S. 228: Christiaan Huygens (<http://www.drebbel.net>)
- S. 231: Twillabrodr Snel van Rojen (<http://en.academic.ru>)
- S. 234: Interferenz in der Wellenwanne (<http://gfs.khmeyberg.de>)
- S. 245: Augustin Jean Fresnel (<http://lowres-picturecabinet.com>)
- S. 251: Ernst Abbe (<http://www.zeiss.de>)
- S. 252: Teleskop (<http://www3.mpifr-bonn.mpg.de>)
- S. 256: Beugungsmuster (<http://www.elsenbruch.info>)
- S. 260: Sir David Brewster (<http://www.stereoskopie-shop.com>)
- S. 270: Rudolf Clausius (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 272: Amedeo Avogadro (<http://openi.nlm.nih.gov>)
- S. 273: Teleskopgasbehälter (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/de>);
Robert Boyle (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>);
Edme Mariotte (<http://psv.aistleitner.at>)
- S. 274: Joseph Gay-Lussac (<http://de.wikipedia.org>);
Guillaume Amontons (<http://lifechums.files.wordpress.com>)
- S. 275: John Dalton (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 278: James Clerk Maxwell (<http://www.peoplequiz.com>)
- S. 279: Nicolas Léonard Sadi Carnot (<http://de.wikipedia.org>)
- S. 280: William Thomson – Lord Kelvin
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
- S. 292: Perpetuum Mobile (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>); Tischuhr AtmosReutter (<http://de.wikipedia.org>)
- S. 294: Ludwig Boltzmann (<http://www.uni-graz.at>);
Walther Nernst (<http://de.wikipedia.org>)
- S. 295: Englische Baumwollspinnerei (<http://www.muenster.de>)
- S. 299: Dampfmaschinenbetriebener Generator
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>);
Michael Faraday (<http://www-personal.umich.edu>)
- S. 300: Die japanische JR-Maglev-Magnetschwebebahn
(<http://de.wikipedia.org>)
- S. 301: Emil Lenz (<http://objetoseducacionais2.mec.gov.br>);
Thomsonsche Kanone (NTL)
- S. 302: Waltenhofensches Pendel (NTL)

- S. 304: Joseph Henry (<http://de.wikipedia.org>)
S. 307: Vorführung eines Magnetkranz (<http://de.wikipedia.org>)
S. 321: Albert Einstein – Albert Einstein (<http://otacun.net>);
Isaac Newton (<http://www.arm.ac.uk>)
S. 322: Louis Fizeau (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 323: Leon Foucault (<http://www.unet.univie.ac.at>)
S. 300: Olaf Römer (<http://de.wikipedia.org>)
S. 332: Hendrik Antoon Lorentz
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 336: Sir Arthur Stanley Eddington
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 339: Briefmarke Max Planck (© Romana Fiala)
S. 341: Briefmarke Nobelpreis an Albert Einstein für die Deutung des
lichtelektrischen Effekts (© Romana Fiala)
S. 342: Briefmarke plancksches Wirkungsquantum (© Romana Fiala)
S. 343: Louis-Victor de Broglie
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 344: Richard Phillips Feynman (<http://www.atomicarchive.com>)
S. 345: Max Born (<http://s.fixquotes.com>)
S. 346: Fullerene auf einer Siliciumoberfläche (Wave and Particle in Molecular Interference Lithography; <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.103.263601> University of Vienna, Boltzmanngasse 5, 1090 Vienna, Austria, Markus Arndt); Einzelbilder von Molekülinferenz (Real-time single-molecule imaging of quantum interference; Vienna Center of Quantum Science and Technology, Faculty of Physics, University of Vienna, Boltzmanngasse 5, 1090 Vienna, Austria, Markus Arndt)
S. 347: Werner Heisenberg (<http://www.heig-do.de>)
S. 350: Binning und Rohrer mit dem ersten Rastertunnelmikroskop
(Courtesy of International Business Machines Corporation,
© 2012 International Business Machines Corporation);
Erwin Schrödinger (<http://www.austria-lexikon.at>)
S. 352: Solvaykonferenz (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>);
Zwei verschränkte Würfel (<http://www.schattenblick.de>)
S. 353: Anton Zeilinger (<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 354: Niels Bohr (<http://25.media.tumblr.com>);
Sir Joseph John Thomson (<http://iopscience.iop.org>)
S. 355: Ernest Rutherford
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 357: Johann Jakob Balmer
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 358: Johannes Robert Rydberg (<http://www.fisicanet.com.ar>)
S. 359: Arnold Sommerfeld
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 360: Wolfgang Pauli (<http://www.unfoldingdestiny.com>)
S. 361: James Chadwick
(<http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons>)
S. 365: Lise Meitner (<http://de.wikipedia.org>)
S. 367: Enrico Fermi (<http://de.wikipedia.org>)
S. 376: Edwin Powell Hubble (<http://www.wdr3.de>)

Alle weiteren Bilder und Grafiken sind Eigentum der Trauner Verlag + Buchservice GmbH (Grafikerin Gertrud Simec, Wien) bzw. wurden von Bildagenturen (MEV Verlag GmbH, fotolia.com, stock.xchng) zugekauft.

Stichwortverzeichnis

A

Abbe, Ernst 251
 Abbildungsgleichung 246
 Abbildungsmaßstab 246
 Abfallwirtschaft 174
 ABS 73
 absolute Helligkeit 373
 absoluter Nullpunkt der Temperatur 280
 Absorption 90
 Absorptionsgesetz 190
 Absorptionsgrad 236
 Absterbephase 152
 ACE-Hemmer 100
 Acetaldehyd 39
 Acetat 156
 Aceton 40
 Acetylcholin 97
 Acetyl-CoA 138, 139
 Acetylen 17
 Acetylsalicylsäure (ASS) 96
 Aconitat 139, 156
 Acrylamid 189
 Acyl-CoA 138
 Adenin 120
 Adenosintriphosphat 131, 133
 adiabatische Zustandsänderung 286
 Adrenalin 98, 101
 aerob 133, 147
 Affinitätschromatografie-Säule 158
 Agar-Agar 118
 Agent Orange 28
 Agroethanol 146, 148
 Agrosegel 125
 Airlift-Schlaufenfermenter 150
 Akkommodation 254
 Aktivator 133
 aktive Immunisierung 144
 aktiver Transport 134
 aktivierte Essigsäure 110
 Aktivierung der Stearinäsure 138
 Aktivierungsenergie 131
 Aktivität, optische 48, 262
 –, radiologische 364
 Albumine 108
 Aldehyde 38
 Aldolase 136
 Aldosen 115
 Alkalioide 59
 Alkane 17
 Alkene 17
 Alkine 17
 Alkohol 30, 178
 –, Aufnahme und Abbau 178
 –, Gesellschaftsformen 180
 –, Langzeitfolgen 179
 alkoholische Gärung 150
 Alkoholkonsument, Risiken bei übermäßigem 179
 Alkydharze 81
 Alkylbenzensulfonate, lineare 85
 Allergen 186
 allgemeine Relativitätstheorie 336
 allosterischer Effekt 133
 Alpha-Glucose 116
 Alphateilchen 363
 Alphazerfall 363
 Ameisensäure 44
 Amide 56
 Amine 56
 Aminoplaste (UF, MF) 71
 Aminosäuren 57, 106, 124, 136, 138
 –, essenzielle 186
 –, proteinogene 106

Aminosäuresequenz 107, 124
 Aminotransferase 138
 Ammoniak 138
 Amontons, Gesetz von 274
 –, Guillaume 274
 Amphetamin 103
 amphiphil 112
 amphoter Tenside 84
 Amylasen 155
 Amylopektin 117
 Amylose 117
 Anabolika 103
 Anabolismus 130
 anaerob 133, 147
 Analgetika 97, 103
 Analytik, molekularbiologische 125
 anapleurotische Reaktion 139
 Androgene 101
 Anilin 56
 anionische Tenside 84
 Anlaufphase 151
 Anthracen 24
 Anthrachinonfarbstoffe 92
 Antibiotika 98, 144, 146, 157
 Antibiotika-Resistenzgen 158
 Antidiabetika 100
 Antihistaminika 98
 Antikörper 144
 Antiphlogistika 97
 Antipyretika 97
 Antistatika 77
 Äquivalenzdosis 190
 Äquivalenzprinzip 337
 Arachidonsäure 111
 Aramide 71
 Archebakterien 144
 AR-Mechanismus 65
 Aromaten 20
 –, mehrkernige 24
 Aspartat 138
 Aspergillus 147
 – niger 156
 Asphalt 15
 Aspirin 96
 astronomische Einheit 372
 Astrophysik 369
 Atmung 133
 Atmungskette 140
 atomare Masseneinheit 271
 Atommodell, bohrsches 354
 Atomphysik 354
 ATP 131, 133
 ATP-Synthase 141
 Atropin 55, 98
 Aufheller, optische 88
 Auflösungsvermögen 251
 Aufreinigung 149
 Aufschluss der Zellen 149
 Auge 254
 Avogadro, Amedeo 272
 –, Gesetz von 272
 Avogadrokonstante 272
 Azobenzen 91
 Azofarbstoffe 91

B

Bacillaceae 146
 Bacillus subtilis 146
 Backhefe 149
 Backhefeproduktion 154
 Bakterien 144
 Bakteriophagen 128
 Ballaststoffe 118, 119, 185
 Balmer, Johann Jakob 357
 Balmerserie 358
 Barbiturate 96
 Batchverfahren 152
 Baumwolle 62
 Bequerel, Antoine Henri 362
 Beilsteinprobe 82
 Beizenfarbstoffe 94
 Bell, John S. 353
 Belüftung 150
 Benzaldehyd 40
 Benzen 21
 Benzenbaum 23
 Benzencarbonsäure 46
 Benzin 13
 Benzodiazepine 97
 Benzoësäure 46
 Benzol 21
 Benzpyren 24
 Benzyl 24
 Beschichten 80
 Beschleunigungsfunktion 195
 Betablocker 99
 Beta-Glucose 116
 Betalactamring 157
 Betaoxidation 137
 Betateilchen 363
 Betazerfall 363
 Beugung 232, 257
 Beugungsgitter 257
 Bewegungsgleichung 196, 199
 Bierhefe 149
 Bierherstellung 150, 154
 Bildgröße 246
 Bildweite 246
 Bindung, glycosidische 116, 117, 121
 Binning, Gerd 350
 bioakkumulativer Effekt 172
 Biodiesel 164
 Bioethanol 146, 164
 Bioethanolherstellung 150, 154
 Biogas 148, 164
 Biogasanlagen 164
 Biokatalysatoren 131
 Biokunststoffe 175
 Biokybernetik 133
 biologische Membranen 112, 133
 Biomasse 149
 Biomasseproduktion 154
 Biopolymeren 175
 Bioprodukte 185
 Bioreaktoren 149
 Biphenyle, polychlorierte 171
 Bisphenol A 70
 Bitumen 15
 Black, James Whyte 100
 Blasensäulenfermenter 150
 Bleichmittel 88
 Blindwiderstand, induktiver 313
 –, kapazitiver 312
 Blutalkoholkonzentration 178
 Blutdoping 103
 Bohr, Niels 354
 bohrsches Atommodell 354
 – Postulat 356
 Bohr-Sommerfeld-Atommodell 359
 Boltzmann, Ludwig 294
 Boltzmann-Gleichung 294
 Boltzmannkonstante 272, 294
 Born, Max 345
 bornsche Wahrscheinlichkeitsdeutung 345
 Boyle, Robert 273

Boyle-Mariotte, Gesetz von 273
 Brauereitechnologie 150, 155
 Braunkohle 10
 Brechkraft 245
 Brechung 230
 Brechungsgesetz von Snellius 231, 239
 Brechzahl 231
 Brennpunktstrahl 246
 Brennstoffzelle 166
 Brenzcatechin 34
 Brewster, Sir David 260
 brewstersches Gesetz 260
 Broglie, Louis-Victor de 226
 Butanon 41
 Butansäure 46
 Buten 19
 Butenandt, Adolf 101
 Buttersäure 46

C

C3-Pflanzen 142
 C4-Pflanzen 142
 Cahn-Ingold-Prelog-Konvention 48
 Calcitonin 101
 Calcium-Antagonisten 100
 Calciumcarbid 17
 Calciumcitrat 157
 Calvinzyklus 142
 Cannabis 102
 Carbonsäureester 50
 Carbonsäuren 42
 Carbonylgruppe 38
 Carboxygruppen 42
 Carcinogene 99
 Carnot, Nicolas Léonard Sadi 279
 carnotscher Kreisprozess 289
 Carotinoide 113
 Carrier 134
 Celluloid 63
 Cellulose 61, 117, 119
 Celluloseacetat 63
 Cellulosenitrate 62, 80
 Cetanzahl 15
 CFK 78
 Chadwick, James 361
 Chemostat 152
 Chemotherapie 99
 chemotrophe Organismen 130
 Chiralität 48
 Chloroform 17, 26, 96
 Chlorophyll 93, 142
 Chloroplaste 142, 145
 Cholecalciferol 113
 Cholesterin 113
 Cholesterol 113
 Cholin 112
 Chromophor 91
 Chromoplasten 145
 Chromosomensatz, diploider 120
 –, haploider 120
 Cisstellung 111
 Citrat 139
 Citratfermentation 156
 Citratzyklus 138, 139
 Citronensäure 49
 Clausius, Rudolf 270
 Clausverfahren 12
 Clostridiaceae 146
 Clostridium acetobutylicum 146
 CoA 133
 Cocain 102
 Code, genetischer 120
 Coenzym A 133, 137
 Coenzyme 108, 132
 Cofaktor 108
 Coffein 59, 102

Compton, Arthur 342
 Comptoneffekt 342
 Condon, Edward 348
 COP 297, 298
 Copolymerisate 73
 Cortison 97
 Cracken, katalytisches 16
 Crick, Francis 122
 Curie, Marie 362
 –, Pierre 362
 Cyanobakterien 142, 144
 Cytochrome 141
 Cytosin 120
 Cytostatika 99
 CZ 15

D

Dalton, Gesetz von 275
 –, John 275
 Dämpfung, mittlere 219
 –, schwache 219
 –, starke 219
 Dämpfungskoeffizient 265
 DDT 27
 De Broglie, Louis-Victor Pierre Raymond Duc 343
 De-Broglie-Welle 343
 Decarboxylierung 130
 Dehydrogenierung 130
 Dehydrogenierungsreaktionen 140
 Dekohärenz 345
 Denaturieren 108
 Denaturierung 125
 Desoxyribonukleinsäure 120, 121
 Desoxyribose 120
 Destillation 149
 Dextrinbildung 155
 Dezibel 267
 Diabetes 100, 157
 Diazoniumsalz 91
 Dibenzolperoxid 65
 Diclofenac 97
 Diene 19
 Diesel, Rudolf 296
 Dieselmotor 296
 Dieseltreibstoff 14
 Diethylenglycol 36
 Diethylether 96
 Differenzialgleichung 196
 Diffusion 134
 Dihydroxyacetophosphat 136
 2,3-Dihydroxybutandisäure 49
 Dimethylformamid 56
 Dioctylphthalat 77, 81
 Dioptrie 245
 Dioxin 28
 diploider Chromosomensatz 120
 Diplokokken 145
 Dipolantenne 317
 Direktfarbstoffe 94
 Disaccharide 115
 Dispersion 242
 Dispersionsfarbstoffe 94
 Dissousgas 41
 Disulfidbrücke 107, 157
 Diureтика 100
 DMF 56
 D-Milchsäure, linksdrehende 156
 DNA 120, 121
 –, Replikation der 128
 DNA-Ligasen 128
 DNA-Polymerase 123, 125, 128
 DNA-Rekombinationstechnik 127
 Docosahexaensäure 111
 Domagk, Gerhard 98
 Doping 103
 Doppelbindung 111

Doppelbrechung 261
 –, elektrische 261
 Doppelhelix 121
 Doppelspalteperiment 344
 Doppler, Christian 335
 Dopplereffekt, relativistischer 335
 Dosimeter 192
 Downstreaming 149
 Drehpendel 208
 dritter Hauptsatz der Thermodynamik 294
 Drogen 102
 –, illegale 183
 –, legale 182
 Dunkelreaktion 142
 Duromere 67
 dynamische Masse 333
 dynamisches Grundgesetz 195

E

ebener Spiegel 243
 Eddington, Sir Arthur Stanley 336
 Effekt, allosterischer 133
 –, fotoelektrischer 340
 effektive Temperatur 374
 Eichbosonen 379
 Eigenfrequenzen 269
 Eigler, Don 350
 einfach ungesättigte Fettsäuren 111
 Einfachzucker 114
 Einheit, astronomische 372
 Einstein, Albert 321
 einsteinsche Gleichung 341
 – Lichtuhr 327
 – Postulate 324
 Einzelpalt 257
 Eiweiß 58
 Elastan 73
 elastische Energie 222
 Elastomere 67
 elektrische Doppelbrechung 261
 Elektrodynamik 299
 elektromagnetische Strahlung 189
 – Welle 226, 237, 317
 Elektronenmikroskop 344
 Elektronentransportkette 140
 Elektrophorese 125
 Elektroporation 128
 elektrostatische Wechselwirkung 107
 Elementarteilchenphysik,
 Standardmodell der 377, 378
 Elongationsphase 123, 125
 eluiert 158
 Emerskulturen 152
 Emulgator 112
 Enantiomere 47
 endoplasmatisches Reticulum 145
 Energie 317
 – des Magnetfeldes 307
 –, elastische 222
 –, innere 282
 –, kinetische 222
 Energiedosis 190
 Energiegewinnung 141
 Energieproduktion 136
 Energieträger, erneuerbare 160
 –, fossile 160
 Enol 103
 Enterobacteriaceae 145, 157, 158
 Enthalpie 282
 –, freie 138
 Entropie 293
 Entsorgung 174
 Entwicklungsfarbstoffe 94
 E-Nummer 187
 Enzyme 88, 106, 108, 120, 130, 131
 Epichlorhydrin 72

Epimerie 115
EPO 103
1,2-Epoxyethan 36
Epoxidharze 72
Erdgas 11, 160
Erdöl 11, 160
Erdöl- und Erdgasförderung,
 unkonventionelle 161
Ernährungsformen, vegetarische 185
Ernährungspyramide 186
erneuerbare Energieträger 160
erster Hauptsatz der Thermodynamik 281
Eruca-säure 111
erzwungene Schwingungen 220
Escherichia choli 158
essenzielle Aminosäuren 186
 – Fette 110
 – Fettsäuren 187
 – Nährstoffe 184
Essigsäure 45, 156
 –, aktivierte 110
Esterbindungen 110, 111
Estradiol 101
Ethan-1,2-diol 33
Ethanal 39
Ethandisäure 47
Ethanol 18, 33, 139
Ethanolproduktion 154
Ethansäure 45
Ethen 18
Ether 34
Ethin 17
Ethoxyethan 35
Ethylacetat 52
Ethylenoxid 36
Ethylethanoat 52
Eukaryoten 144
Europäische Registrierungsnummer 187
Exploration 11
exponentielles Wachstum 151
Extrudieren 79

F

FAD 133, 138
Fadenpendel 206
Fällung 149
Faltblattstruktur 107, 108
Faraday, Michael 299
Färbermethoden 93
Farbstoffe 89
Faserproteine 108
Fast Food 185
FCKW 28
Federpendel 204
fehlingsche Lösung 39
 – Probe 116
Fermentation 149
Fermenter 129, 149
fermentierte Milchprodukte 156
Fermi, Enrico 367
Fernrohr 252
Fettalkoholsulfate 87
Fette 53, 110, 135
 –, essenzielle 110
Fetthärtung 112
fettlösliche Vitamine 110
 – Vitamine A 113
Fettsäuren 42, 110, 136, 137
 –, einfach ungesättigte 111
 –, essenzielle 187
 –, gesättigte 111
 –, kurzkettige 111
 –, langkettige 111
 –, mehrfach ungesättigte 111
 –, transisomere 112
Feuerlöschmittel 170

Feynmann, Richard Phillips 191, 344
fibrilläre Proteine 108
Filtration 149
Fischer, Emil 47
Fischerprojektion 48
Fizeau, Armand Hippolyte Louis 322
Flächenwelle 226
Flagellen 145
Flammschutzmittel 77
Flash-Speicher 349
Flavin-adenin-dinukleotid 133, 138
Flavin-Mononukleotid 141
Fleckputzmittel 27
Fleming, Alexander 98, 143
Fließgewicht 131
Fluorchlorkohlenwasserstoffe 28
Flurane 27
FMN 141
Folienblasen 80
Form, furanoide 116
 –, pyranoide 116
Formaldehyd 39
fossile Energieträger 160
Fotoapparat 253
fotoelektrischer Effekt 340
Fotorespiration 142
Fotosynthese 142
fototrophe Organismen 130
Foucault, Jean Bernard Léon 323
freie Enthalpie 138
Fresnell, Augustin Jean 245
Frisch, Otto 365
Frostschutzmittel 36
Fruchtester 51
Fructose 115, 118
Fructose-1,6-diphosphat 136, 142
Füllmittel 77
Fumarat 140
fundamentale Kräfte 379
Fungizide 99
Furan 59
furanoide Form 116
Furanosen 116
Fusarium 147
Futterhefe 149

G

Galactomannan 118
Galactose 115
Galacturonsäure 118
Gallensäuren 113
Gammateilchen 363
Gamow, George Anthony 348
Gangdifferenz 234
Gärung 133
 –, alkoholische 150
Gas, ideales 270
 –, reales 270
Gasdruck 271
Gaskonstante, spezifische 272
 –, universelle 272
Gay-Lussac, Joseph Louis 274
gedämpfte Schwingungen 218
Gegenstandsgröße 246
Gegenstandsweite 246
Gehör, menschliches 266
Geißeln 145
Geliermittel 118
Gene 120
Generationszeit 151
genetischer Code 120
Genfahre 128
Genom 120
Gentechnik 127
geometrische Optik 235
geostationärer Satellit 370

Gerbstoffe 34
Gesamtenergie, relativistische 334
gesättigte Fettsäuren 111
Geschwindigkeitsfunktion 194
Gesetz, brewstersches 260
 – der Gleichförmigkeit 275
 –, poissonisches 286
 – von Amontons 274
 – – Avogadro 272
 – – Boyle-Mariotte 273
 – – Dalton 275
 – – Gay-Lussac 274
Gestagene 101
Gewebekulturen 129
GFK 78
Gießen 80
Glasfaser 78
Gleichförmigkeit, Gesetz der 275
Gleichgewicht, thermodynamisches 279
Gleichung, einsteinsche 341
 –, thomsonsche 315
globuläre Proteine 108
Glockenbodenkolonne 12
Glucagon 101
Glucosamine 157
Glucose 115, 154
Glucose-6-phosphat 136
Glucose-6-Phosphorylase 136
Glutamat 138
Gluten 106
Glycerin 110, 136, 137
Glycerinaldehyd-3-phosphat 136
Glycerol 33, 110
Glyceroltrinitrat 100
Glycogen 118
Glycol 18, 33, 69
Glycolyse 136
Glycoproteine 114
Glycose 136
glycosidische Bindung 116, 117, 121
GMOs 120
Golgiapparat 145
Goodyear, Charles 20
Gramfärbung 146
gramnegativ 146
grampositiv 146
Gravitation 369
Gravitationsfeld 370
Gravitationsgesetz 370
Grenzwellenlänge 341
grovesches Element 166
Grundgesetz, dynamisches 195
Grundnahrungsmittel 186
Gruppe, prosthetische 108
GTP 140
Guanin 120
Guanosintriphosphat 140
Guarkernmehl 118
Gummi 19, 20
Gurney, Ronald W. 348

H

Hafele, Joseph 328
Hahn, Otto 365
Halbwertsdicke 190
Halbwertszeit 364
Hallwachs, Wilhelm 340
halogenhaltige Kunststoffe 170
Halogenkohlenwasserstoffe 26, 168
Halone 28
Häm 93
Hämoglobin 106, 107
haploider Chromosomensatz 120
harmonische Schwingung 202
Harnstoff 57, 72, 138
Harnstoffzyklus 138

Stichwortverzeichnis

- Haroche, Serge 379
Hauptnährstoffe 135
HDPE 67
Hefen 139, 146, 154
–, obergärtige 155
–, untergärtige 155
Heisenberg, Werner 347
heisenbergsche Unschärferelation 347
Heizöl extraleicht 14
Helicase 123
Helixstruktur 107
Helligkeit, absolute 373
–, scheinbare 373
Hemicellulosen 155
Henry, Joseph 304
Heroin 97
Hertz, Heinrich 340
Hertzsprung, Ejnor 375
Hertzsprung-Russell-Diagramm 375
Herzinfarkt 100
Herzmittel 99
Hess, Viktor Franz 191
Heterocyclen 59
heterofermentative Milchsäurebakterien 155
Hexa-2,4-diensäure 46
Hexan-1,2,3,4,5,6-hexol 33
Hexokinase 136
Hexosen 114
Higgs 377
Hippokrates 96
Hochspannungsleistung 320
Hohlkörperblasen 79
Hohlspiegel 243
homofermentative Milchsäurebakterien 155
Hormone 100
Hornhaut 254
Hörschwelle 267
Hubble, Edwin Powell 372, 376
Hubblegesetz 376
Huygens, Christiaan 228
–, Prinzip von 229
Hydrathülle 107
Hydrochinon 34
Hydrogencarbonat 138
Hydrolasen 132
hydrophobe Wechselwirkungen 107
Hydroxygruppe 29
2-Hydroxypropansäure 47
Hypothalamus 100
- I**
- Ibuprofen 97
ideale Spule 312, 318
ideal Kondensator 311, 318
ideales Gas 270
–, Zustandsänderungen eines 277
–, Zustandsgleichung des 272
illegal Drogen 183
Immunglobuline 144
Immunisierung, aktive 144
–, passive 144
Immunsystem 144
Impedanz 314
Impfungen 144
Impuls, relativistischer 335
Indanthrenblau 92
Indigo 89, 93
Indigofarbstoffe 93
Induktionsgesetz 299, 301
Induktionsspannung 299
induktiver Blindwiderstand 313
Induktivität 304
Inhibitor 133
Initiationsphase 123
innere Energie 282
Inoculum 151
- Instrumente, optische 248
Insulin 100, 135, 157
–, rekombinantes 158
Interferenz 255
Inulin 118
Ionendosis 190
Ionenkonzentration 152
ionisierende Strahlung 189
IR 237
isentrope Zustandsänderung 286
Isentropenexponenten 286
Isobare 277
isobare Zustandsänderung 284
Isochore 277
isochore Zustandsänderung 284
Isocitrat 139, 156
Isomerasen 132
Isotherme 277
isotherme Zustandsänderung 285
Isotropie 236
- J**
- Jodprobe 155
Johannibrotkernmehl 118
Jönnsen, Claus 344
- K**
- Kalandrieren 79
Kältemaschine 298
Kältemittel 168
Kamera 253
Kanalproteine 134
kapazitativer Blindwiderstand 312
Katabolismus 130
katalytisches Cracken 16
kationische Tenside 84
Katzenparadoxon 345
Kautschuk 20
Keating, Richard 328
Keenan, Philip C. 375
Kekulé, August 21
Keratin 108
Kerndichte 362
Kernfusion 365
Kernmasse 361
Kernphysik 354, 361
Kernradius 361
Kernspaltung 365
Kernspaltungsbome 367
Kernspintomograf 308
Kerosin 14
Ketone 40
Ketosen 115
Kettenkonformation 107
Kevlar 71
kinetische Energie 222
Kirchhoff, Gustav 228
Kjedahl 109
Kleben 80
Klone 128
Klonieren 128
Klopffestigkeit 13
Knallgasreaktion 166
Koch, Robert 143
Kofaktoren 132
Kohärenz 255
Kohle 10, 162
Kohlenhydrate 1114
Kohlenstoffdioxidfixierung 142
Kohlenstofffaser 78
Kohlenwasserstoffe 16
Kohleverflüssigung 163
Kohlevergasung 163
Kokken 145
- Kollagen 108
Kondensator, idealer 311, 318
kondensierte Ringsysteme 24
Kongorot 92
Konkavlinsen 245
Konservierungsmittel 46
Kontaminanten 188
Kontarniation 149, 150, 188
kontinuierliches Verfahren 152
Konveklinsen 245
Kopplung von Pendeln 223
Kräfte, fundamentale 379
Krebs, Hans Adolf 139
Kreisprozess 288
Kreisprozess, carnotscher 289
kritische Masse 366
Kugelwelle 229
Kunstseite 63
Kunststoffanalytik 82
Kunststoffe 64, 173
–, elektrisch leitende 74
–, halogenhaltige 170
–, technische 174
Kunststoffverarbeitung 77
Küpenfarbstoffe 94
Küpenfärbung 94
Kupplungsreaktion 91
kurzkettige Fettsäuren 111
kurzsichtig 254
- L**
- Lachgas 96
Lactalbumin 108
Lactat 139
Lactobacillus 156
Lactobacteriaceae 146, 155
Lag-Phase 151
Längenkontraktion 329
Längenverkürzung 338
langkettige Fettsäuren 111
Läutern 155
Lcd 262
LDL 113
LDPE 67
Lebensmittel 184
–, prebiotische 115
–, probiotische 115
Lebensmittelhygiene 188
Lebensmittelzusatzstoffe 187
Lecithin 112
legale Drogen 182
Leichtwasserreaktor 367
Leistung 317
–, mittlere 311
Leistungszahl 297, 298
Lenz, Emil 301
lenzsche Regel 301
Leptonen 378
Leuchtkraft 374
Leuconostoc 156
Lichtgeschwindigkeit 321
Lichtjahr 372
Lichtleiter 240
Lichtquantenhypothese 341
Lichtuhr, einsteinsche 327
Ligasen 132
Lignin 119
Lindan 28
lineare Alkylenzersulfonate 85
– Polarisation 258
– Welle 226
Liniendiagramm 309
linksdrehende D-Milchsäure 156
Linolensäure 111
Linoleum 53
Linolsäure 111

Linsen 245
 Lipide 110
 Lipoide 110, 112, 134
 Liposome 128
 Lissajousfiguren 214
 Lister, Joseph 34
 L-Milchsäure, rechtsdrehende 156
 logarithmisches Wachstum 151
 Log-Phase 151
 Longitudinalwelle 226, 263
 Lorentz, Hendrik Antoon 332
 Lorentztransformation 331
 Loschmidt, Joseph 21
 Lösung, fehlingsche 39
 Lösungsmittel 27
 Lotuseffekt 192
 Low-Density-Lipoproteine 113
 LSD 103
 Luftsäule 235, 269
 Lupe 249
 Lyasen 132
 Lycopin 90
 Lymphe 135
 Lyocellverfahren 62
 Lysergsäurediethylamid 103

M

Magnetfeld, Energie des 307
 Maillardreaktion 116
 Maischprozess 154, 155
 Makromoleküle 60
 Makronährstoffe 184
 Malat 140
 Maltose 117
 Malz 155
 Mariotte, Edme 273
 Marzipan 40
 Masse, dynamische 333
 –, kritische 366
 Masseneinheit, atomare 271
 Massenkunststoffe 173
 Massenzahl 361
 Materiewelle 226
 Maxwell, James Clerk 278
 Maxwell-Boltzmann-Verteilung 278
 MDMA 103
 mechanische Welle 226
 +M-Effekt 56, 91
 –M-Effekt 91
 mehrfach ungesättigte Fettsäuren 111
 Mehrfachzucker 115
 mehrkernige Aromaten 24
 Meitner, Lise 365
 Melamin 72
 Melasse 154
 Membranen 133
 –, biologische 112, 133
 Membranproteine 106
 menschliches Gehör 266
 Mess- und Regeleinrichtungen 150
 Messenger-RNA 123, 124
 Metabolismus 130
 Methan 17
 Methanal 39
 Methaneis 161
 Methanhydrat 161
 Methanol 32
 Methansäure 44
 Methylendioxymethylamphetamine 103
 Methylethylketon 41
 Methylorange 91
 Mikroalgen 144
 Mikrobiologie 144
 Mikroinjektion 128
 Mikroorganismen 144
 –, Wachstumskurve von 151

Mikroskop 250
 Milchprodukte, fermentierte 156
 Milchsäure 47
 Milchsäurebakterien 149, 155
 –, heterofermentative 155
 –, homofermentative 155
 Milchsäuregärung 139, 155
 Mineralstoffe 187
 Mitochondrien 145
 Mitose 122
 mittlere Dämpfung 219
 – Leistung 311
 Mizellen 84
 moderne Physik 321
 molekular disperses System 107
 molekularbiologische Analytik 125
 Monomere 60
 Monosaccharide 114
 Morgan, William Wilson 375
 Morphin 97
 mRNA 123, 124
 MTBE 36
 Mulder, Gerardus Johannes 106
 Myonenzerrfall 330
 Myzel 147

N

nachwachsende Rohstoffe 148
 NAD 133
 Nährhefe 149
 Nährstoffe, essenzielle 184
 Nahrungsergänzungsmittel 95
 Nährwertkennzeichnung 186
 Nanomaterialien 192
 Nanotechnologie 189, 191
 Naphtalen 24
 Naphtalin 24
 Narkosermittel 27
 Nassspinnen 81
 Natta, Giulio 67
 Nernst, Werner 294
 Netzhaut 254
 Neurotransmitter 179
 Neutralfette 110
 Newton, Isaac 194, 321
 Nicot, Jean 180
 Nicotin 59, 102, 180
 Nicotinamid-adenin-dinukleotid 133
 Nicotinamid-Dinukleotid-Phosphat 142
 Nicotineffekte 181
 Nitroglycerin 32
 Nitroverbindungen 55
 Noradrenalin 99
 Nucleoid 128
 Nukleinsäure 114
 Nukleoside 120, 121
 Nukleotide 120, 121
 Nullpunkt der Temperatur, absoluter 280
 nullter Hauptsatz der Thermodynamik 279
 Nylon 70

O

obergärtige Hefen 155
 Octanzahl 13
 ohmscher Widerstand 311, 318
 Öle 53, 112
 Oligosaccharide 115
 Ölsäure 111
 Omega-3-Fettsäuren 111
 Operator 351
 Opiate 97, 102
 Optik, geometrische 235
 optische Aktivität 48, 262
 – Aufheller 88
 – Instrumente 248

Orbitale 360
 Organellen 133, 144
 Organismen, chemotrophe 130
 –, fototrophe 130
 Östrogene 101
 Otto, Nicolaus 296
 Ottomotoren 13, 296
 Ovalbumin 108
 Ovulationshemmung 101
 Oxalacetat 138, 139
 Oxalsäure 47
 Oxalsuccinat 139
 oxidative Phosphorylierung 141
 Oxidoreduktasen 132
 2-Oxoglutarat 138, 139
 Oxoniumionen 141
 OZ 13

P

Palmitinsäure 111
 Palmitoleinsäure 111
 Pankreas 135
 Pansenbakterien 112, 117
 Papier 61
 Parasympathikus 97
 passive Immunisierung 144
 passiver Transport 134
 Passivauchen 182
 Pasteur, Louis 143
 Pasteureffekt 133
 Pauli, Wolfgang 360
 Pauliprinzip 360
 PCR 125
 Pektin 118
 Pendel, Kopplung von 223
 –, physisches 209
 –, pohlsches 220
 Penicillin 59, 157
 Penicillium 147, 157
 Pentosane 119
 Pentosen 114
 Peptid 109, 157
 Peptidbindungen 58, 106, 107
 Peptidkette 124
 periodische Welle 227
 Perlon 65
 Permeabilität, relative 304
 Pestizide 27
 PET-Flaschen 175
 Petrochemie 16, 25
 Petroleum 14
 Pharmazeutika 96
 Phase, stationäre 152
 Phasendifferenz 234
 Phenanthren 24
 Phenole 34
 Phenolphthalein 92
 Phenoplaste (PF) 71
 Phenyl 24
 Phonskala 267
 Phosgen 70
 Phosphoenolpyruvat 137, 142
 Phospholipide 112, 134
 Phosphorsäure 120
 Phosphorylierung, oxidative 141
 Photonen 142
 Phthalocyanine 93
 Phyllochinon 113
 Physik, moderne 321
 physisches Pendel 209
 Pigmente 90
 Pili 145
 Pilze 144
 Planck, Max 339
 Plasmide 128
 Platforming 14

Plexiglas 69
 Podolsky, Boris 352
 pohlsches Pendel 220
 poissonsches Gesetz 286
 Polarimeter 48
 Polarisation 258
 –, lineare 258
 Polystyren (PS) 68
 Polyacrylnitril (PAN) 68
 Polyaddition 65
 Polyamide (PA) 70
 Polyanilin 75
 Polycarbonat (PC) 70
 polychlorierte Biphenyle 171
 Polycyanacrylat 69
 Polyester 53, 69, 70
 –, ungesättigte (UP) 74
 Polyethin 75
 Polyethylen (PE) 67
 Polyethylenterephthalat (PET, PETP) 69
 Polykondensation 65
 Polymerase-Kettenreaktion 125
 Polymerisation 65
 Polymerisationsgrad 64
 Polymethylmethacrylat (PMMA) 69
 Polypropylen (PP) 68
 Polysaccharide 115, 135
 Polytetrafluorethen (PTFE) 69, 171
 Polyurethan (PU) 66, 72
 Polyvinylacetat 80
 Polyvinylchlorid (PVC) 68, 170
 Porphyrine 93
 Postulat, bohrsches 356
 Postulate, einsteinsche 324
 prebiotische Lebensmittel 115
 Primärdestillation 12
 Primärspule 320
 Primärstruktur 107
 Primase 123
 Primer 125
 Prinzip von Huygens 229
 Probe, fehlingsche 116
 probiotische Lebensmittel 115
 Progesteron 101
 Projektor 253
 Prokaryoten 144
 Propan-1,2,3-triol 33
 Propanon 40
 Propansäure 46
 Propen 18
 Propionsäure 46
 prosthetische Gruppe 108
 Proteasen 155
 Proteinbiosynthese 120, 122, 123, 157
 Proteine 58, 106, 107, 109, 135
 –, fibrilläre 108
 –, globuläre 108
 –, zusammengesetzte 108
 Proteinmolekül, Raumstruktur eines 107
 proteinogene Aminosäuren 106
 Protonenpumpe 141
 Protozoen 144
 Provitamin A 113
 Prozesse, reversible 291
 Prozessparameter 151
 Psychopharmaka 97
 PTFE 171
 Purin 59, 120
 PVC 170
 pyranoide Form 116
 Pyranosen 116
 Pyridin 59
 Pyrimidin 59, 120
 Pyrolysebenzin 17
 Pyrrol 59
 Pyrrolfarbstoffe 93
 Pyruvat 137, 139

Q

Qualitätsfaktor 190
 Quantencomputer 353
 Quantenkryptografie 353
 Quantenphysik 339
 Quantenzahlen 356, 359
 Quarks 378
 Quartärstruktur 107
 quasistatisch 285
 Quorn 147

R

Racemat 47
 radioaktive Strahlung 189
 Radioaktivität 362
 radiologische Aktivität 364
 Raffinerie 12
 random coil 107, 108
 Rastertunnelmikroskop 349
 Raumstruktur eines Proteinmoleküls 107
 Raumwelle 226
 RC-Schaltung 314
 Reaktion, anapleurotische 139
 Reaktionsgeschwindigkeit 131
 Reaktionspezifität 132
 Reaktivfarbstoffe 94
 reale Spule 318
 reales Gas 270
 Rechtecksfunktion 213
 rechtsdrehende L-Milchsäure 156
 Recycling 174
 reduzierende Wirkung 116
 Reflektoren 252
 Reflexionsgesetz 230, 239
 Reflexionsgrad 236
 Reformieren 14
 Refraktoren 252
 Regel, lenzsche 301
 Regenbogen 242
 Registrierungsnummer, Europäische 187
 rekombinantes Insulin 158
 Rekombinationsenzyme 128, 158
 Rektifikation 149
 relative Permeabilität 304
 relativistische Gesamtenergie 334
 relativistischer Dopplereffekt 335
 – Impuls 335
 Relativitätsprinzip 325
 Relativitätstheorie 321
 –, allgemeine 336
 Replikation 122
 – der DNA 128
 Reproduktionsmedizin 129
 Resonanzdiagramm 220
 Resonanzfrequenz 315, 316
 Resonanzkatastrophe 220
 Resorcin 34
 Restriktionsenzyme 128
 Reticulum, endoplasmatisches 145
 Retinol 113
 reversible Prozesse 291
 Ribonukleinsäure 123
 Ribose 123
 ribosomale RNA 123
 Ribosomen 124, 145
 Ribulose-1,5,-diphosphat 142
 Richtgröße 203
 Ringsysteme, kondensierte 24
 RLC-Schaltung 315, 316
 RL-Schaltung 314
 RNA, ribosomale 123
 RNA-Polymerase 124
 Rohkost 185
 Rohöl 11
 Rohrer, Heinrich 350

Rohstoffe, fossile 10
 –, nachwachsende 148

Rojen, Twillabord Snel van 231
 Römer, Olav 324
 Röntgen, Conrad Wilhelm 332, 362
 Rosen, Nathan 352
 Rotary-Tiefbohrverfahren 11
 Rotverschiebung 337
 rRNA 123
 Ruheenergie 333
 Ruhemasse 333
 Rührkesselfermenter 150
 Ruß 17
 Russell, Henry Moris 375
 Rutherford, Ernest 348, 355
 Rydberg, Johannes Robert 357, 358
 Rydbergkonstante 357

S

Saccharide 114
 Saccharomyces carlsbergensis 147
 – cerevisiae 147
 Saccharose 117, 118
 Sägezahnfunktion 213
 Saite, schwingende 269
 Sammellinsen 245
 SAN 73
 Sasili 87
 Satellit, geostationärer 370
 Sauerkraut 156
 Sauerstoffzufluhr 150
 Sauerteig 156
 Sauerteiggärung 149
 Schalldruck 264
 Schallfeld 263
 Schallgeschwindigkeit 263
 Schallintensität 264
 Schallintensitätspegel 267
 Schallkennimpedanz 265
 Schaumblase 84
 Schäummittel 170
 scheinbare Helligkeit 373
 Scheinleistung 319
 Scheinwiderstand 314
 Schießbaumwolle 63
 Schmelzpunkt 111
 Schmelzspinnen 81
 Schmieröle 15
 Schneckenkorn 40
 Schrödinger, Erwin 350
 Schrödingergleichung 350
 Schutzdiode 307
 schwache Dämpfung 219
 schwingende Saite 269
 Schwingungen 201
 –, erzwungene 220
 –, gedämpfte 218
 –, harmonische 202
 Segré, Emilio 368
 Schwinkel 248
 Seifen 84
 Sekundärspule 320
 Sekundärstruktur 107
 Selbstinduktion 303
 Separation 149
 Sequenz 58
 SE-Reaktion 22
 Seveso 28
 Sexualhormone 113
 Silicone 75
 Skleroproteine 108
 Slow Food 185
 Snellius 231
 –, Brechungsgesetz von 231, 239
 Sobrero, Asciano 32
 Soddy, Frederick 363

- Sommerfeld, Arnold 359
 Sorbinsäure 46
 Sorbit 33
 Spaltung, thioklastische 138
 Spannungsdoppelbrechung 261
 Speicherkohlenhydrate 118
 Speicherproteine 106
 Spektralfarben 242
 Spektralklassen 375
 Spektrallinien 357
 Spektrum 237
 Spezialkunststoffe 174
 spezifische Gaskonstante 272
 Sphäroproteine 108
 Spiegel 243
 –, ebener 243
 Spinnverfahren 81
 Spitzenleistung 311
 Sporangien 147
 Sporen 147
 Sporenbildung 146
 Sporenträger 147
 Spritzgießen 79
 Spule 303
 –, ideale 312, 318
 –, reale 318
 Spurenelemente 187
 Stabilisatoren 77
 Standardmodell der Elementarteilchenphysik 377, 378
 Staphylococci 157
 Staphylokokken 145
 Stärke 117, 118
 starke Dämpfung 219
 Starterkultur 151
 stationäre Phase 152
 Staudinger, Hermann 61
 steady state 131
 Steamcracken 16
 Stearinsäure 111
 –, Aktivierung der 138
 stehende Wellen 268
 Steinkohle 10
 Steran 113
 Sterilisation 149
 Stern 372
 –, Zustandsgrößen von 373
 Steroide 112, 113
 Steroidhormone 101
 Stickstoffgehalte 109
 Stimulanzen 103
 Stoßwelle 227
 Strahlenbelastung 191
 Strahlendosimetrie 190
 Strahlentherapie 99
 Strahlung, elektromagnetische 189
 –, ionisierende 189
 –, radioaktive 189
 Straßmann, Fritz 365
 Streptokokken 145
 Streptomyces 157
 Streptomyeten 146, 157
 Streptomycine 157
 Streuung 258
 String 380
 Strukturkohlenhydrate 118
 Strukturproteine 106
 Styren 18
 Styropor 68
 Submerskulturen 152, 157
 Substrat 149
 Substratphosphorylierung 137
 Substratspezifität 132
 Succinat 140
 Succinyl-CoA 140
 Suchtmerkmale 177
 Suchtverhalten 178
 Sudhausarbeit 155
 Sulfatverfahren 61
 Sulfitverfahren 61
 Sulfonamide 98
 Supernova 372
 Supersymmetrie 380
 Sympathikus 97
 Sympathomimetika 98
 System, molekular disperses 107
- T**
- Tabakrauch 182
 Tabakrauchen 181
 TCC 139
 technische Kunststoffe 174
 Teer 182
 Teflon 69
 Temperatur 279
 –, absoluter Nullpunkt der 280
 –, effektive 374
 Tenside 84
 –, amphoter 84
 –, anionische 84
 –, kationische 84
 Terminationsphase 123
 Terpene 112, 113
 Tertiärstruktur 107
 Testosteron 101
 Tetrachlorethen 27
 Tetrahydrocannabinol (THC) 102
 Tetrosen 114
 Thermocycler 125
 Thermodynamik, dritter Hauptsatz der 294
 –, erster Hauptsatz der 281
 –, nullter Hauptsatz der 279
 –, zweiter Hauptsatz der 292
 thermodynamisches Gleichgewicht 279
 thermophil 156
 Thermoplaste 66
 Thioesterbindung 138
 thioklastische Spaltung 138
 Thiophen 59
 Thomson, Sir Josef John 354
 –, William 280
 thomsonsche Gleichung 315
 Thymin 120
 Thyroxin 101
 TNT 55
 Tocopherol 113
 TOE 380
 Torf 162
 Totalreflexion 232, 240
 Trägerproteine 134
 Transfektion 128
 Transferasen 132
 Transfer-RNA 123
 Transfettsäuren 112
 Transformator 319
 transgen 158
 transisomere Fettsäuren 112
 Transkription 124
 Translation 124
 Transmissionsgrad 237
 Transport, aktiver 134
 –, passiver 134
 Transportproteine 106
 Transversalwellen 226, 263
 Treibgase 170
 Treibstoffzurückführung 110
 Trennmittel 77
 Trenntrafo 319
 Triacylglycerole 110
 Tricarbonsäurezyklus 139
 Trichlorethen 27
 Trichlormethan 26
 Triglyceride 110
- U**
- Triosen 114
 Triosephosphat-Isomerase 136
 Tripelhelix 108
 Triphenylmethanfarbstoffe 92
 tRNA 123
 Trockenspinnen 81
 Trockenspiritus 40
 Tunneldiode 349
 Tunneleffekt 348
 Tunnelproteine 134
 Turbidimetrie 152
 Turbidostat 152
 Tyndalleffekt 84
- V**
- Überlagerungszustand 345
 Ultrafiltration 149
 Ultraschall 149, 158
 Umkristallisation 149
 Umlenkprismen 240
 Umspannwerk 320
 ungedämpfte harmonische Welle 225
 ungesättigte Polyester (UP) 74
 universelle Gaskonstante 272
 Universum 372
 unkonventionelle Erdöl- und Erdgasförderung 161
 Unschräferelation, heisenbergsche 347
 untergärtige Hefen 155
 Upstreaming 149
 Uracil 123
 UV 237
- W**
- Vakuole 145
 Vakuumdestillation 12
 Vakuumlichtgeschwindigkeit 238, 322
 Vanillin 36
 vegetarische Ernährungsformen 185
 Vektoren 128, 158
 Verdauung 135
 Verdickungsmittel 118
 Verfahren, kontinuierliches 152
 Vergrößerung 249
 Verlustleistung 308
 Verschränkung 352
 Verseifung 51
 Vielfachzucker 115
 Vinylchlorid 18, 68
 Viren 128, 144
 Virostatika 144
 VIS 237
 Viskoseverfahren 62
 Vitamin B12 93
 – D 113
 Vitamine 102, 187
 – A, fettlösliche 113
 –, fettlösliche 110
 Vollwaschmittel 87
 Vollwertkost 185
 Volumensänderungsarbeit 281
 Vulkanisation 20
- Wasserstoffbrückenbindungen 107**

Stichwortverzeichnis

- Watson, James 122
Wechselspannung 309
Wechselstromwiderstände 310
Wechselwirkung, elektrostatische 107
–, hydrophobe 107
Weichmacher 77, 171
Weinherstellung 150
Weinsäure 49
Weinskandal 36
weitsichtig 254
Welle 224
–, elektromagnetische 226, 237, 317
–, lineare 226
–, mechanische 226
–, periodische 227
–, stehende 268
–, ungedämpfte harmonische 225
Wellenausbreitungsgeschwindigkeit 227
Wellenfront 227
Wellenoptik 235
Widerstand, ohmscher 311, 318
Wigner, Eugene 355
Windungsanzahl 320
Wineland, David 379
- Winkelbeschleunigungsfunktion 199
Winkelgeschwindigkeitsfunktion 198
Wirbelströme 302
Wirkleistung 318
Wirkung, reduzierende 116
Wirkungsgrad 291
Wirkungsspezifität 132
Wölbspiegel 243
Würzgrade 155
Würzekochen 155
- Y**
- Young, Thomas 344
- Z**
- Zeeman, Pieter 332
Zeigerdiagramm 310
Zeilinger, Anton 353
Zeitdehnung 338
Zeitdilatation 327
Zellen, Aufschluss der 149
Zellmembranen 112, 144
- Zellteilung 122
Zellzahl 152
Zerfallsgegesetz 364
Zerfallsreihe 364
Zerstreuungslinsen 245
Ziegler, Karl 67
Zivilisationskrankheiten 110
Z-Konfiguration 111
Zuckerkrankheit 100
Zufallsknäuel 107
zusammengesetzte Proteine 108
Zustandsänderung, adiabatische 286
– eines idealen Gases 277
–, isentrope 286
–, isobare 284
–, isochore 284
–, isotherme 285
Zustandsgleichung des idealen Gases 272
Zustandsgrößen 277
– von Sternen 373
Zweifachzucker 115
zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 292
Zyklon-Sedimentationsverfahren 155
Zytoplasma 144