

**Zum Titelbild.**

Das Titelbild zeigt einen Ring aus 48 Eisenatomen auf einer einkristallinen Kupferoberfläche. Der Ring wurde durch Verschieben jedes einzelnen Fe-Atoms mit Hilfe einer feinen Spitze hergestellt. Die Abbildung erfolgte mit einem Rastertunnel-Mikroskop; die Höhenunterschiede und die seitlichen Abstände sind nicht maßstabsgetreu. Die konzentrischen Wellen sind stehende Elektronenwellen. Die Grundlagen der Kraftmikroskopie werden im Abschnitt 6.5 über die Materie im Kleinen beschrieben.

**(Foto: Mit freundlicher Genehmigung von Dr. D.M. Eigler, IBM Research Division, San José, Kalifornien)**



---

# Physik I

---

Mechanik und Wärme

---

von  
Klaus Dransfeld  
Paul Kienle und  
Georg Michael Kalvius

---

10., überarbeitete und erweiterte Auflage

---

Mit fast 300 Bildern und Tabellen

---

Oldenbourg Verlag München Wien

---

---

## Zu den Autoren:

**Prof. Dr. Klaus Dransfeld:** Studium der Physik an der Universität Köln, Promotion (1952) bei Clemens Schaefer, anschließend Clarendon Laboratory Oxford (UK), ab 1957 Mitglied der Bell Telephone Laboratories (USA), 1960 Berufung als Assoc. Prof. of Physics (mit tenure) an die University of California in Berkeley (USA), 1965–73 Lehrstuhlinhaber am neugegründeten Physik-Department der TU München, 1973–81 Direktor am Max-Planck-Institut für Festkörperphysik, seit 1981 Lehrstuhl für Physik an der Universität Konstanz bis zur Emeritierung. Hauptarbeitsgebiete Ultraschall, tiefe Temperaturen, Nanotechnologie. 1989 Gentner-Kastler-Preis der deutschen und französischen Physikalischen Gesellschaften sowie Forschungspreis der Japan Society for the Promotion of Science. Ehrendoktor der Universitäten Grenoble und Augsburg; Hon. Prof. der Universität Nanjing.

**Prof. Dr. Paul Kienle:** Studium der technischen Physik an der TH München, Promotion (1957) und Habilitation (1962) bei Heinz Maier-Leibnitz. Inhaber des Lehrstuhls für Strahlen und Kernphysik an der TH Darmstadt (1963–65), anschließend Professor für Experimentalphysik an der TU München bis zur Emeritierung. Aufbau des Beschleunigerlaboratoriums der LMU und TU München mit Ulrich Meyer Berkhout (1965–71). Als Direktor der GSI Darmstadt Ausbau der Beschleuniger mit einem Synchrotron und Speicherring für schwere Ionen (1984–92). Direktor des Stefan-Meyer-Instituts für subatomare Physik der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, (2002–04). Humboldt Preis der Republik Frankreich und Forschungspreis der Japan Society for the Promotion of Science. Wissenschaftliche Veröffentlichungen auf dem Gebiet der Kern- und Teilchen-Physik, Lehrbücher der Physik und andere wissenschaftliche Bücher.

**Prof. Dr. Georg Michael Kalvius:** Studium der Physik in Göttingen und München. 1958 Diplom, 1961 Promotion an der TU München unter Prof. Heinz Maier-Leibnitz. Anschließend am Argonne National Laboratory, Chicago, USA. Seit 1970 Lehrstuhlinhaber am Physik Department der Technischen Universität München bis zur Emeritierung. Gastprofessuren an der Stanford University, Technical University Helsinki, Hebrew University Jerusalem, University of Western Australia, CEA Grenoble, University of Tokyo. Hauptsächlich Grundlagenforschung zum Magnetismus mit Methoden der nuklearen Festkörperphysik, z.B. des Mößbauer-Effekts und der Myonen-Spin-Rotation. Verleihung des Humboldt-Preises (1986) für die Förderung der deutsch-französischen wissenschaftlichen Zusammenarbeit.

## Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2005 Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH  
Rosenheimer Straße 145, D-81671 München  
Telefon: (089) 45051-0  
[www.oldenbourg.de](http://www.oldenbourg.de)

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen.

Lektorat: Kathrin Mönch  
Herstellung: Anna Grosser  
Umschlagkonzeption: Kraxenberger Kommunikationshaus, München  
Gedruckt auf säure- und chlorfreiem Papier  
Druck: Grafik + Druck, München  
Bindung: R. Oldenbourg Graphische Betriebe Binderei GmbH

ISBN 3-486-57810-3  
ISBN 978-3-486-57810-2

# Inhalt

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
|          | <b>Tabellenverzeichnis</b> . . . . .                     | X         |
|          | <b>Vorwort</b> . . . . .                                 | XI        |
| <b>A</b> | <b>Newtonsche Mechanik</b>                               | <b>1</b>  |
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>  | <b>3</b>  |
| 1.1      | Historische Vorbemerkungen . . . . .                     | 4         |
| 1.2      | Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen . . . . .    | 6         |
| 1.2.1    | Starke (oder Farb-)Wechselwirkung . . . . .              | 9         |
| 1.2.2    | Elektromagnetische Wechselwirkung . . . . .              | 10        |
| 1.2.3    | Schwache Wechselwirkung . . . . .                        | 11        |
| 1.2.4    | Gravitation . . . . .                                    | 12        |
| 1.3      | Die Struktur der Materie . . . . .                       | 16        |
| 1.3.1    | Kerne . . . . .  | 16        |
| 1.3.2    | Atome . . . . .  | 18        |
| 1.3.3    | Moleküle . . . . .                                       | 20        |
| 1.3.4    | Die Materie bei verschiedenen Temperaturen . . . . .     | 22        |
| 1.4      | Grundkonzepte physikalischer Naturbeschreibung . . . . . | 25        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 1 . . . . .                 | 30        |
| <b>2</b> | <b>Grundbegriffe der Bewegung</b>                        | <b>33</b> |
| 2.1      | Zeitmessung . . . . .                                    | 34        |
| 2.1.1    | Kurze Zeiten . . . . .                                   | 36        |
| 2.1.2    | Sehr kurze Zeiten . . . . .                              | 37        |
| 2.1.3    | Lange Zeiten . . . . .                                   | 39        |
| 2.1.4    | Einheiten der Zeit . . . . .                             | 45        |
| 2.2      | Längenmessung . . . . .                                  | 47        |
| 2.2.1    | Große Abstände . . . . .                                 | 47        |
| 2.2.2    | Kleine Abstände . . . . .                                | 52        |
| 2.3      | Bewegungen . . . . .                                     | 53        |
| 2.3.1    | Geschwindigkeit . . . . .                                | 53        |
| 2.3.2    | Beschleunigung . . . . .                                 | 58        |
| 2.3.3    | Kreisbewegung . . . . .                                  | 62        |
| 2.3.4    | Lineare harmonische Schwingung . . . . .                 | 63        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 2 . . . . .                 | 65        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>3</b> | <b>Die beiden ersten Newtonschen Gesetze</b>                                  | <b>69</b>  |
| 3.1      | Das Trägheitsprinzip oder 1. Newtonsches Gesetz . . . . .                     | 69         |
| 3.1.1    | Die statische Messung einer Kraft . . . . .                                   | 72         |
| 3.2      | Das Aktionsprinzip oder 2. Newtonsches Gesetz . . . . .                       | 75         |
| 3.2.1    | Kraft und Beschleunigung . . . . .  | 75         |
| 3.2.2    | Inertialsysteme . . . . .   | 78         |
| 3.2.3    | Die Maßeinheit der Masse . . . . .  | 79         |
| 3.2.4    | Maßeinheit der Kraft . . . . .  | 80         |
| 3.2.5    | Anwendung des 2. Newtonschen Gesetzes . . . . .                               | 81         |
| 3.3      | Kraftgesetz des harmonischen Oszillators . . . . .                            | 81         |
| 3.3.1    | Der ungedämpfte harmonische Oszillator . . . . .                              | 81         |
| 3.3.2    | Der gedämpfte harmonische Oszillator . . . . .                                | 84         |
| 3.3.3    | Reibungskräfte . . . . .  | 86         |
| 3.4      | Das universelle Gravitationsgesetz . . . . .                                  | 91         |
| 3.4.1    | Das Fallgesetz . . . . .  | 91         |
| 3.4.2    | Äquivalenzprinzip . . . . .   | 91         |
| 3.4.3    | Die Keplerschen Gesetze . . . . .   | 96         |
| 3.4.4    | Der Mond fällt wie der Apfel . . . . .  | 98         |
| 3.4.5    | Die Gravitationskonstante . . . . .   | 99         |
| 3.5      | Einfache Anwendungen des Gravitationsgesetzes . . . . .                       | 101        |
| 3.5.1    | Satellitenbahnen . . . . .  | 101        |
| 3.5.2    | Bestimmung der Masse und Dichte von Jupiter . . . . .                         | 102        |
| 3.5.3    | Numerische Berechnung von Planetenbahnen . . . . .                            | 103        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 3 . . . . .                                      | 108        |
| <b>4</b> | <b>Die Erhaltung von Energie und Impuls</b>                                   | <b>109</b> |
| 4.1      | Die Erhaltung der Summe von kinetischer und potentieller<br>Energie . . . . . | 110        |
| 4.2      | Einfache Anwendungen des Prinzips der Energieerhaltung . .                    | 121        |
| 4.3      | Äquipotentialflächen der potentiellen Energie und ihr Gradient                | 124        |
| 4.4      | Konservative und nichtkonservative Kräfte . . . . .                           | 126        |
| 4.5      | Reaktionsprinzip und Impulserhaltung . . . . .                                | 127        |
| 4.6      | Stoßprozesse . . . . .  | 129        |
| 4.7      | Gesamtimpuls eines Systems mit äußeren Kräften . . . . .                      | 134        |
| 4.8      | Beispiele für die Impulserhaltung . . . . .                                   | 138        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 4 . . . . .                                      | 144        |
| <b>5</b> | <b>Die rotierende Bewegung</b>  | <b>145</b> |
| 5.1      | Drehimpulserhaltung für einen Massenpunkt . . . . .                           | 151        |
| 5.2      | Die Erhaltung des Drehimpulses bei Systemen von Massen-<br>punkten . . . . .  | 161        |
| 5.3      | Der Drehimpuls starrer Körper . . . . .                                       | 167        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.4      | Die kleinste Einheit des Drehimpulses in der Natur . . . . .                         | 173        |
| 5.5      | Der symmetrische Kreisel . . . . .   | 177        |
| 5.6      | Die Energie eines starren Rotators . . . . .   | 182        |
| 5.7      | Scheinkräfte in rotierenden Bezugssystemen . . . . .                                 | 184        |
| 5.8      | Schlußbemerkung: Vergleich zwischen linearer und rotieren-<br>der Bewegung . . . . . | 189        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 5 . . . . .   | 189        |
| <b>6</b> | <b>Feste Stoffe: Vom Diamant zum Wackelpudding</b>                                   | <b>191</b> |
| 6.1      | Strukturen . . . . .   | 191        |
| 6.2      | Makroskopisches mechanisches Verhalten fester Körper . . .                           | 195        |
| 6.3      | Mikroskopische Aspekte der plastischen Deformation . . . . .                         | 198        |
| 6.4      | Keramische Werkstoffe . . . . .  | 201        |
| 6.5      | Materie im Kleinen: Tasten und bearbeiten . . . . .                                  | 203        |
| 6.6      | Warum ist Gummi so dehnbar? . . . . .  | 206        |
| 6.7      | Zwischen fest und flüssig . . . . .  | 209        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 6 . . . . .   | 211        |
| <b>7</b> | <b>Flüssigkeiten und ihre Bewegung</b>   | <b>213</b> |
| 7.1      | Hydrostatische Kräfte . . . . .  | 214        |
| 7.1.1    | Die Auftriebskraft . . . . .   | 214        |
| 7.1.2    | Oberflächen von Flüssigkeiten . . . . .  | 215        |
| 7.1.3    | Die Benetzung von festen Oberflächen . . . . .                                       | 217        |
| 7.2      | Kräfte in strömenden Flüssigkeiten . . . . .   | 221        |
| 7.2.1    | Trägheitskräfte in stationären Strömungen . . . . .                                  | 221        |
| 7.2.2    | Viskosität und Reibungskräfte . . . . .  | 224        |
| 7.2.3    | Strömung bei großen Geschwindigkeiten . . . . .                                      | 226        |
| 7.2.4    | Vom Fliegen . . . . .  | 228        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 7 . . . . .   | 233        |
| <b>8</b> | <b>Schwingungen</b>  | <b>235</b> |
| 8.1      | Freie ungedämpfte Schwingungen . . . . .   | 235        |
| 8.2      | Freie gedämpfte Schwingungen . . . . .   | 237        |
| 8.2.1    | Abklingzeiten für Amplitude und Energie . . . . .                                    | 238        |
| 8.2.2    | Der Gütefaktor . . . . .   | 239        |
| 8.3      | Erzwungene Schwingungen . . . . .  | 239        |
| 8.4      | Gekoppelte Schwingungen . . . . .  | 249        |
| 8.5      | Parametrisch verstärkte Schwingungen . . . . .                                       | 251        |
|          | Literaturhinweise zu Kapitel 8 . . . . .   | 254        |
| <b>9</b> | <b>Wellen</b>  | <b>255</b> |
| 9.1      | Ein erstes Beispiel: Die Seilwelle . . . . .   | 256        |
| 9.1.1    | Eine Störung breitet sich aus . . . . .  | 256        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 9.1.2     | Ableitung der Wellengleichung und ihre Lösungen . . . . .                      | 257        |
| 9.1.3     | Reflexion von Seilwellen am festen Ende . . . . .                              | 259        |
| 9.1.4     | Sinusförmige (harmonische) Wellen . . . . .                                    | 260        |
| 9.1.5     | Reflexion harmonischer Wellen: Stehende Wellen und Schwin-<br>gungen . . . . . | 261        |
| 9.1.6     | Eigenfrequenzen einer schwingenden Saite . . . . .                             | 262        |
| 9.1.7     | Von schwingenden Saiten zur Musik . . . . .                                    | 263        |
| 9.1.8     | Bemerkungen zur Polarisation von Wellen . . . . .                              | 264        |
| 9.2       | Schallwellen . . . . .   | 265        |
| 9.2.1     | Vorbemerkungen . . . . .   | 265        |
| 9.2.2     | Longitudinale Schallwellen in Gasen und Flüssigkeiten . . . .                  | 266        |
| 9.2.3     | Das Schallfeld und seine Größen . . . . .                                      | 271        |
| 9.2.4     | Schallwellen in der Natur und Technik . . . . .                                | 278        |
| 9.2.5     | Wellen auf Flüssigkeitsoberflächen . . . . .                                   | 289        |
| 9.2.6     | Frequenzspektrum, Dispersion und Energietransport . . . . .                    | 297        |
|           | Literaturhinweise zu Kapitel 9 . . . . .                                       | 304        |
| <b>B</b>  | <b>Grundlagen der thermischen Physik</b>                                       | <b>307</b> |
| <b>10</b> | <b>Die Temperatur und das ideale Gas</b>                                       | <b>309</b> |
| 10.1      | Thermodynamik und statistische Mechanik . . . . .                              | 309        |
| 10.2      | Die absolute Temperatur und das Gasgesetz . . . . .                            | 311        |
| 10.3      | Der Gleichgewichtszustand und die Relaxation . . . . .                         | 314        |
| 10.4      | Temperaturmessung . . . . .  | 315        |
| 10.5      | Brownsche Bewegung . . . . .   | 322        |
| 10.6      | Mikroskopische Analyse des Gasdrucks und innere Energie .                      | 324        |
| 10.7      | Mittlere freie Weglänge und der Streuquerschnitt . . . . .                     | 326        |
| 10.8      | Die barometrische Höhenformel . . . . .  | 329        |
| 10.9      | Der Boltzmann-Faktor und die thermische Energie . . . . .                      | 331        |
| <b>11</b> | <b>Wichtige thermische Eigenschaften der Materie</b>                           | <b>333</b> |
| 11.1      | Spezifische Wärme . . . . .  | 333        |
| 11.2      | Der Gleichverteilungssatz und das mehratomige Gas . . . . .                    | 338        |
| 11.3      | Wärmeausdehnung . . . . .  | 340        |
| 11.4      | Wärmetransport . . . . .   | 342        |
| 11.5      | Diffusion . . . . .  | 349        |
| <b>12</b> | <b>Ideale und reale Gase; Phasenumwandlung</b>                                 | <b>351</b> |
| 12.1      | Die Aggregatzustände am Beispiel des Wassers . . . . .                         | 351        |
| 12.2      | Phasenumwandlungen erster und zweiter Ordnung . . . . .                        | 354        |
| 12.3      | Zustandsfläche und Zustandsänderung des idealen Gases . . .                    | 355        |
| 12.4      | Die Zustandsgleichung realer Gase . . . . .                                    | 358        |

---

|           |   |                |
|-----------|---|----------------|
| 12.5      | Der kritische Punkt, die Tripellinie und der Dampfdruck . . . | 360            |
| 12.6      | Gibbssche Phasenregel und Phasendiagramme . . . . .           | 364            |
| <b>13</b> | <b>Wärme, Energie und Entropie – die Hauptsätze</b>           | <b>367</b>     |
| 13.1      | Die Arbeit eines Gases . . . . .                              | 367            |
| 13.2      | Der erste Hauptsatz . . . . .                                 | 369            |
| 13.3      | Reversible und irreversible Prozesse . . . . .                | 370            |
| 13.4      | Der zweite Hauptsatz und die Entropie . . . . .               | 371            |
| 13.5      | Der dritte Hauptsatz . . . . .                                | 376            |
| 13.6      | Der Carnot-Prozeß . . . . .                                   | 378            |
| <b>14</b> | <b>Einige Anwendungen der Thermodynamik</b>                   | <b>385</b>     |
| 14.1      | Die thermodynamische Temperaturskala . . . . .                | 385            |
| 14.2      | Der Joule-Thomson-Effekt und die Enthalpie . . . . .          | 386            |
| 14.3      | Gasverflüssigung und Tieftemperaturtechnik . . . . .          | 390            |
| 14.4      | Wärmekraftmaschinen – Stirling-Prozeß . . . . .               | 396            |
|           | Literaturhinweise zu den Kapiteln 10–14 . . . . .             | 399            |
|           | <b>Ratschläge fürs Studium</b>                                | <b>401</b>     |
|           | <b>Sachverzeichnis</b>  | <b>403</b>     |
|           | <b>Anhänge</b>  |                |
|           | Die Nobelpreise in Physik seit 1973 . . . . .                 | 415            |
|           | Basiseinheiten und Bezeichnungen . . . . .                    | 417            |
|           | Abgeleitete Einheiten . . . . .                               | 418            |
|           | Fundamentale physikalische Konstanten . . . . .               | 419            |
|           | Periodensystem der Elemente . . . . .                         | hint. Umschlag |

## Tabellenverzeichnis

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 1.1  | Frühe Stationen in der Entwicklung unseres physikalischen Weltbildes . . . . .   | 4   |
| 1.2  | Die Elementarteilchen . . . . .  | 8   |
| 1.3  | Die Grundkräfte der Natur, ihre Quellen (Ladungen) und Austauscheteilchen . . . . .  | 9   |
| 1.4  | Die starken Farbladungen der Quarks und Antiquarks . . . . .   | 10  |
| 1.5  | Das Planetensystem (und der Mond) . . . . .  | 12  |
| 2.1  | Kurze in der Natur vorkommende Zeiten . . . . .  | 45  |
| 2.2  | Zeitabschnitte in der Entwicklungsgeschichte der Erde und der biologischen Evolution . . . . .   | 46  |
| 2.3  | Wellenlängen einiger bekannter Strahlen . . . . .  | 52  |
| 2.4  | In Natur und Technik vorkommende Geschwindigkeiten . . . . .   | 58  |
| 2.5  | Beispiele für verschiedene Schwingungen . . . . .  | 65  |
| 3.1  | In der Natur vorkommende Massen . . . . .  | 80  |
| 3.2  | Viskosität von Luft und Flüssigkeiten . . . . .  | 87  |
| 3.3  | Haft-, Gleit- und Rollreibungskoeffizienten . . . . .  | 89  |
| 5.1  | Periodendauer einiger Pulsare . . . . .  | 149 |
| 5.2  | Eigendrehimpulse oder Spins von Elementarteilchen . . . . .  | 176 |
| 5.3  | Gegenüberstellung entsprechender Begriffe der linearen Bewegung und der Rotationsbewegung . . . . .  | 189 |
| 6.1  | E-Modul und Zugfestigkeit einiger wichtiger Materialien . . . . .  | 196 |
| 7.1  | Die Oberflächenspannung einiger Flüssigkeiten . . . . .  | 216 |
| 7.2  | Viskosität $\eta$ von Wasser und Luft . . . . .  | 225 |
| 9.1  | Die Frequenzen $f$ der klassischen Tonleiter bezogen auf den Grundton $c$ in der harmonischen Stimmung und die chromatische Tonleiter mit allen zwölf Halbtönen in der temperierten Stimmung . . . . . | 263 |
| 9.2  | Die Schallgeschwindigkeit in drei Gasen bei $0^\circ\text{C}$ . . . . .  | 269 |
| 9.3  | Schallgeschwindigkeit in einigen Flüssigkeiten bei $25^\circ\text{C}$ . . . . .  | 269 |
| 9.4  | Natur der rücktreibenden Kräfte bei Wasserwellen . . . . .   | 290 |
| 10.1 | Einige Temperaturfixpunkte der ITS90 bei Normal-Umgebungsdruck . . . . .   | 322 |
| 10.2 | Der atmosphärische Luftdruck in verschiedenen Höhen über dem Meeresspiegel . . . . .   | 330 |
| 11.1 | Lineare thermische Ausdehnungskoeffizienten . . . . .  | 341 |
| 11.2 | Wärmeleitzahlen $\kappa$ einiger Materialien bei 300 K . . . . .   | 344 |
| 12.1 | Konstanten der van-der-Waals-Gleichung für verschiedene Materialien . . . . .  | 359 |
| 12.2 | Kritische Daten einiger Materialien . . . . .  | 361 |
| 14.1 | Kryotechnische Daten wichtiger als Kühlmittel verwendeter Gase . . . . .   | 390 |
| 14.2 | Ungefähre Wirkungsgrade von praktischen Wärmekraftmaschinen . . . . .  | 396 |

## Aus dem Vorwort zur ersten Auflage

Der vorliegende Band Physik I erscheint als erster in einer Reihe von vier Bänden und spiegelt die viersemestrige Einführungsvorlesung am Physik-Department der Technischen Universität München wider.

Physik I–IV wendet sich an alle Studierende der Physik, die einem viersemestrigen Einführungskurs folgen, also nicht nur an Physiker im Hauptfach, sondern beispielsweise auch an Elektrotechniker und Lehramtskandidaten.

Angesichts der ständigen Expansion aller Zweige der Physik wollten wir neu prüfen, welcher Wissensstoff noch in die Einführungsvorlesung gehört, und was fairerweise beim Vordiplom vom Studenten verlangt werden sollte. Wir hoffen, daß die von uns getroffene Auswahl nicht zu eng ist. Der interessierte Student findet mit Hilfe der zahlreichen Literaturhinweise sicherlich reichlich Gelegenheit, über dieses Minimum hinaus seiner weitergehenden Neugierde, die wir wecken wollen, sofort zu folgen.

Wir haben versucht, in der Darstellung den experimentellen wie auch den theoretischen Sachverhalt so deutlich wie möglich werden zu lassen, um den mathematisch zunächst noch Ungeübten nicht unnötig durch eine formale – vielleicht mathematisch vollständigere – Beschreibung zu verwirren. Wir wollten deutlich machen, daß Physik mehr ist als angewandte Mathematik, und daß fast alle wichtigen Zusammenhänge der Physik schon mit einem Minimum an mathematischen Vorkenntnissen, wie sie jeder Abiturient mitbringt, im Prinzip verständlich zu machen sind. Entsprechend wird an mathematischen Vorkenntnissen für Physik I nur die elementare Differential- und Integralrechnung sowie die Vektorrechnung vorausgesetzt, die sich auch – falls nicht mehr ganz geläufig – leicht mit einigen zusätzlichen Vorlesungsstunden oder mit Hilfe der am Ende von Kap. 2 empfohlenen Bücher auffrischen lassen.

Falls unser Versuch einer möglichst einfachen Darstellung neuer physikalischer Grundkonzepte teilweise geglückt sein sollte, verdanken wir dies sicherlich auch dem Berkeley Physics Course, den Feynman Lectures, dem Alonso-Finn und dem MIT-Course, von deren didaktischen Geschick wir viel profitiert haben.

Physik I ist das Produkt einer engen Zusammenarbeit zwischen Festkörper- und Kernphysikern am Physik-Department der TU München: Das Manuskript eines Autors wurde jeweils von den anderen überarbeitet. Gleichzeitig

wurde die Vorlesung probeweise von Professor W. Kaiser nach diesem Konzept gehalten, und ihm verdanken wir wertvolle Hinweise aus dieser Unterrichtserfahrung. Herr Dr. E. Steichele hat dankenswerterweise das Manuskript in seiner ersten Fassung redigiert. In einer sonst von Hochschulunruhen geprägten Zeit war ebenfalls die konstruktive Mitwirkung der Fachschaft Mathematik/Physik unserer Hochschule entscheidend: sie hat auf eigene Initiative bereits einige Jahre den vorliegenden Text in stets verbesserter Form als Skriptum herausgegeben, wobei wir besonders dem damaligen Studenten, Herrn Dipl. Phys. A. Kling dankbar sind. Geschrieben wurde das Manuskript von Frau I. Schünke, Frau H. Walter und – in der endgültigen Fassung – von Frau C. Schilhabel. Frau N. Eska und Frau E. Meserle haben die originellen und klaren Zeichnungen angefertigt. Ihnen allen sei vielmals gedankt. Besonders erwähnt werden aber muß die Hilfe von Herrn Dipl. Phys. P. Berberich, der die gesamte Bearbeitung des Manuskripts neben seinem Studium besorgte. Darüber hinaus stammen fast alle Übungsfragen und weiterführenden Literaturzitate sowie die Studienhinweise am Ende von ihm.

Wenn es auch hauptsächlich Aufgabe der Vorlesung bleibt, Interesse und Begeisterung für die Physik zu wecken, so hoffen wir doch, daß auch Physik I und die Bände II–IV eine nützliche Hilfe, insbesondere bei der Vorbereitung zum Vordiplom, sein werden.

München, Oktober 1973

K. Dransfeld, P. Kienle und H. Vonach

## Vorwort zur zehnten Auflage

Unser Hauptziel bleibt es, durch möglichst anschauliche Darstellung des Stoffes schon früh Interesse für unsere schöne Wissenschaft zu wecken. Dem gleichen Ziel dienen auch die ausführlichen Hinweise auf aktuelle Themen der physikalischen Forschung wie z.B. in der Kern- und Elementarteilchenphysik, der Geophysik und Astronomie. Wir haben auch bewußt zahlreiche moderne Anwendungen der Physik einbezogen. So werden z.B. in Kap. 6 über die feste Materie mit der neuen Überschrift „*Vom Diamant zum Wackelpudding*“ Nanomotoren in Bakterien, die Gummielastizität, Fullerene und das Rasterkraftmikroskop behandelt. Wir hoffen, daß die vielen Anwendungsbeispiele helfen, den Text lebendig zu halten und beim Leser weitergehende Neugierde zu wecken.

Die Neuauflage war für uns auch eine willkommene Gelegenheit, neben der Beseitigung zahlreicher Druckfehler einige Kapitel gründlich zu überarbeiten und auf den neuesten Stand zu bringen. In der Kernphysik (Kap. 1) sind jetzt die in den letzten Jahren neuentdeckten schweren Kerne eben-

so erwähnt wie der geplante thermonukleare Reaktor ITER, dessen Bau in Cadarache (F) erst im Juni 2005 beschlossen wurde. Bei der Einführung in die Quantenphänomene (ebenfalls in Kap. 1) sind nunmehr auch die Quantenflüssigkeiten und die Bose-Einstein-Kondensation einbezogen. In Kap. 3 wurde für die Gravitationskonstante der neueste Wert nach CODATA (2004) übernommen. Die bisher in Kap. 5 etwas mißverständliche Beschreibung von Ebbe und Flut wurde mit einer neuen Abbildung versehen und auch im Text überarbeitet. Ebenso wurde in Abschnitt 5.7 die Wirkung der Corioliskraft auf die meteorologischen Wirbel in den Hoch- und Niederdruckzentren klarer formuliert. Ganz neu überarbeitet haben wir Abschnitt 7.2.4 über die Physik des Fliegens; er enthält nunmehr drei neue Abbildungen, um die Entstehung des Auftriebs aus der Zirkulation deutlicher werden zu lassen. Überarbeitet wurde auch Abschnitt 9.1.7 über die musikalischen Tonleitern, mit einer neuen Übersichtstabelle 9.1. Die schon in der alten Auflage (am Ende von Abschnitt 9.2.5) enthaltene kurze Behandlung von *Tsunamis* wurde ergänzt durch einen Hinweis auf das große Seebeben vor Sumatra im Dez. 2004. Im Wärmeteil des Buches wurde Abschnitt 10.3 (über den Gleichgewichtszustand und die Relaxation) mit Bild neu gestaltet. Die bisherige Tabelle 10.1 der Temperaturfixpunkte konnte ersetzt werden durch die neue *Internationale Temperaturskala (ITS90)*, die voraussichtlich bis 2010 gültig bleibt. Um Mißverständnisse zu vermeiden, haben wir den Ausdruck „Arbeitsleistung“ jetzt generell durch „Arbeit“ oder „verrichtete Arbeit“ ersetzt. Auch waren wir bemüht darauf zu achten, daß thermodynamische Größen, die kein exaktes Differential sind, auch nicht als solches bezeichnet werden (so haben wir z.B. die Wärmezufuhr jetzt durch  $\partial W$  und nicht mehr durch  $dW$  beschrieben). Auf der vorletzten Seite über das internationale Einheitensystem (SI) haben wir schließlich noch auf die Homepage der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt hingewiesen, wo der interessierte Leser – vielleicht für das Schreiben seiner ersten Veröffentlichung – eine ausführliche Beschreibung aller Einheiten und ihrer Schreibweise findet.

Sehr dankbar sind wir allen Studenten und Kollegen, die uns freundlicherweise auf Fehler oder Ungenauigkeiten in der bisherigen Auflage aufmerksam gemacht haben. Ihre Kritik war uns eine wesentliche Hilfe und Anregung. Wir bitten daher den Leser, uns auch in Zukunft durch Hinweise auf Fehlerhaftes zu unterstützen. Dem Verlag danken wir für seine stete Hilfsbereitschaft und sachkundige Umsetzung der umfangreichen Text- und Bildkorrekturen in so relativ kurzer Zeit.

## A. NEWTONSCHE MECHANIK

# 1 Einführung

Die Physik war ursprünglich die Lehre von der ganzen Natur ( $\Phi\acute{\upsilon}\sigma\iota\varsigma$  = griech: Natur) in einem sehr allgemeinen Sinne: „... daß ich erkenne, was die Welt – im Innersten zusammenhält“ (Faust I). Heute geht es in der Physik eher um das Studium nur der unbelebten Natur und ohne chemische Veränderungen. Dafür sind Biologie und Chemie selbstständige große Wissenschaftsgebiete geworden, wobei gleichzeitig interdisziplinäre Forschung immer größere Bedeutung gewinnt.

Die Physik hat uns wesentliche Einblicke erlaubt in den Aufbau der Materie aus Elementarbausteinen und in die Struktur des Kosmos um uns herum. Aber auch wertvolle Informationen über unser eigenes Denken und Erkennen hat sie uns gegeben: Sie hat uns nämlich erstens gezeigt, daß unsere klassischen Vorstellungen von Raum und Zeit nicht richtig sind. Auch im mikroskopischen atomaren Bereich der Atome müssen wir unsere Vorstellungen von strenger Kausalität und Vorhersagbarkeit aller Elementarprozesse gründlich korrigieren. Somit ist die Physik neben ihren vielen technischen Anwendungen, die unsere heutige Zivilisation begründen, eine sowohl für das Verstehen der Welt wie auch für die richtige Einschätzung unseres eigenen Erkenntnisvermögens faszinierende Wissenschaft.

Die Physik gliedert sich heute wie alle anderen (Natur)-Wissenschaften in zahlreiche Teildisziplinen. Die *Hochenergiephysik* beschäftigt sich zum Beispiel mit den Elementarteilchen und ihren Wechselwirkungen, die *Kernphysik* mit Aufbau und Eigenschaften von Kernmaterie, die *Atomphysik* (neben der Chemie) mit Atomen und ihren Verbindungen, die *Festkörperphysik* mit den Eigenschaften kondensierter Materie, die *Plasmaphysik* mit hochionisierten Gasen, die *Biophysik* mit der Struktur und Funktion von Makromolekülen, die *Geo- und Astrophysik* schließlich mit unserer makroskopischen Umgebung. Alle diese Disziplinen gehören entweder zur Physik oder bedienen sich physikalischer Betrachtungsweisen.

Die erste Auflage dieses Lehrbuches erschien 1973. Die Liste der seit dieser Zeit verliehenen Nobelpreise für Physik (siehe Anhang) zeigt deutlich die lebendige Entwicklung der Physik in den oben geschilderten Teildisziplinen. Das oberste Ziel der zukünftigen Entwicklung in Forschung und Lehre ist aber nicht eine weitere Aufspaltung der Physik in Teildisziplinen, sondern

*Die Physik gibt uns tiefe Einblicke in die Natur und korrigiert unsere Vorstellungen von Raum, Zeit und Kausalität. Zugleich ist sie die Grundlage der modernen Technik und Zivilisation.*

eine Vereinheitlichung der wichtigsten Grundprinzipien der Physik, in die sich dann die Teilerkenntnisse einordnen lassen. In dieser Richtung einen kleinen Beitrag zu leisten, ist Anliegen von PHYSIK I–IV.

Dieser erste von vier Bänden handelt von der Mechanik, d.h. von der Bewegung von Massen unter dem Einfluß von Kräften zwischen ihnen. Ebenfalls behandelt werden Schall und Wärme, da diese sich ebenfalls auf die Bewegung von Teilchen (Atomen) zurückführen lassen. Die elektromagnetischen Erscheinungen werden zusammen mit der speziellen Relativitätstheorie im zweiten Band behandelt. Der dritte und vierte Band beschreiben die Optik und die Quantenphysik, die Eigenschaften von Atomen und Molekülen und schließlich die statistische Theorie der Wärme.

## 1.1 Historische Vorbemerkungen

Während schon in der griechischen Frühzeit von philosophischen Schulen wichtige physikalische Fragen z.B. über die mikroskopische Teilbarkeit der Materie und die Struktur des Kosmos diskutiert wurden, gelang es jedoch erst nach der Aufklärung, besonders in den letzten 100 Jahren, einen tiefen Einblick in die mikroskopische Struktur der Materie, ihren Aufbau aus

**Tabelle 1.1:** Frühe Stationen in der Entwicklung unseres physikalischen Weltbildes

|                 |  |
|-----------------|--|
| um 2000 v. Chr. | Für die Babylonier ist die Erde noch eine Scheibe und der Himmel ebenfalls                                   |
| ca. 460 v. Chr. | Demokrits Konzept des Aufbaus der Materie aus kleinsten nicht mehr weiter teilbaren „Atomen“                 |
| ab 400 v. Chr.  | Die Platoniker betrachten die Erde bereits als Kugel   |
| ca. 200 v. Chr. | Eratosthenes ermittelt den richtigen Erddurchmesser aus eigenen Beobachtungen des Sonnenstandes              |
| 140 v. Chr.     | Ptolemäus entwirft ein geozentrisches Weltsystem   |
| 1510 n. Chr.    | Kopernikus entwickelt das heliozentrische Weltbild   |
| um 1600         | Erste astronomische Beobachtungen mit dem Fernrohr durch Galilei. Fast gleichzeitig Anwendung des Mikroskops |
| 1610            | Die Gesetze des freien Falls (Galilei)   |
| 1616            | Galilei wird gezwungen, das heliozentrische Weltbild zu widerrufen   |
| 1609–1619       | Veröffentlichung der 3 Keplerschen Gesetze   |
| 1697            | Newtons „Mathematische Prinzipien der Naturlehre“  |

Molekülen und Atomen bis hin zu den Elementarteilchen zu erreichen. Die Physik und die anderen Naturwissenschaften haben in den letzten 100 Jahren einen Aufschwung erlebt wie kaum ein anderer Bereich menschlicher Tätigkeit. Die Entdeckung der Röntgenstrahlen im Jahre 1896 kann als Beginn der Neuzeit betrachtet werden. Noch war damals der Aufbau der Materie aus Atomen keineswegs allgemein akzeptiert, und die Struktur des Atoms war ebensowenig bekannt wie die Existenz oder der Aufbau der Atomkerne. Die Entdeckungen der Relativität von Raum und Zeit, der Quantisierung der Energie und der Wellennatur der Materie erfolgten erst in diesem Jahrhundert durch Einstein, Planck und de Broglie, um nur einige der großen Persönlichkeiten zu nennen. Wir empfehlen dem Leser, den spannenden Lebensweg dieser Forscher anhand der am Kapitelende angegebenen ausgezeichneten Biographien selbst zurückzuverfolgen.

*Etwa mit der Entdeckung der Röntgenstrahlen vor hundert Jahren begann die moderne Physik.*

Warum entwickelte sich die Physik nicht schon früher? Der rasche Fortschritt der physikalischen Forschung nach dem Mittelalter beruht zu einem wesentlichen Teil auf der erst in jüngerer Zeit eingeführten mathematischen Beschreibung der Beobachtungen und der später viel engeren Zusammenarbeit zwischen experimentell und theoretisch arbeitenden Physikern. Dabei sieht der Experimentator seine Hauptaufgabe darin, neue Phänomene und Gesetzmäßigkeiten genau zu beobachten oder die theoretisch vorhergesagten zu verifizieren, während der Theoretiker versucht, diese Beobachtungen mit einfachen Prinzipien zu erklären und neue Gesetzmäßigkeiten vorherzusagen. Oft werden auch beide Aufgaben von ein und derselben Person erfüllt. Sehr entscheidend für den raschen Fortschritt waren auch instrumentelle Verbesserungen, wie z.B. die Entwicklung des Fernrohrs und des Lichtmikroskops um 1600.

Die Physik hat in diesem Jahrhundert nicht nur unsere Kenntnis von der Natur außerordentlich erweitert und zum Wachstum vieler Nachbardisziplinen beigetragen, sondern auch zu ganz neuen *Technologien* geführt, die unsere heutige Zivilisation geprägt haben. Erinnerung sei an die Entdeckung von Materialien mit neuartigen Eigenschaften, an die stürmische Entwicklung der Mikrotechnologie, die der theoretische Physiker Feynman für eine der großen technischen Herausforderungen unserer Tage hielt. Sie hat den modernen Computer ermöglicht mit seiner Datenspeicherung auf kleinstem Raum und den Anstoß gegeben zum Aufschwung der heutigen Datenverarbeitung und Informationswissenschaft. Andere technische Neuerungen, zu denen die Physik in den letzten Jahren geführt hat, sind z.B. auch die Raumfahrttechnik und die neuen bildgebenden Verfahren in der medizinischen Diagnostik.

Wohin entwickelt sich die Physik heute? Obwohl heute die *technologischen* Entwicklungen oft im Vordergrund der Diskussion stehen, bleibt es das

Hauptziel der *physikalischen Grundlagenforschung*, die vielen noch offenen grundlegenden Fragen über unsere Welt besser zu verstehen. Hierzu gehören zum Beispiel Fragen

- über die Grenzen des Standardmodells der Materie
- zur Struktur des Vakuums
- zur Kosmologie und Astrophysik, einschließlich einer Quantentheorie der Gravitation, sowie Fragen
- über die Bedeutung nichtlinearer Prozesse, auch in der Biologie

Bevor wir mit der genauen Beschreibung der klassischen Mechanik beginnen, wollen wir uns einen wenigstens qualitativen Überblick über die Physik verschaffen. In diesem Sinne seien im folgenden unsere heutigen Erkenntnisse über die elementaren Bausteine der Materie mit ihren Wechselwirkungen, über den strukturellen Aufbau der Materie und über die Grundkonzepte physikalischer Naturbeschreibung – auch mit ihren Grenzen – skizziert.

## 1.2 Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen

Eine wesentliche Triebfeder der Physik ist der Wunsch, die vielfältigen Erscheinungen unseres Universums auf einige Grundbausteine und ihre Wechselwirkungen zurückführen zu können. Die Idee, daß die Materie aus kleinsten Teilchen zusammengesetzt ist, die sich nicht weiter zerlegen lassen, wurde zum ersten Mal von Demokrit (460 v. Chr.) geäußert, der diese Teilchen Atome ( $\alpha\tau\omicron\mu\omicron\varsigma$  = unteilbar) nannte. Heute ist die Existenz von Atomen ein fester Bestandteil unseres Weltbildes geworden. Mit der Raster-Tunnel-Mikroskopie lassen sie sich heute nicht nur einzeln abtasten und sichtbar machen, sondern man kann auch einzelne Atome von einem Platz auf einen wohldefinierten anderen „ziehen“. Jedes Atom<sup>1</sup> hat einen schweren positiv geladenen Kern, der mehr als 99,9% seiner Masse trägt und von leichten negativ geladenen Elektronen umgeben wird. Die elektromagnetische Kraft zwischen positiven und negativen Ladungen bindet die Elektronen an den Kern, der seinerseits aus Protonen und Neutronen besteht. Die Zerlegung des Atoms in den Kern und die Elektronen der Hülle macht deutlich, daß Atome noch nicht die von Demokrit gemeinten unteilbaren kleinsten Teilchen sein können. Um zu diesen vorzudringen, müssen wir noch tiefer in den Aufbau der Materie blicken. Sind Elektron, Proton und Neutron die gesuchten

---

<sup>1</sup> Der Durchmesser eines H-Atoms (etwa  $0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$ ) ist etwa  $10^5$  mal größer als der Durchmesser seines Atomkerns.

elementaren Teilchen? Die Antwort aus heutiger Sicht lautet: Das Elektron vermutlich ja, aber das Proton und Neutron nicht. Die Kernbausteine (Nukleonen) Proton und Neutron besitzen noch eine innere Struktur. Sie setzen sich beide aus noch kleineren Teilchen, den sog. *Quarks*<sup>2</sup>, zusammen.

Unsere gegenwärtige Vorstellung vom Aufbau der Materie gründet sich auf zwölf Grundbausteine oder *Elementarteilchen* und vier Grundkräfte oder *Wechselwirkungen* zwischen diesen Teilchen. Betrachten wir im folgenden zunächst die Elementarteilchen und dann ihre Wechselwirkungen.

In Tabelle 1.2 sind die heute bekannten Elementarteilchen und ihre Eigenschaften, soweit man sie kennt, zusammengefaßt, wobei man zwei Hauptgruppen oder Teilchenfamilien unterscheidet: die relativ schweren *Quarks* und die leichteren *Leptonen*. Die Leptonen tragen nur ganzzahlige (positive oder negative) Ladungen von der Größe einer Elektronenladung (oder auch keine Ladung). Die elektrische Ladung der Quarks dagegen ist immer  $\pm(1/3)$  oder  $\pm(2/3)$  der Elektronenladung. Neutrale Quarks gibt es nicht, wohl aber neutrale Leptonen, die Neutrinos. Sowohl bei den Quarks wie bei den Leptonen unterscheidet man noch drei Untergruppen, auf die wir weiter unten zu sprechen kommen werden.

Zu jedem der insgesamt aufgelisteten zwölf Teilchen, die alle einen Eigendrehimpuls von  $\frac{1}{2} \cdot \hbar$  besitzen und somit zur Klasse der Fermionen<sup>3</sup> zählen, existiert immer genau ein sog. *Anti-Teilchen* mit der gleichen Masse, aber entgegengesetzter elektrischer Ladung. Es gibt also auch zwölf Anti-Teilchen. Die Anti-Teilchen zu den neutralen Teilchen sind ebenfalls neutral. Sie unterscheiden sich in der Richtung ihres Eigendrehimpulses relativ zur Ausbreitungsrichtung. Man kann also eine zweite analoge Anti-Teilchen-Tabelle aufstellen, in der alle Ladungsvorzeichen vertauscht sind und alle Teilchen einen „Anti-Balken“ über ihren Namen als „Anti“-Charakterisierung bekommen. Die letzte Spalte von Tab. 1.2 enthält zur Illustration die elektrischen Ladungszustände aller zwölf Anti-Teilchen.

Zu jedem  
Elementarteilchen  
gibt es ein  
Antiteilchen.

Der weitaus größte Teil unserer Welt besteht aus nur vier Teilchen, nämlich aus den ersten beiden Quarks und den ersten beiden Leptonen, die in Tab. 1.2 zur jeweils ersten Untergruppe gehören und die, außer den Neutrinos, in stabilen Verbindungen vorkommen. So setzen sich z.B. die Protonen im einfachsten Bild aus zwei *u*-Quarks und einem *d*-Quark (*uud*) und Neutronen aus einem *u*-Quark und zwei *d*-Quarks (*udd*) zusammen. Die

<sup>2</sup> Der Name *Quarks* ist einem rätselhaften Satz aus einem Roman von James Joyce entnommen: *Three Quarks for Muster Mark*. (In der Physik ist nicht alles so ernst, wie es zuweilen erscheint!)

<sup>3</sup> Der Spin oder Drehimpuls eines Teilchens wird in Kap. 5 genau erklärt. Teilchen mit halbzahligem Spin nennt man *Fermionen*, Teilchen mit geradzahligem Spin heißen *Bosonen*. (Nach den theoretischen Physikern E. Fermi (1901 – 1954) und N.S. Bose (1894 – 1974))

**Tabelle 1.2:** Die Elementarteilchen

| Untergruppe      | Eigenschaft bzw. Name | Symbol     | Masse <sup>4</sup><br>(MeV/c <sup>2</sup> ) | Elektrische Ladung <sup>5</sup> |              |
|------------------|-----------------------|------------|---|---------------------------------|--------------|
|                  |                       |            |   | Teilchen                        | Antiteilchen |
| <b>QUARKS:</b>   |                       |            |   |                                 |              |
| 1.               | UP                    | $u$        | 5   | +2/3                            | -2/3         |
|                  | DOWN                  | $d$        | 10  | -1/3                            | +1/3         |
| 2.               | CHARME                | $c$        | 1 500                                       | +2/3                            | -2/3         |
|                  | STRANGE               | $s$        | 150   | -1/3                            | +1/3         |
| 3.               | TOP                   | $t$        | 175 000                                     | +2/3                            | -2/3         |
|                  | BOTTOM                | $b$        | 4 700                                       | -1/3                            | +1/3         |
| <b>LEPTONEN:</b> |                       |            |   |                                 |              |
| 1.               | ELEKTRON              | $e$        | 0,511                                       | -1                              | +1           |
|                  | EL.-NEUTRINO          | $\nu_e$    | $< 4,5 \cdot 10^{-6}$                       | 0                               | 0            |
| 2.               | MYON                  | $\mu$      | 106   | -1                              | +1           |
|                  | MY-NEUTRINO           | $\nu_\mu$  | $< 170 \cdot 10^{-3}$                       | 0                               | 0            |
| 3.               | TAU                   | $\tau$     | 175   | -1                              | +1           |
|                  | TAU-NEUTRINO          | $\nu_\tau$ | $< 24$                                      | 0                               | 0            |

Quark-Antiquarkverbindungen  $u\bar{d}$ ,  $\bar{u}d$  und  $(u\bar{u} - \bar{d}d)$  führen auf die sog.  $\pi$ -Mesonen  $\pi^+$ ,  $\pi^-$  und  $\pi^0$ . Die elementaren Fermionen der 2. und 3. Untergruppen sind instabil und zerfallen in die leichteren Grundbausteine. Bei diesem Zerfall bleibt jeweils die Gesamtladung erhalten.

Bei den Quarks kommt eine interessante Besonderheit hinzu: Trotz vieler Versuche ist es bisher nicht gelungen, Quarks als isolierte Teilchen nachzuweisen, und vieles deutet daraufhin, daß es prinzipiell unmöglich ist. Dies ist eine Folge des Kraftgesetzes zwischen zwei Quarks, das grob mit dem eines Gummibandes oder einer Stahlfeder verglichen werden kann. Die anziehende Wirkung wird um so stärker, je mehr sich die Quarks voneinander zu entfernen versuchen. Die aus Quarks zusammengesetzten Teilchen werden unter dem Oberbegriff Hadronen zusammengefaßt, was besagen soll, daß diese Teilchen einer starken ( $\acute{\alpha}\delta\rho\acute{o}\varsigma$  = griech: stark) Wechselwirkung unterliegen.

Immer noch mysteriöse Teilchen sind die Neutrinos, die neutralen Partner der geladenen Leptonen (Elektron, Myon, Tau). Es gibt drei verschiedene

<sup>4</sup> Die Teilchenmassen werden in MeV/c<sup>2</sup> angegeben. 1 MeV/c<sup>2</sup> entspricht etwa gerade der Masse zweier Elektronen. Bei den Neutrinomassen bestehen noch Unsicherheiten in der Massenbestimmung. Der Wert null wird jedoch heute von den meisten Fachleuten als richtig betrachtet.

<sup>5</sup> Die elektrische Ladung ist hier immer angegeben in Einheiten einer Elektronenladung. Sie kann positiv oder negativ sein.

Mesonen

Hadronen

Arten davon: das zum Elektron gehörende Elektron-Neutrino ( $\nu_e$ ), das zum Myon gehörende Myon-Neutrino ( $\nu_\mu$ ) und schließlich das Tau-Neutrino ( $\nu_\tau$ ), das kürzlich beobachtet wurde. Eines der großen Rätsel ist der Wert der Masse der Neutrinos. Experimentell gibt es bisher nur Grenzen für die Massen, die in Tabelle 1.2 angegeben sind, wobei inzwischen gesichert ist, daß die Neutrinos ebenfalls Massen besitzen.

**Tabelle 1.3:** Die Grundkräfte der Natur, ihre Quellen (Ladungen) und Austauschteilchen

| Grundkräfte       | Quellen (Ladung)   | Austauschteilchen |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| Stark             | Farbladungen       | Gluonen           |
| Elektromagnetisch | Elektrische Ladung | Photonen          |
| Schwach           | Schwache Ladung    | $Z^0$ , W-Bosonen |
| Gravitation       | Masse              | Gravitonen        |

Allgemein wird heute angenommen, daß zwischen den Grundbausteinen der Materie vier verschiedene Grundkräfte wirken können. Dabei geht man von der Vorstellung aus, daß Kräfte immer von gewissen „Ladungen“ (von denen es außer den elektrischen auch noch andere geben kann) erzeugt und von sogenannten *Austauschteilchen* übertragen werden. Im Gegensatz zu den Grundbausteinen (Quarks und Leptonen) besitzen die Austauschteilchen einen ganzzahligen Spin. (Teilchen mit dieser Eigenschaft werden als Bosonen bezeichnet.) In Tabelle 1.3 sind die in der Natur vorkommenden Kräfte zusammen mit den Ladungen, an denen sie angreifen, und den jeweiligen Austauschteilchen in der Reihenfolge ihrer Stärke aufgelistet. Die an zweiter und dritter Stelle genannten Kräfte werden heute in einer vereinheitlichten Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung behandelt.

*Austauschteilchen sind keine Elementarteilchen, sondern sie vermitteln nur die Kräfte zwischen den Elementarteilchen.*

### 1.2.1 Starke (oder Farb-)Wechselwirkung

Die außerordentlich starken Kräfte, die zwischen den Quarks wirken, sollen im folgenden kurz beschrieben werden. Aus der Systematik der in der Hochenergiephysik beobachteten Teilchen läßt sich folgern, daß jedes Quark einen inneren Freiheitsgrad besitzt, der drei verschiedene Zustände annehmen kann, und in anschaulicher Weise als Farbe oder Farbladung interpretiert wird. Tabelle 1.4 zeigt die möglichen Farbladungen der Quarks und Antiquarks. Die Farbladungen sind die Quellen der starken Kräfte zwischen den Quarks und werden durch den Austausch von sog. *Gluonen* (Glue in engl. heißt Leim) übertragen. Die Gluonen tragen je eine Farb- und eine Antifarbladung und können daher auch untereinander stark wechselwirken. Diese Eigenschaft der Gluonen führt vermutlich zu dem vorher beschriebenen Einschluß der Quarks in den Hadronen. Es ist ein aus der

Beobachtung gewonnenes Ergebnis, daß in der Natur nur solche Quark-Kombinationen (Hadronen) auftreten, die nach außen hin farbneutral sind. Da die Gluonenkräfte nur an resultierenden Farbladungen angreifen, wirken auf farbneutrale Hadronen über große Entfernungen keine Kräfte. Nur wenn sich zwei Nukleonen so nahe kommen, daß ihre Quarks und Gluonen mitein-

**Tabelle 1.4:** Die starken Farbladungen der Quarks und Antiquarks

| QUARKS |        | ANTIQUARKS |           |
|--------|--------|------------|-----------|
| Farbe  | Symbol | Anti-Farbe | Symbol    |
| Rot    | $r$    | Anti-Rot   | $\bar{r}$ |
| Blau   | $b$    | Anti-Blau  | $\bar{b}$ |
| Grün   | $g$    | Anti-Grün  | $\bar{g}$ |

ander wechselwirken können, treten starke Farbkräfte auf. Die starken Kräfte zwischen zwei Nukleonen und deren geringe Reichweiten lassen sich somit auf eine indirekte Restwechselwirkung der Farbkräfte zurückführen.

## 1.2.2 Elektromagnetische Wechselwirkung

Die zweitstärkste Grundkraft ist die elektromagnetische Wechselwirkung. Sie wirkt auf alle geladenen Teilchen und wird durch den Austausch von Photonen, den Quanten des elektromagnetischen Feldes, die keine Ladungen irgendwelcher Art besitzen, übertragen. Die relativ große Reichweite der Coulombkräfte hängt damit zusammen, daß die Photonen masselos sind. Man kann zeigen, daß hieraus eine mit dem Quadrat des Abstandes  $r$  abnehmende Kraft folgt, was man auch für die Coulomb-Kräfte zwischen zwei ruhenden Ladungen  $q_1$  und  $q_2$  findet. Gleiche Ladungen stoßen sich ab, Ladungen ungleichen Vorzeichens ziehen sich an.

$$F_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$$

**Coulombsches Kraftgesetz**

(Hierin ist  $\epsilon_0$  eine Konstante, die sog. Dielektrizitätskonstante =  $8,854 \cdot 10^{-12}$  As/Vm.)<sup>6</sup> Neben elektrostatischen Kräften können auch magnetische Kräfte auftreten, z.B. zwischen zwei stromdurchflossenen Leitern. Diese magnetische Kraft, welche die Grundlage vieler elektrischer Maschinen bildet, hängt nicht von der Ladung ab, sondern nur von der Größe und Richtung der Ströme. Bewegt man eine Ladung nicht mit konstanter Geschwindigkeit, sondern unterwirft sie einer beschleunigten Bewegung (Beschleunigen,

<sup>6</sup> Näheres zu den Einheiten A = Ampère und V = Volt in Band II

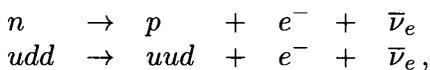
Abbremsen oder auch periodische Schwingungen), so sendet diese beschleunigte Ladung elektromagnetische Wellen aus.

Es sei auch erwähnt, daß die Kraftwirkung der beschleunigten Ladung auf eine andere im Abstand  $r$  nur mit  $(1/r)$  abnimmt (statt mit  $(1/r^2)$  wie bei ruhenden Ladungen). Dies ist von eminenter technischer Bedeutung für die Fernseh-, Rundfunk- und Nachrichtenübertragungen mit elektromagnetischen Wellen, sowie für die Ausbreitung von Wärmestrahlung und Licht über große Entfernungen.

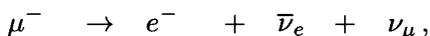
Nach den Gesetzen der elektromagnetischen Wechselwirkungen, auf die wir in PHYSIK II ausführlich eingehen werden, verlaufen fast alle Erscheinungen, die wir in der Natur finden und in der Technik nutzen. Diese Wechselwirkung ist nicht zuletzt auch die Grundlage der Biochemie und des Lebens.

### 1.2.3 Schwache Wechselwirkung

Die schwache Wechselwirkung wirkt auf alle Quarks und Leptonen. Sie wird von schweren Vektorbosonen  $W^+$ ,  $W^-$  und  $Z^0$  übertragen, die aufgrund ihrer großen Massen ( $M(Z^0) = 91,186 \text{ GeV}/c^2$ ,  $M(W^\pm) = 80,356 \text{ GeV}/c^2$ ) eine extrem kurze Reichweite (kleiner als ein Nukleonendurchmesser) besitzen. Bosonen tragen eine positive ( $W^+$ ) oder eine negative ( $W^-$ ) elektrische Elementarladung. Das „schwere Photon“,  $Z^0$ , ist elektrisch neutral wie das Photon. Die schweren Bosonen koppeln an alle elementaren Fermion-Anti-Fermionpaare. So kann z.B. ein  $W^-$ -Boson in ein  $e^- + \bar{\nu}_e$ , oder ein  $\mu^- + \bar{\nu}_\mu$  zerfallen und koppelt auch an ein  $(\bar{u}d)$ -Quarkpaar. Auf diese Weise lassen sich alle schwachen Zerfälle beschreiben. Die schwache Wechselwirkung ist also die Ursache für alle Zerfälle, bei denen ein Lepton in ein anderes Lepton oder ein Quark in ein anderes Quark übergeht. Beispiele hierfür sind der  $\beta$ -Zerfall des Neutrons



bei denen ein d-Quark in ein u-Quark übergeht, oder der Myonenzerfall



bei dem ein Myon in ein Elektron überführt wird. Gegenüber den übrigen Grundkräften hat die schwache Wechselwirkung eine weitere Besonderheit. Sie ist nicht *paritätserhaltend*, d.h. nur linkshändige elementare Fermionen (bzw. rechtshändige Antifermionen) tragen eine schwache Ladung, mit der sie zur schwachen Wechselwirkung beitragen.

## 1.2.4 Gravitation

Die Gravitation ist die schwächste Wechselwirkung, die wir kennen. Sie ergibt immer eine anziehende Kraft zwischen zwei massebehafteten Teilchen. Dabei ist belanglos, ob es sich um Teilchen oder Antiteilchen handelt, und wie groß deren elektrische Ladungen sind. Die stets anziehende Gravitationskraft  $F_{\text{Grav}}$  ist nur bestimmt durch die Massen beider Teilchen ( $m, M$ ) sowie durch deren gegenseitigen Abstand  $r$  nach folgendem Gesetz:

$$F_{\text{Grav}} = \gamma \frac{m \cdot M}{r^2} \quad \text{Newtons Gravitationsgesetz}$$

Dabei ist  $\gamma$  die universelle Gravitationskonstante ( $= 6,6 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2/\text{kg}^2$ ). Als Wechselwirkungsteilchen werden masselose Gravitonen angenommen, die bisher nur indirekt durch die Beobachtung von schnell rotierenden binären Pulsaren nachgewiesen werden konnten (s.u.). Die Gravitation ist in der mikroskopischen Welt vernachlässigbar: So ist die Gravitationsanziehung zwischen 2 Elektronen  $10^{-39}$  schwächer als die elektrische Coulomb-Abstoßung zwischen ihnen. Dennoch besitzt die Gravitationswechselwirkung größte Bedeutung für die Struktur und Bewegung der großen (ungeladenen) Objekte des Universums: die Erde und die anderen Planeten bewegen sich nur unter dem Einfluß der Gravitation um die Sonne (Tabelle 1.5 gibt einige Daten unseres Planetensystems wieder).

**Tabelle 1.5:** Das Planetensystem (und der Mond)

|                 | Masse<br>( $10^{24}$ kg) | Radius<br>( $10^3$ km) | mittl.<br>Dichte<br>( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | mittl. Abstand<br>von der Sonne<br>( $10^8$ km) | Exzen-<br>trizität | Umlauf-<br>periode<br>(Tage) |
|-----------------|--------------------------|------------------------|--|---|--------------------|------------------------------|
| Sonne           | 1 990 000                | 695                    | 1,41   |   |                    |                              |
| Merkur          | 0,31                     | 2,43                   | 5,4  | 0,580   | 0,206              | 88                           |
| Venus           | 4,88                     | 6,05                   | 5,2  | 1,081   | 0,0068             | 225                          |
| Erde            | 5,98                     | 6,37                   | 5,52   | 1,496   | 0,0167             | 365,26                       |
| Mars            | 0,64                     | 3,38                   | 3,9  | 2,278   | 0,093              | 687                          |
| Jupiter         | 1 900                    | 69,7                   | 1,3  | 7,781   | 0,048              | 4 332                        |
| Saturn          | 568                      | 58,2                   | 0,69   | 14,27   | 0,054              | 10 759                       |
| Uranus          | 86,8                     | 23,4                   | 1,6  | 28,69   | 0,046              | 30 684                       |
| Neptun          | 103                      | 22,7                   | 2,3  | 45,00   | 0,008              | 90 710                       |
| Pluto           | ~1,08                    | 5,7                    | ~1,65  | 59,10   | 0,246              |                              |
| und der<br>Mond | 0,073                    | 1,74                   | 3,3  | mittl. Abstand<br>von der Erde:<br>384 400 km   | 0,0549             | um die<br>Erde:<br>27,37     |

Erwähnt sei auch an dieser Stelle, daß analog zu beschleunigten elektrischen Ladungen auch beschleunigte Massen in der Lage sein sollten, die Gravitationswirkung auf eine andere Masse in Form sog. *Gravitationswellen*, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, auszustrahlen. Der direkte Nachweis von Gravitationswellen auf der Erde ist bisher noch nicht gelungen. Der Energieverlust schnell rotierender Doppelsterne durch die Abstrahlung von Gravitationsstrahlung wurde jedoch beobachtet<sup>7</sup> und 1993 durch den Physik-Nobelpreis ausgezeichnet.

*Gravitationswellen*

Unsere Sonne gehört mit mehr als  $10^{10}$  anderen Sternen mit sonnenähnlichen Massen zum Milchstraßen- oder galaktischen System, und wir bewegen uns alle zusammen um das galaktische Zentrum. Neue Infrarotuntersuchungen deuten darauf hin, daß sich im Zentrum unserer Milchstraße ein massives *schwarzes Loch*<sup>8</sup> befindet, aus dem keine Strahlung mehr zu uns gelangen kann, und das wir nur noch durch seine Gravitationswirkung auf Nachbarsterne wahrnehmen können. Alle diese Sterne, auch die in außergalaktischen Nebeln (d.h. in anderen „Galaxien“), haben sich nach unseren heutigen Vorstellungen unter dem Einfluß der Gravitation vor einigen Milliarden Jahren aus Dichteschwankungen der interstellaren Materie gebildet. Diese makroskopischen Wirkungen der Gravitation seien an den drei Bildern 1.1, 1.2a und 1.2b illustriert.

*Schwarze Löcher*

Zum Abschluß möchten wir noch auf ein wissenschaftlich hochaktuelles Phänomen in der Entwicklungsgeschichte alter Sterne hinweisen. Unter dem Einfluß der Gravitation kontrahieren sich alle Sterne, wobei so hohe Temperaturen entstehen, daß Kernreaktionen eingeleitet werden. Wenn die Masse des Sterns größer ist als das 1,5-fache der Sonne, kann die Freisetzung der Kernenergie in so kurzer Zeit erfolgen, daß der Stern explodiert und dabei einen Teil seiner Schale abstößt. So entsteht eine *Supernova-Explosion*, nach der sich im Zentrum des explodierten Sterns die zurückgebliebene Masse (etwa eine Sonnenmasse) auf eine Kugel mit einem Durchmesser von nur 10 km zusammenzieht! Dieses so stark kontrahierte Objekt besitzt dann eine mittlere Dichte, die etwa fünfmal höher ist als die eines Atomkernes. Es hat sich also unter dem Einfluß der Gravitation ein „Riesenkern“ gebildet, von dem man vermutet, daß er im wesentlichen aus Neutronen und neutronreichen Atomkernen besteht. Man spricht daher von der Bildung eines *Neutronensterns*. In den Supernova-Explosionen werden auch alle in der Natur vorhandenen schweren Elemente durch Kernreaktionen und anschließende Zerfälle zu stabilen Kernen gebildet.

*Supernova*

*Neutronenstern*

<sup>7</sup> siehe: T. Piran: „Neutronendoppelsterne“, Spektrum der Wissenschaft, S. 52 (Juni 1996). Siehe auch Kap. 5 in diesem Band.

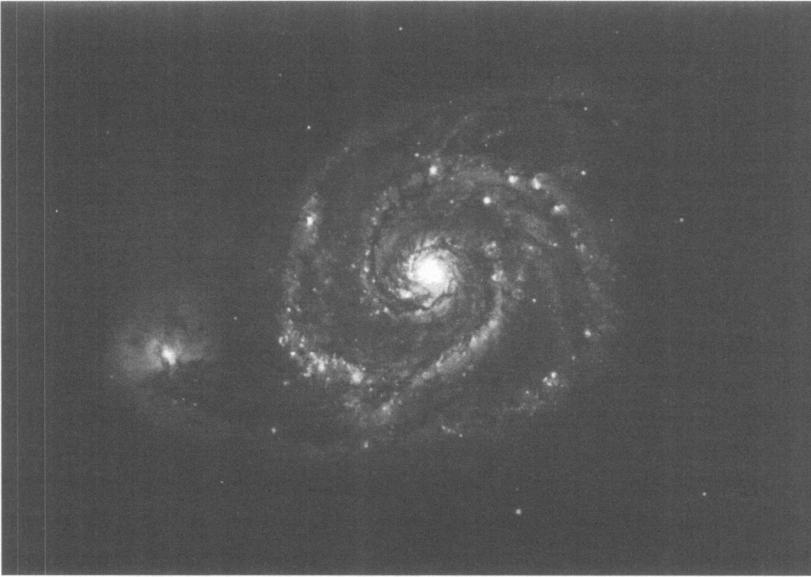
<sup>8</sup> Näheres zu „schwarzen Löchern“ u.a. in den sehr lesenswerten Büchern von R. Kippenhahn (100 Milliarden Sonnen) und von St.W. Hawking (Eine kurze Geschichte der Zeit), die beide in den Literaturhinweisen am Schluß dieses Kapitels zitiert sind.



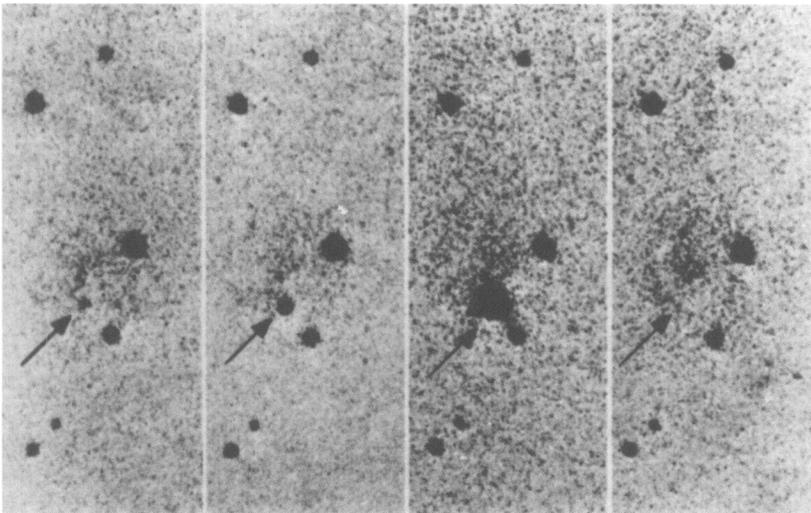
**Bild 1.1:** Der kugelförmige Sternhaufen NGC 6205 im Sternbild des Herkules enthält weit über 100 000 Einzelsterne und ist etwa 22 000 Lichtjahre von uns entfernt. Entsprechend der Abnahme der anziehenden Kraft nimmt die Sterndichte vom Zentrum nach außen ab. (Bildquelle: G. Gamow: Die Geburt des Alls, Hans Reich Verlag, München, 1959)



**Bild 1.2a:** Eine der großen Galaxien, die uns am nächsten liegt, ist der große Nebel der Andromeda NGC 224 (Entfernung: 2 Millionen Lichtjahre, Durchmesser 100 000 Lichtjahre). Die Sterne haben sich in einer Ebene kontrahiert. Zwei kleine elliptische Sternsysteme begleiten ihn. (Bildquelle: vgl. Bild 1.1)



**Bild 1.2b:** Der Spiralnebel NGC 5195 in den Jagdhunden zeigt ausgeprägte Spiralarme, die sich infolge des Drehimpulses herausgebildet haben. So ähnlich müssen wir uns auch unsere Milchstraße vorstellen. (Bildquelle: vgl. Bild 1.1)



**Bild 1.3:** Die Bildfolge (Bildnegative) zeigt die verschiedenen Stufen einer Supernova-Explosion, die im Jahre 1937 beobachtet wurde. Während der Explosion erreicht der explodierende Stern etwa die  $10^8$ -fache Leuchtkraft eines normalen Sterns. Das Ereignis fand vor 5 – 10 Millionen Jahren statt. (Bildquelle: vgl. Bild 1.1)

## 1.3 Die Struktur der Materie

In diesem Abschnitt wollen wir eine Übersicht über den Aufbau der Materie geben, wie sie für die Problemstellungen der Kernphysik, Atomphysik, Molekülphysik, Physik der kondensierten Materie, der Chemie und Biologie von grundlegender Bedeutung ist. Die detaillierte Beschreibung erfolgt in PHYSIK III und IV.

### 1.3.1 Kerne

Die starke Wechselwirkung führt zu den großen Kräften zwischen den zum Aufbau der Kerne wichtigen Nukleonen, der Neutronen und Protonen. Man kann zeigen, daß im Prinzip diese Wechselwirkung zwischen Nukleonen auf dem Austausch von Quark-Antiquarkpaaren (Mesonen) beruht, wobei die leichtesten Mesonen, die  $\pi$ -Mesonen, eine besondere Rolle spielen. Die Gesetze der Kernwechselwirkung sind sehr kompliziert, und ihre Erforschung ist noch immer eines der Hauptziele der Kern- und Elementarteilchenphysik. Hier sollen nur qualitativ einige Eigenschaften dieser Wechselwirkung beschrieben werden:

*Die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung hat nur eine kurze Reichweite.* Kräfte zwischen Nukleonen treten nur bei Abständen von kleiner als  $2 \cdot 10^{-15}$  m auf. Bei größeren Abständen sind sie bedeutungslos. Die kurze Reichweite rührt von der endlichen Masse der ausgetauschten Quark-Antiquarkpaare her.

Die Kraft zwischen zwei Nukleonen ist abhängig von der relativen Bahn und der Eigendrehung beider Nukleonen. Es gibt neben *anziehenden* auch *abstoßende Anteile*. Diese Abstoßung dominiert bei Abständen unter  $0,4 \cdot 10^{-15}$  m. Zwischen  $0,4 \cdot 10^{-15}$  m und  $2 \cdot 10^{-15}$  m erfolgt Anziehung, und bei noch größeren Abständen verschwindet die Kraft.

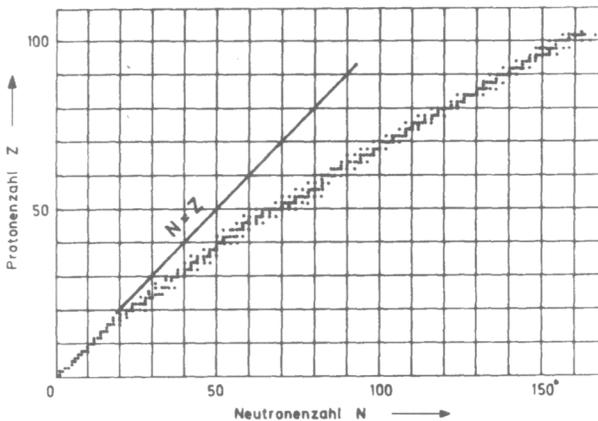
Die Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung ist ladungsunabhängig, d.h. n-n, n-p und p-p Paare üben die gleichen Kräfte aus, wenn sie sich vergleichbar bewegen.

Die Nukleon-Nukleon-Kraft ist verantwortlich für die Existenz von gebundenen Systemen aus mehreren Nukleonen, den Kernen. Der einfachste zusammengesetzte Kern besteht aus einem Neutron und einem Proton: dem Deuteron. Dieser Kern ist stabil, d.h. er kommt „in der Natur“ vor. Weitere stabile leichte Kerne sind zu finden bei

|              |                   |                          |
|--------------|-------------------|--------------------------|
| 3 Nukleonen: | ${}^3\text{He}$ : | 2 Protonen + 1 Neutron   |
| 4 Nukleonen: | ${}^4\text{He}$ : | 2 Protonen + 2 Neutronen |
| 5 Nukleonen: |                   | kein stabiler Kern       |
| 6 Nukleonen: | ${}^6\text{Li}$ : | 3 Protonen + 3 Neutronen |

Der nukleonreichste, in der Natur vorkommende Kern ist  $^{238}\text{U}$ , der aus 92 Protonen und 146 Neutronen besteht. Er hat einen Radius von  $8 \cdot 10^{-15}$  m verglichen mit  $0,8 \cdot 10^{-15}$  m für ein einzelnes Proton oder Neutron. Das Kernvolumen steigt im allgemeinen linear mit der Nukleonenzahl an, d.h. *die Dichte der Kernmaterie ist bei allen Kernen etwa die gleiche.*

Es ist eine interessante Tatsache, daß in erster Näherung die stabilen Kerne *etwa gleich viele Neutronen wie Protonen* enthalten, wie aus Bild 1.4a ersichtlich.



**Bild 1.4a:** Übersicht über die stabilen Kerne in Abhängigkeit von der Protonen- und Neutronenzahl: In erster Näherung enthalten die stabilen Kerne etwa gleich viele Neutronen wie Protonen. Bei den schweren Kernen ist ein geringer Neutronenüberschuß vorhanden, gewissermaßen als „Kitt“ für die abstoßenden Coulombkräfte, die mit zunehmender Protonenzahl stark anwachsen.

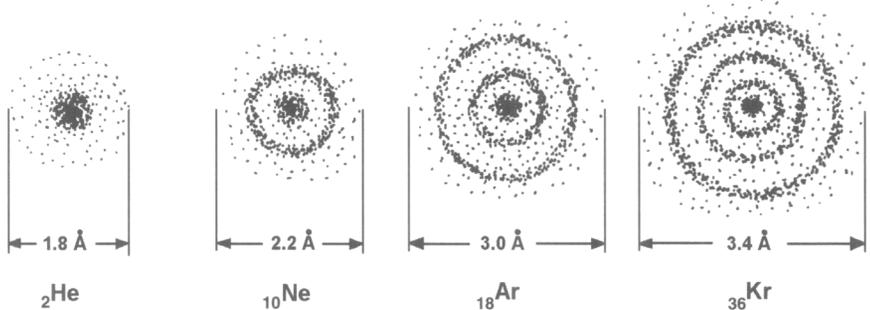
Wodurch wird nun die Zahl der Neutronen und Protonen, die stabile Kerne bilden, begrenzt? Bei den schwersten Kernen ist es die abstoßende Coulombkraft der Protonen, welche die anziehende starke Wechselwirkung übersteigt. Schwere Kerne neigen daher zum Zerfall unter Aussendung von  $^4\text{He}$ -Kernen ( $\alpha$ -Zerfall) oder sie spalten sich in zwei leichtere (spontane Kernspaltung). Warum aber kommt ein so kleiner Kern wie das 3-Nukleonensystem (Tritium), das nur aus 1 Proton und 2 Neutronen besteht, zum Zerfall?

Nach 12,35 Jahren hat sich die Hälfte der Tritiumkerne in  $^3\text{He}$ -Kerne (die aus 2 Protonen und 1 Neutron bestehen) umgewandelt. Die Ursache dieser Umwandlung von einem Neutron (des Tritiumkerns) in ein Proton (des  $^3\text{He}$ -Kerns) liegt in der sog. *schwachen Wechselwirkung*, wobei sich ein Neutron in ein Proton umwandelt unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos, weil dieser Endzustand energetisch günstiger ist (siehe den Abschnitt „Schwache Wechselwirkung“ weiter oben in diesem Kapitel).

### 1.3.2 Atome

Nach den oben diskutierten Elementarteilchen und Kernen sind die Atome die nächst einfachsten Bausteine der Materie, die auch erst die chemischen Eigenschaften definieren. Sie bestehen aus den schweren positiven Atomkernen, die von einer leichteren Hülle negativer Elektronen umgeben sind. Die geladenen Protonen der Kerne üben eine anziehende Kraft auf die Elektronen aus. Die Elektronen bewegen sich unter dem Einfluß der elektromagnetischen Wechselwirkung mit den Protonen und untereinander.

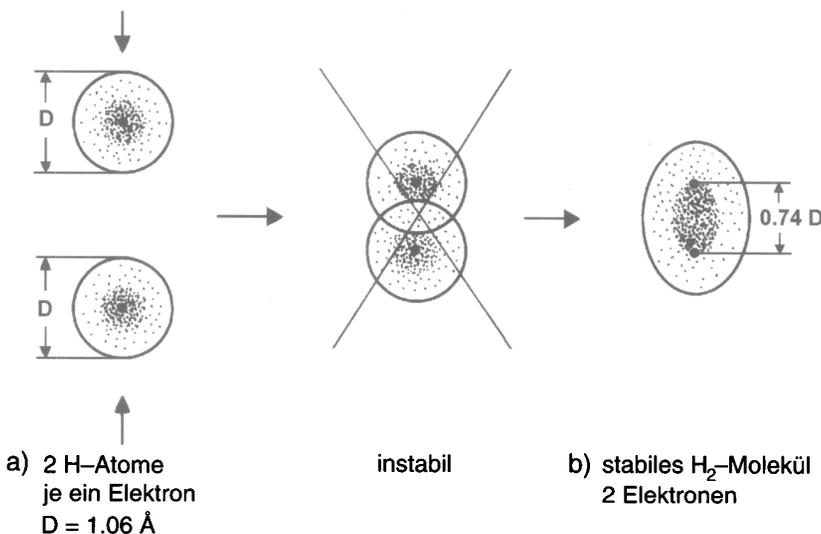
In einem normalen Atom ist die Zahl der Elektronen gleich der Protonenzahl. Wegen der exakten Gleichheit von Elektronen- und Protonenladung ist daher ein Atom normalerweise elektrisch völlig neutral und es übt auf ein Elektron, das sich in großer Entfernung relativ zur Ausdehnung des Atoms befindet, in erster Näherung keine elektrische Kraft aus: die anziehende Kraft der Protonen wird kompensiert von der gleich starken abstoßenden der Elektronen.



**Bild 1.4b:** Die Verteilung der Elektronen in einigen Edelgasatomen: Die Elektronen folgen keinen wohldefinierten „Planetenbahnen“. Die dunklen Bereiche deuten Orte mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Elektronen an ( $1 \text{ \AA} = 1 \text{ Angström} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$ )

Der Aufbau von Atomen sei am Beispiel einiger Edelgas-Atome in Bild 1.4b näher beschrieben: im Zentrum dieser Atome befinden sich für Helium 2, für Neon 10, für Argon 18 und für Krypton 36 Protonen (sowie die entsprechende zur Stabilität des Kernes erforderliche Anzahl von Neutronen). Um diese sind die Elektronen verteilt, deren Zahl genau der Protonenzahl im Kern entspricht. Wir werden später sehen, daß die Elektronen keinen wohldefinierten „Planetenbahnen“ folgen. Man kann in der Atomphysik nur angeben, wie wahrscheinlich es ist, ein Elektron in bestimmten Regionen aufzufinden. Demzufolge soll die Dichte der Punkte in Bild 1.4b nur die mittlere Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen andeuten. Die Durchmesser der Atome vergrößern sich von  $1,8 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  für Helium bis zu  $3,4 \cdot 10^{-10} \text{ m}$  für Krypton. In der Chemie nennt man die Zahl der Protonen

im Atom die *Ordnungszahl*. Im neutralen Atom stimmt sie mit der Zahl der Elektronen überein. Jede Ordnungszahl definiert ein chemisches *Element*. Bisher hat man 113 Elemente entdeckt und als solche eindeutig identifiziert. In noch unbestätigten Experimenten wurden Hinweise auf Kerne bis zum Element 118 gefunden. Ein Teil davon existiert allerdings nur für kurze Zeit im Laboratorium: Sie kommen in der Natur nicht vor, da sie instabile Kerne besitzen. Instabile schwere Kerne werden mittels Neutroneneinfangreaktion und folgenden  $\beta$ -Zerfällen oder im Fall der schwersten Elemente durch Verschmelzung zweier Kerne in einer „Kernverschmelzungsreaktion“ erzeugt. Das schwerste künstlich erzeugte Element mit der Ordnungszahl 112 wurde 1996 bei der GSI in Darmstadt, durch Verschmelzung von Zn-Kernen der Ordnungszahl 30, mit Blei-Kernen der Ordnungszahl 82 synthetisiert. (Näheres dazu bei: G. Münzenberg und M. Schädel: „Moderne Alchemie, die Jagd nach den schwersten Elementen“, Vieweg, 1996). Von den Chemikern werden alle Elemente in das von Mendelejew konzipierte Periodensystem (siehe Buchende) eingeordnet, welches die Elemente nach ihren periodisch wiederkehrenden ähnlichen chemischen Eigenschaften in Gruppen, wie z.B. die der Alkalimetalle oder der Edelgase, klassifiziert. Diese periodisch wiederkehrenden Eigenschaften werden, wie wir später sehen werden, nur von den äußersten Elektronen bestimmt.



**Bild 1.5:** Die homöopolare Bindung des Wasserstoffmoleküls: Nähern sich zwei Wasserstoffatome auf einen Abstand kleiner als ihr Durchmesser  $D$ , so durchdringen sich die Elektronenhüllen beider Atome. Diese Ladungsverteilung ist jedoch nicht stabil. Vielmehr verteilen sich die Elektronen so zwischen den Kernen, daß ein Gleichgewicht zwischen den elektrischen Kräften besteht: bei größerem Kernabstand treten anziehende, bei kleinerem Abstand abstoßende Kräfte zwischen den Kernen auf.

### 1.3.3 Moleküle

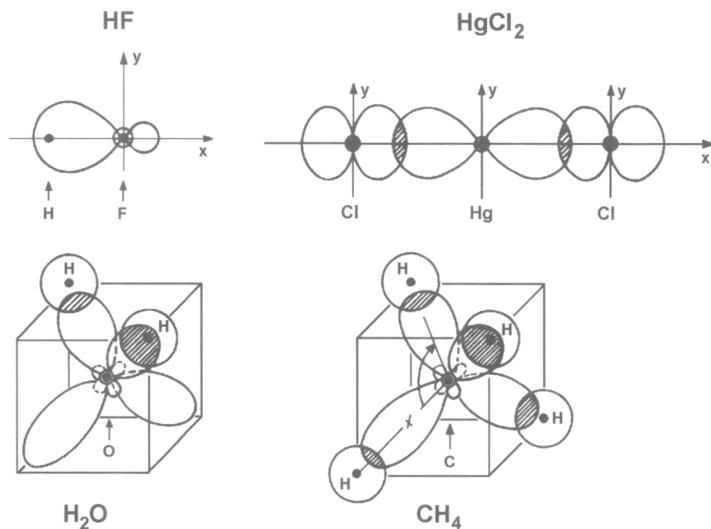
Homöopolare  
Bindung im  
Wasserstoff-  
Molekül

Zwischen den Atomen gibt es eine Reihe von Kräften, die zur stabilen Aneinanderreihung von Atomen in einem *Molekül* führen können. Diese bindenden Kräfte hängen mit den elektrischen Ladungen zusammen; die zwischen den Kernen liegende negative Elektronenladung ist verantwortlich für die Anziehung zwischen beiden positiven Kernen. Diese Art von *homöopolarer Bindung* zwischen Atomen ist besonders stark und gehört zu den wichtigsten chemischen Bindungen (siehe auch Bild 1.5).

Einige Moleküle bestehen nur aus wenigen Atomen wie HF, HgCl<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub>, deren Struktur schematisch in Bild 1.6 dargestellt ist. Während die inneren Elektronen mit den jeweiligen Atomen fest verbunden bleiben, verteilen sich die äußeren Elektronen neu zwischen den Atomen und veranlassen so – wie oben beschrieben – die chemische Bindung. Die Kernabstände im Molekül sind nicht als starr anzusehen: auch in Molekülen führen Atome Bewegungen aus, zum Beispiel Schwingungen um die Gleichgewichtslage.

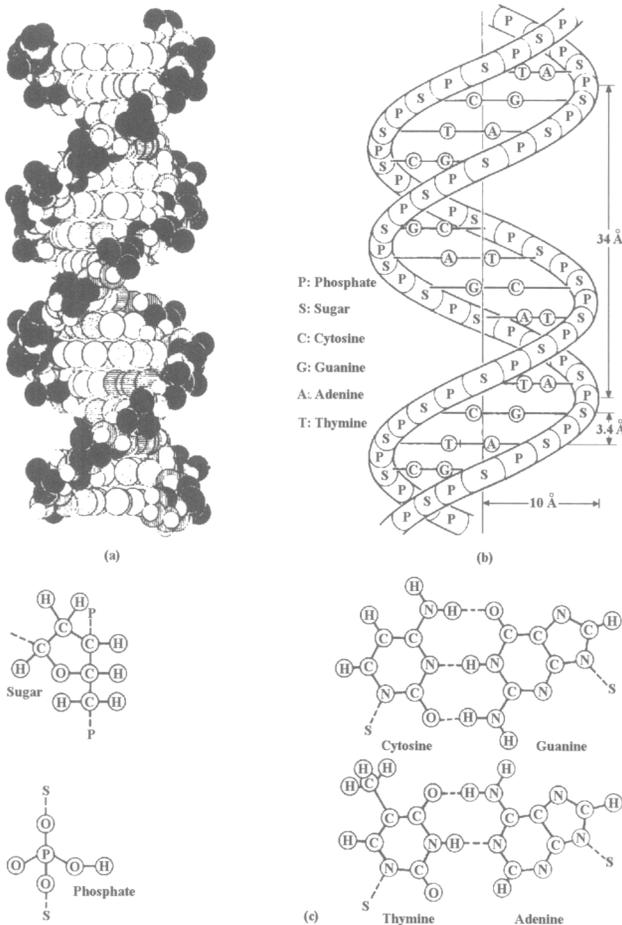
Kettenmoleküle,  
auch Polymere  
oder  
Makromoleküle  
genannt, sind die  
Basis aller  
Kunststoffe.

Andere Moleküle, insbesondere die biologisch wichtigen *Makromoleküle*,



**Bild 1.6:** Beispiele von einfach aufgebauten Molekülen: Während die inneren Elektronen (gekennzeichnet durch kleine Ringe) mit den jeweiligen Atomen fest verbunden bleiben, können sich die äußeren – mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit – im ganzen Molekül aufhalten. Meist beteiligen sich 2 Elektronen an einer Bindung, wobei ihre Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einer Region zwischen den Kernen am größten ist ( $\sigma$ -Bindung). Die Moleküle können sowohl gestreckt als auch gewinkelt sein mit genau bekannten Atomabständen (z.B. H–F:  $0,92 \cdot 10^{-10}$  m, Cl–Hg–Cl:  $2,30 \cdot 10^{-10}$  m) und Bindungswinkeln (z.B. H–O–H:  $104,5^\circ$ , CH<sub>4</sub>:  $109,5^\circ$ ). (Bildquelle: V. Gutmann und E. Hengge, Allgemeine und anorganische Chemie, Verlag Chemie, Weinheim, 1971)

können aus sehr *vielen* Atomen aufgebaut sein. Zum Beispiel enthält ein typisches Proteinmolekül, das Hämoglobin, welches für den Sauerstofftransport im Blut verantwortlich ist, vier Ketten von je 148 Aminosäuren und ist etwa 68 000 mal schwerer als ein Wasserstoffatom. Es gehört zu den erstaunlichen Leistungen der lebenden Zelle, daß sie in der Lage ist, so große Proteinmoleküle mit spezifischer Aminosäuresequenz ohne Fehler in einigen



**Bild 1.7:** Crick-Watson-Modell des DNS-Moleküls, des Trägers aller genetischen Informationen. Die Desoxyribonukleinsäure (DNS) ist eines der bestuntersuchten Riesenmoleküle. Röntgenbeugungsexperimente haben eine Doppelhelixstruktur gezeigt. Die beiden Helices sind verbunden durch Basenpaare A–T (Adenin–Thymin) oder C–G (Cytosin–Guanin) ähnlich den Sprossen einer Leiter. Jede Folge von 3 Basenpaaren (Sprossen) entspricht einer Informations-Einheit. Auf einem Faden von 1 m Länge lassen sich also über  $10^8$  Informationen oder Buchstaben unterbringen, d.h. derselbe Informationsgehalt wie eine Bibliothek von 500 Bänden. (Bildquelle: Alonso-Finn, Fundamental University Physics, Vol. 1, Addison Wesley Publishing Company, Reading, 1969, 1. Auflage)

Biomoleküle (wie z.B. Proteine) sind gefaltete Kettenmoleküle

Sekunden zu synthetisieren. Die gesamte Information zur Biosynthese dieser und vieler anderer Substanzen, welche die Zelle produziert, ist enthalten in einem DNS-Molekül (Deoxyribonukleinsäure). Bild 1.7 zeigt die berühmte Doppelhelixstruktur dieses Moleküls, welches in jeder menschlichen Zelle eine Länge von etwa 1 Meter besitzt, aber in einem Volumen von weniger als  $10^{-18} \text{ m}^3$  „verpackt“ ist. Die gesamte Information ist auf diesem langen Fadenmolekül durch die Sequenz von drei Basenpaaren (siehe Bild 1.7) analog zu einem Lochstreifen gespeichert<sup>9</sup>.

Die Zahl der bekannten Moleküle ist außerordentlich groß, und täglich werden neue Moleküle in den Laboratorien synthetisiert<sup>10</sup> oder in biologischen Substanzen entdeckt. Das Zusammenwirken vieler verschiedener Biomoleküle in jeder lebenden Zelle und die zielgerichtete Kooperation aller Zellen im Organismus ist erst teilweise verstanden. So besteht z.B. unser Gehirn aus  $10^{10}$  Nervenzellen (Neuronen), zwischen denen noch  $10^{13}$  Verknüpfungen bestehen. Die erstaunlichen Leistungen dieses komplexen Systems, zu denen auch unser „Geist“ und unser „Bewußtsein“ gehört, zu verstehen, ist wohl die interessanteste aber auch schwierigste Forschungsaufgabe der Zukunft. Hier berühren sich Natur- und Geisteswissenschaften.

Schließlich sei auch auf die rasch wachsende technische Bedeutung anderer Makromoleküle, der sog. hochpolymeren Verbindungen, hingewiesen. Die Produktion an hochpolymeren Kunststoffen übersteigt bereits seit einigen Jahren die Stahlproduktion.

### 1.3.4 Die Materie bei verschiedenen Temperaturen

Ein System von vielen gleichartigen Atomen oder Molekülen kann im *festen*, *flüssigen* oder *gasförmigen* Zustand vorliegen. Es ist primär die Wärmebewegung der Atome relativ zur Bindung, die mit der Temperatur ansteigt und die zu den verschiedenen Aggregatzuständen der Materie führt.

Alle festen Stoffe sind entweder kristallin geordnet oder amorph wie die Gläser

Unterhalb der sog. Schmelztemperatur liegt ein System von vielen Atomen in der Regel *in fester kristalliner oder amorpher Form* vor. Im Kristallgitter sind die Atome in räumlich periodischer Anordnung an Gleichgewichtslagen gebunden. Bei tiefen Temperaturen sind auch oft die äußeren Elektronen jedes Atoms an diesen Gitterpositionen lokalisiert und können sich nicht fortbewegen: ein solcher Kristall ist ein elektrisch nichtleitender *Isolator*. Bei einigen Kristallen jedoch, den sog. *Metallen*, ist die Bindung der äußeren

<sup>9</sup> Zur Geschichte der Entdeckung, siehe: Watson, J.D.: Die Doppelhelix, Rowohlt, Hamburg (1996)

<sup>10</sup> Ein besonders schönes Beispiel sind die von W. Krätschmer und D. Huffman 1990 synthetisierten Fußball-ähnlichen  $C_{60}$ -Moleküle mit einem sphärischen Netz von 60 Kohlenstoffatomen. Sie werden (nach dem Architekten B. Fuller Fullerene genannt (Näheres in Kap. 6).

Elektronen an das lokalisierte Atom zu schwach, und diese Elektronen können sich von einem Atom zum anderen bewegen: Metalle sind daher elektrisch leitend. Auch bei Isolatoren tritt bei erhöhten Temperaturen immer eine gewisse Leitung – die sog. *Halbleitung* – auf, weil die äußeren Elektronen aufgrund der erhöhten thermischen Bewegung doch die Bindung an „ihr“ Atom teilweise überwinden können. Auf diese technisch bedeutenden Prozesse der Elektronenleitung in festen Körpern werden wir in PHYSIK II ausführlicher zurückkommen.

Nach dem elektrischen Leitvermögen unterscheidet man Metalle, Halbleiter und Isolatoren

Im *festen Zustand*, z.B. im Kristall, kann jedes Atom um die Gitterposition, an die es gebunden ist, schwingen. Je höher die Temperatur, desto größer wird die thermische Schwingungsamplitude der Atome. Bei der Schmelztemperatur erreicht nun diese thermische Schwingungsamplitude etwa 10 Prozent des interatomaren Abstands. Der Kristall schmilzt, weil die Atome bei so großen Amplituden nicht mehr fest an den Gitterplatz gebunden sind, sondern sich in dem Medium, das nunmehr zur *Flüssigkeit* geworden ist, mehr oder weniger frei von Platz zu Platz bewegen können. Beim Phasenübergang vom festen in den flüssigen Zustand ändern sich die interatomaren Abstände nur wenig: Jedes Atom bewegt sich aufgrund seiner Wärmebewegung nach wie vor im Kraftfeld der Nachbaratome; zum Beispiel an der Flüssigkeitsoberfläche wird jedes Atom von den anziehenden Kräften der Nachbaratome festgehalten. Daher können von der Flüssigkeitsoberfläche nur die Atome entweichen, deren thermische Geschwindigkeit groß genug ist, um die attraktiven Kräfte der anderen zu überwinden. Dieser Vorgang heißt *Verdampfung*. Da nur die schnellsten Atome verdampfen, bleiben in der Flüssigkeit die langsameren zurück. Die Flüssigkeit kühlt sich daher beim Verdampfen ab.

Lindemann-Regel für die Schmelztemperatur

In der *Gasphase* oberhalb der Flüssigkeit ist die mittlere Zahl der Atome pro Volumeneinheit sehr viel kleiner als in den kondensierten Phasen (fest und flüssig). Dadurch ist auch der mittlere interatomare Abstand groß verglichen mit der Reichweite der Kräfte zwischen ihnen. Die Teilchen bewegen sich in Gasen im wesentlichen frei. Nur manchmal kommen sie sich so nahe, daß sie im Stoß ihren Bewegungszustand ändern. Ihre charakteristische mittlere Geschwindigkeit steigt mit wachsender Temperatur an. Schließt man ein Gas zum Beispiel in den Zylinder eines Motors ein, so stoßen die Teilchen gegen die Zylinderwände sowie den Kolben und üben einen Druck auf den Kolben aus, der um so stärker ist, je höher die Gastemperatur ist. Zwischen dem Druck und der Temperatur besteht eine sehr einfache Beziehung (der Druck nimmt linear mit der Temperatur zu), worauf wir weiter unten in diesem Band bei der Diskussion der Wärme zurückkommen werden.

Gase

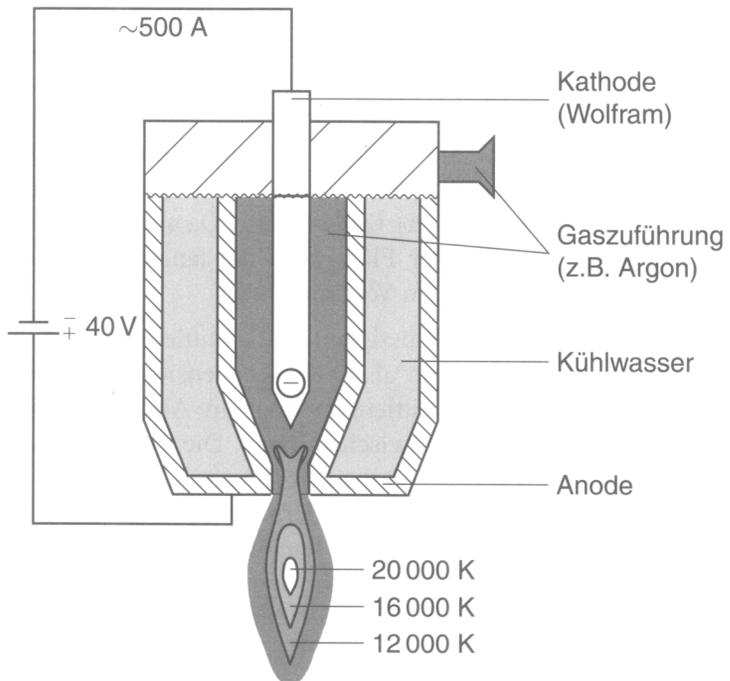
Erhöht man die Temperatur und damit die Geschwindigkeit der Atome im Gas noch erheblich weiter, so kann bei den heftigen Stößen zwischen zwei

## Plasmen

Atomen sogar zuweilen ein Elektron von seinem Atom losgerissen werden, wobei neben dem freien Elektron ein positiv geladenes Ion zurückbleibt. Ein Gas, in welchem viele Atome derart in Elektronen und Ionen aufgespalten sind, nennt man ein *Plasma*. Eine solche Aufspaltung tritt wegen der hohen Temperaturen ( $10^7$  K) zum Beispiel im Inneren leuchtender Sterne auf.

## Kernfusion

Seit etwa 25 Jahren versucht man in vielen Laboratorien der Welt, ein räumlich begrenztes Wasserstoffplasma stabil auf ähnlich hohe Temperaturen zu heizen, um den Prozeß der *Kernfusion*, der den Sternen ihre Energie liefert, auch auf der Erde in kontrollierter Weise in Gang zu bringen und zur Energiegewinnung zu nutzen. Wenn auch dieses Ziel bisher noch nicht erreicht werden konnte, so hat doch der Weg dahin zu vielen neuen Erkenntnissen über das Plasma und nicht zuletzt zu einer großen Entwicklung der Experimentierkunst im Umgang mit heißen Plasmen geführt. Im November 1991 ist es den Forschern am Joint European Torus (Jet) in Culham bei Oxford erstmals gelungen, ein aus Deuterium und Tritium bestehendes Wasserstoffplasma so stark aufzuheizen (über 50 Milliarden K), daß es kurzzeitig



**Bild 1.8:** Plasmaprenner: Im Inneren des Plasmagenerators brennt eine elektrische Entladung und heizt das durchströmende Gas auf. Der emittierte Plasmastrahl erreicht außen Dauertemperaturen bis  $20\,000$  K. Der Plasmaprenner wird u.a. verwendet zum Schmelzen, Schweißen und Schneiden von hochschmelzenden Materialien wie Wolfram und Titan. (Bildquelle: G. Hertz und R. Rompe, Einführung in die Plasmaphysik und ihre technische Anwendung, Akademie-Verlag, Berlin, 1968)

zu einer kontrollierten Kernfusion kam. Derzeit wird der Bau eines ersten thermonuklearen Reaktors (ITER) vorbereitet.

Als praktisches Beispiel sei der elektrisch geheizte *Plasmabrenner* (1920 von Gerdien in Deutschland erfunden) erwähnt, mit dem man heutzutage kontinuierlich Temperaturen von fast 20 000 K zur Materialbearbeitung einsetzen kann. (Siehe Bild 1.8).

## 1.4 Grundkonzepte physikalischer Naturbeschreibung

Bisher haben wir versucht, eine qualitative Übersicht über die existierenden Teilchen und ihre Wechselwirkung sowie über die Zustandsformen der uns umgebenden Materie zu geben. Jetzt wollen wir eine neue wichtige Frage stellen: *Wie bewegt sich ein Teilchen unter dem Einfluß der Wechselwirkungen?* Welches zum Beispiel ist die Bahn einer Mondrakete unter dem Einfluß der Gravitation, oder wie bewegen sich die Nukleonen im Kern aufgrund der starken Wechselwirkung?

Der erste Versuch einer Beantwortung dieser wichtigen Frage nach dem Bewegungsablauf unter dem Einfluß einer Kraft wurde von Newton 1687 unternommen. Die *Newtonsche Gleichung*, welche zur Grundlage der *klassischen Mechanik* gehört, gibt zum Beispiel den Zusammenhang zwischen einer Bewegungsgröße (der bald einzuführenden Beschleunigung) und der Kraft wieder. Diese Gleichungen waren zunächst empirische Formulierungen von unmittelbar beobachteten Größen, später zeigte sich, daß sie sich aus wesentlich allgemeiner gültigen Invarianzprinzipien, so zum Beispiel der Erhaltung von Energie und Impuls, herleiten lassen. (Wir haben bereits weiter oben von der Erhaltung der Ladung beim Zerfall von Elementarteilchen gesprochen und werden noch andere Erhaltungsgesetze kennenlernen.)

Der Anwendungsbereich der klassischen Mechanik ist groß: Durch sie wurde es erstmals möglich, die Bewegung der Planeten am Himmel und aller Objekte auf der Erde unter dem Einfluß der Gravitation richtig zu beschreiben. Auch die Wirkungsweise mechanischer Maschinen, die Rotation und Schwingungen ausgedehnter Objekte, die Kinematik bei Stoßprozessen großer Massen und viele andere Erscheinungen, sogar aus dem Gebiet der Thermodynamik, fanden in der klassischen Mechanik eine befriedigende Erklärung.

So groß die Anfangserfolge der klassischen Mechanik auch waren, so war ihr Anwendungsbereich doch – wie sich erst in diesem Jahrhundert zeigte – durchaus beschränkt. Insbesondere stellte sich heraus, daß die Newtonschen Gleichungen außerhalb des Bereiches der Erfahrungen, aus denen

*Mechanik ist das Studium der Bewegung unter der Wirkung von Kräften.*

*Anwendungen der klassischen Mechanik u.a. in Astronomie, Maschinenbau, Wärmelehre*

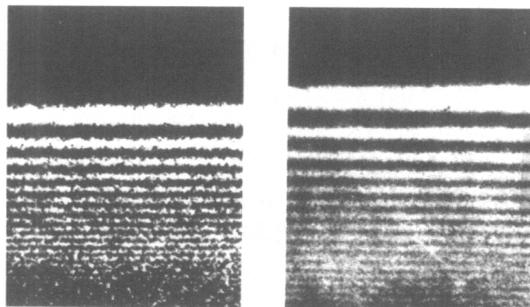
Klassische Mechanik nur gültig für kleine Geschwindigkeiten  $v$ , kleiner als die Lichtgeschwindigkeit

sie ursprünglich gewonnen wurden, nicht mehr gültig sind. Zum Beispiel kommt die klassische Mechanik zu völlig falschen Vorhersagen, wenn man sie auf die *Bewegung mit großen Geschwindigkeiten* (nahe der Lichtgeschwindigkeit) oder auf die *Bewegung in mikroskopischen Dimensionen* (wie die Elektronenbewegung im Atom) anwendet. Die klassische Mechanik bedarf im Gebiet hoher Geschwindigkeiten der Ergänzung durch die *Relativitätstheorie* und im Bereich atomarer Dimensionen durch die *Quantentheorie*. Beides sei noch ein wenig erläutert.

Die Newtonsche Mechanik benutzte ein *Konzept von Raum und Zeit*, nach dem die Zeit nicht vom Bezugssystem abhängt. Insbesondere sollte demnach eine ruhende und eine bewegte Uhr dieselbe absolute Zeit anzeigen. Dieser Zeitbegriff ist, wie wir seit Anfang des vergangenen Jahrhunderts wissen, falsch, so einleuchtend er zunächst auch erscheint: Es ist inzwischen experimentell erwiesen, daß bei einer Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Uhren die eine schneller läuft als die andere. Dies wurde zuerst 1905 von Einstein vorhergesagt. Die erstaunlichen Konsequenzen seiner *Relativitätstheorie* machen sich besonders bei hohen Geschwindigkeiten bemerkbar: Kein Körper kann sich zum Beispiel schneller bewegen als mit Lichtgeschwindigkeit, und bei der Annäherung an die Lichtgeschwindigkeit wird seine Masse unendlich groß. Beides steht im Widerspruch zur klassischen Mechanik, die demnach nur bei sehr viel kleineren Geschwindigkeiten gültig bleibt. (Die Relativitätstheorie wird in PHYSIK II ausführlich behandelt. Wir wollen daher hier nicht weiter darauf eingehen.)

Die andere Grenze für die Gültigkeit der Newtonschen Mechanik liegt in der Bewegung kleiner Massen in kleinen Dimensionen, wie schon oben angedeutet. Zum Beispiel können wir mit der klassischen Mechanik nicht

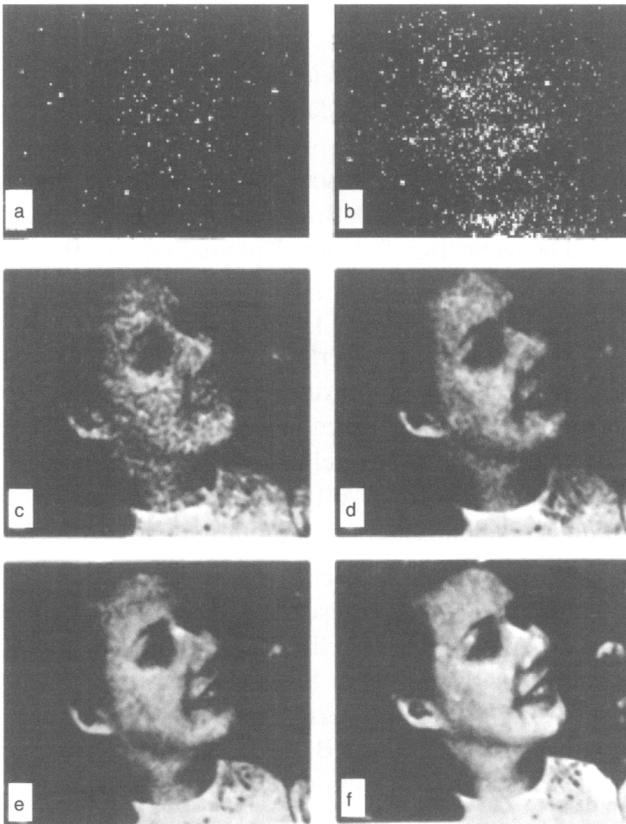
Die klassische Mechanik wird ungültig bei der Bewegung sehr kleiner Objekte (z.B. von Atomen).



**Bild 1.9:** Beugung von Lichtwellen und Elektronen an einer Kante. Das bekannte Beugungsbild von Lichtwellen (linkes Bild) wird verglichen mit dem Resultat eines Experiments, in dem Elektronen hinter einer Kristallkante beobachtet wurden. Die so entstandene Elektronenaufnahme ist rechts vergrößert wiedergegeben, um die gleiche Struktur beider Bilder deutlich zu machen. (Bildquelle: A.P. French, A.M. Hudson, Physics-A New Introductory Course, MIT 1965, Science Teaching Center, Massachusetts Institute of Technology)

die Bewegung der Nukleonen im Kern beschreiben, selbst wenn uns die Kraftgesetze der starken Wechselwirkung wohl bekannt wären. Genauso wenig ist auch die Bewegung der Elektronen im Atom oder die chemische Bindung zwischen Atomen mit Hilfe der klassischen Mechanik zu verstehen. Ähnliches gilt für die Bewegung der Atome im Festkörper sowie die Lichtemission von Atomen. Wir fassen zusammen: Keine der wesentlichen Fragen im Zusammenhang mit der mikroskopischen Struktur der Materie ist beantwortbar mit den Gesetzen der klassischen Mechanik.

Wie bewegen sich nun die Elektronen in einem Atom, wenn nicht nach den Gesetzen der Newtonschen Mechanik? Zur Beantwortung dieser Frage sind eine Reihe von grundlegenden Experimenten von J. Davisson und L.H. Germer wichtig, die 1927 zum ersten Mal deutlich zeigten, daß sich überraschenderweise Teilchen (z.B. Elektronen) in Bewegung genauso ver-



**Bild 1.10:** Photographie eines Mädchens mit variabler Belichtungszeit. Die Struktur der Bilder zeigt deutlich die granulare Eigenschaft der Lichtwellen. Die Zahl der Photonen wächst stetig von  $10^3$  im ersten Bild bis zu  $10^7$  im letzten. (Bildquelle: A. Rose, *Advances in Biology and Med. Phys.*, 5, 211, (1957))

halten wie laufende Wellen. Dies entsprach genau der von L. de Broglie 1924 formulierten Hypothese. Seitdem steht aufgrund vieler neuer Beobachtungen allgemein fest: *Teilchen verhalten sich wie Wellen und Wellen wie Teilchen*. Wir wollen zwei solcher Beobachtungen hier anführen: Im ersten Experiment (siehe Bild 1.9) wollen wir ein Phänomen beschreiben, das mit Teilchen (nämlich mit Elektronen) hervorgebracht wurde, und in dem man deutlich eine Wellenerscheinung sieht. Im zweiten Versuch (Bild 1.10) wollen wir zeigen, daß umgekehrt auch elektromagnetische Lichtwellen sich wie Teilchen verhalten. Dieser gleichzeitig beobachtete Wellen- und Teilchencharakter der Materie bildet die Grundlage der sog. *Wellenmechanik* oder *Quantenmechanik*, deren Entwicklung u.a. durch Born, Heisenberg und Schrödinger zu den großartigen Höhepunkten der Physik in unserem Jahrhundert gehört. Dies wird ausführlich im 3. Band dieser Serie (Zinth/Körner: *PHYSIK III, Teil B*) diskutiert.

Nach diesen neuen Erkenntnissen der Quantenmechanik ist mit jeder Bewegung eines Teilchens, z.B. eines Atoms, eine Welle verbunden, deren Wellenlänge (die sog. *deBroglie-Wellenlänge*) mit sinkender Teilchengeschwindigkeit anwächst. Kühlt man daher eine atomare Flüssigkeit oder ein atomares Gas immer weiter ab, was die Teilchengeschwindigkeit verlangsamt, so wird schließlich eine kritische Temperatur (die sog. *Entartungstemperatur*) erreicht, bei der die deBroglie-Wellenlänge genauso groß wird wie der Abstand benachbarter Teilchen. Unterhalb dieser Entartungstemperatur zeigen Flüssigkeiten und Gase ganz neuartige Quanteneigenschaften. Flüssiges  $^4\text{He}$  wird z.B. aus diesem Grund unterhalb von 2,18 K (entsprechend etwa  $-271^\circ\text{C}$ ) plötzlich superfluid. Dieser Phasenübergang, der für Atome mit ganzzahligem Spin auftritt, heißt Bose-Einstein-Kondensation und wurde vor kurzem auch in Gasen beobachtet, allerdings dem größeren Teilchenabstand entsprechend bei viel tieferen Temperaturen. (Hierzu siehe *PHYSIK IV, Abschnitt 15.4* und Wolfgang Ketterle: *Bose Einstein Condensation* in [http://cna.mit.edu/Ketterle\\_group/introduction\\_to\\_BEC.htm](http://cna.mit.edu/Ketterle_group/introduction_to_BEC.htm).)

Der Wellencharakter der Materie macht sich bei Raumtemperatur allerdings erst bei Bewegungen in mikroskopischen Dimensionen, die so klein sind wie die Wellenlängen der Materiewellen (Abstand benachbarter Wellenberge) entscheidend bemerkbar. Da so kleine Dimensionen unserer direkten Anschauung nicht zugänglich sind, erscheinen uns auch die quantenmechanischen Gesetze, nach denen sich z.B. ein Elektron im Atom bewegt, ganz „unnatürlich“. Dies wollen wir an einigen Beispielen erläutern:

Zuerst müssen wir uns von der gewohnten Vorstellung trennen, die Elektronen hätten an jedem Ort im Atom eine bestimmte Geschwindigkeit. Dies kann im Mikroskopischen *nicht* aufrecht erhalten werden. Nach einer Grundregel der Quantenmechanik kann man nämlich *grundsätzlich* nicht

gleichzeitig den Ort *und* die Geschwindigkeit der Elektronen genau messen. Vielmehr wird nach der sog. *Heisenbergschen Unschärferelation* die Unschärfe der Ortsbestimmung ( $\Delta x$ ) umso größer, je kleiner die Unschärfe der Geschwindigkeit ( $\Delta v$ ) ist:

$$\Delta x \cdot \Delta v_x = \text{const.}$$

### Heisenbergs Unschärferelation

Die Konsequenz dieser neuartigen quantenmechanischen Regel besteht darin, daß man in atomaren Dimensionen dem Elektron keine scharfe Geschwindigkeit und damit auch keine feste Bahn mehr zuordnen kann.

Als Anwendung der Unschärferelation wollen wir versuchen, zunächst eine überraschende Eigenschaft des Atoms, nämlich seine Größe, zu erklären. *Warum hat die Elektronenhülle eines H-Atoms einen Durchmesser von etwa  $10^{-10}$  m, obwohl der Kern um fast fünf Größenordnungen kleiner ist?* Im Rahmen der klassischen Mechanik sollte man erwarten, daß in der stabilsten Anordnung alle Elektronen durch die Coulombkraft in das Kerninnere gezogen würden. Wenn die Elektronen sich nur im Kern befinden würden, wäre aber ihr Ort sehr genau lokalisierbar. Entsprechend der oben genannten quantenmechanischen Regel müßten sie eine große Unschärfe in der Geschwindigkeit besitzen. Es würden also große Geschwindigkeiten vorkommen, die es den Elektronen ermöglichen würden, die Coulombkraft im Kerninneren zu überwinden und zu entweichen. Anstelle dessen gehen die Elektronen einen Kompromiß ein: sie nehmen zwar einen größeren Raum ein und bewegen sich dafür aber mit einer kleineren mittleren Geschwindigkeit. So bleiben sie also an den Kern gebunden, aber in relativ großem Abstand.

In diesem Zusammenhang sei auch erwähnt, daß die Atome sich in einem Kristall auch am absoluten Nullpunkt der Temperatur noch bewegen. Warum? Nun, wenn sie ruhen würden ( $\Delta v = 0$ ), müßten sie nach der Unschärferelation einen unendlich großen Platz zur Verfügung haben ( $\Delta x = \infty$ ). Da ihr Spielraum aber durch die Nachbarn beschränkt ist, bleiben sie selbst bei  $T = 0$  noch in Bewegung (*Nullpunktsbewegung*).

Im folgenden sei auch noch ein anderes wichtiges Prinzip der Quantenmechanik erwähnt, das die Erkenntnistheorie und Philosophie der Naturwissenschaften drastisch verändert hat. Quantenmechanisch gilt nämlich folgendes: Es ist – genau genommen – *nicht möglich, vorauszusagen, was sich an einem definierten Ort zu einer bestimmten Zeit ereignen wird*. Betrachten wir zum Beispiel einen Tritiumkern, der instabil ist und in  ${}^3\text{He}$ , ein Elektron und ein Antineutrino zerfallen muß. Wir können den Zerfall durch das Auftreten eines Elektrons in einem Zählrohr nachweisen. Wenn wir aber einen bestimmten Tritiumkern betrachten, können wir grundsätzlich nicht voraus-sagen, *wann* der Zerfall erfolgen wird, d.h. wann wir das dabei entstehende

*Für die Bewegung kleiner Teilchen gilt Heisenbergs Unschärferelation. Sie ist eine Folge des Wellencharakters der Materie*

*Endliche Nullpunktsenergie von Atomen selbst bei  $T = 0$*

*Vorhersagbarkeit und Kausalität von Mikroprozessen wird von der Quantenmechanik in Frage gestellt.*

Elektron im Zählrohr nachweisen werden. Oder, wenn wir viele Kerne betrachten, können wir nur voraussagen, wie viele Tritiumkerne im Mittel in einem gewissen Zeitintervall zerfallen werden. Wenn wir die Zerfälle pro Sekunde wirklich genau messen, können es manchmal weniger oder mehr sein. Wir beobachten im statistischen Ticken des Zählrohres Schwankungen der Zählrate nach den Gesetzen der Statistik um den Mittelwert. Die unvermeidbare Beeinflussung des Zerfallsprozesses durch den Meßprozeß führt dazu, daß es prinzipiell unmöglich ist, eine genaue Voraussage zu machen, was bei einem *einzelnen* Experiment genau passieren wird. Wir können somit im Mikroskopischen nur *statistische* Aussagen machen.

Die Quantenmechanik bringt auch eine neue Beschreibung der elektromagnetischen Wechselwirkung: Eine elektromagnetische Welle kann nämlich auch als Teilchen angesehen werden. Dieses Teilchen nennt man ein *Photon*. Das Photon breitet sich wie das Feld der ihm zugeordneten Welle mit Lichtgeschwindigkeit im Raum aus.

Da die Quantenmechanik so wichtig ist für die Beschreibung der Materie im kleinen, werden wir im Laufe dieses Kurses schon relativ früh quantenmechanische Phänomene kennenlernen, um so möglichst bald eine Grundlage zum Verständnis der mikroskopischen Struktur der Materie und für die quantenmechanischen Gesetzmäßigkeiten zu gewinnen.

## Literaturhinweise zu Kapitel 1

### ***Zur geschichtlichen Entwicklung:***

Fermi, Laura: *Atoms in the family, my life with Enrico Fermi*, Chicago, Univ. Press (1995).

Einstein, A. und Infeld, L.: *Die Evolution der Physik, von Newton zur Quantentheorie*, Rowohlt, Bd. 12, Hamburg (1956).

Dirac, P.A.M.: *The Evolution of the Physicist's Picture of Nature*, Scientific American 208, May (1963).

Samburski, Shmuel: *Der Weg der Physik, 2500 Jahre physikalischen Denkens, Originaltexte von Anaximander bis Pauli*, Artemis-Verlag (1986).

Hermann, A.: *Die Jahrhundertwissenschaft, Werner Heisenberg und die Physik seiner Zeit*, Deutsche Verlagsanstalt (1977).

Teichmann, J.: *Wandel des Weltbildes, Astronomie, Physik und Meßtechnik in der Kulturgeschichte*, Rohwolt Taschenbuch Verlag (1985).

Hermann, A.: *Einstein*, Piper-Verlag (2004).

Westfall, R.: *Isaac Newton, eine Biographie*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1996).

Segré, E.: Die großen Physiker und ihre Entdeckungen, von den fallenden Körpern zu den Quarks, Piper-Verlag, München (1997).

Bürke, Th.: Newtons Apfel, Sternstunden der Physik von Galilei bis Lise Meitner, Beck-Verlag, München (1997)

Pais, A.: Ich vertraue auf Intuition: Der andere Albert Einstein, Spektrum Verlag, Taschenbuch (1998).

### **Zur Astronomie gestern und heute:**

Hamel, J.: Nicolaus Copernicus, Eine Biographie, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (2002).

Kippenhahn, R.: 100 Milliarden Sonnen, Geburt – Leben – und Tod der Sterne, Piper Verlag (1993).

Unsöld, A. und Baschek, B.: Der neue Kosmos, Springer Verlag (2004).

Friedmann, H.: Die Sonne aus der Perspektive der Erde, Spektrum der Wissenschaft, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1987).

Kippenhahn, R.: Unheimliche Welten, Planeten, Monde und Kometen, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart (1987).

Hawking, St.W.: Eine kurze Geschichte der Zeit, die Suche nach der Urkraft des Universums, Rowohlt Verlag (1998).

Kippenhahn, R.: Licht vom Rande der Welt, das Universum und sein Anfang, Piper Verlag (1989).

Kippenhahn, R.: Der Stern von dem wir leben, den Geheimnissen der Sonne auf der Spur, Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart (1990).

Hornung, H.: Safari ins Reich der Sterne, Verlag Oetinger, Hamburg (1992).

Lyne, A.G.: Pulsare, Johann Ambrosius Barth Verlag (1993).

### **Zu den Elementarteilchen:**

Weinberg, St.: Die ersten drei Minuten; der Ursprung des Universums, Piper-Verlag (1997).

Fritzsch, H.: Quarks, Urstoff unserer Welt, Piper-Verlag, Taschenbuch (2001).

Weinberg, S.: Teile des Unteilbaren, Spektrum der Wissenschaft, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1984).

Teilchen, Felder und Symmetrien; Spektrum der Wissenschaft, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1984).

Höfling, Oskar und Waloschek, Pedro: Die Welt der kleinsten Teilchen, Rowohlt Verlag (1984).

Elementare Materie, Vakuum und Felder; Spektrum der Wissenschafts, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg (1986).