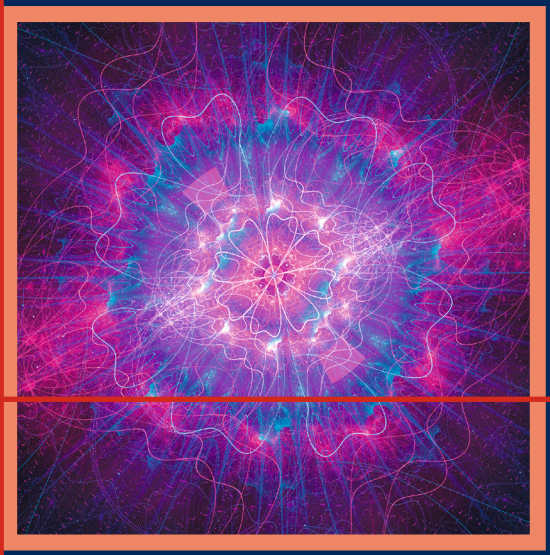
Horst Kuchling

# Taschenbuch der PHYSIK



22. Auflage

HANSER

## SI-EINHEITEN mit besonderem Namen

| Einheit | Zeichen | Beziehung | Einheit für |
|---|---|---|---|
| Ampere | A | Basiseinheit | elektr. Stromstärke |
| Becquerel | Bq | $= 1/\mathrm{s}$ | Aktivität |
| Candela | cd | Basiseinheit | Lichtstärke |
| Coulomb | C | $= \mathrm{A} \cdot \mathrm{s}$ | elektr. Ladung |
| Farad | F | $= \mathrm{C/V} = \mathrm{A} \cdot \mathrm{s/V}$ | elektr. Kapazität |
| Grad Celsius | °C | $= T - 273{,}15\ \mathrm{K}$ | Temperatur |
| Gray | Gy | $= \mathrm{J/kg}$ | Energiedosis |
| Henry | H | $= \mathrm{Wb/A} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{s/A}$ | Induktivität |
| Hertz | Hz | $= 1/\mathrm{s}$ | Frequenz |
| Joule | J | $= \mathrm{N} \cdot \mathrm{m} = \mathrm{W} \cdot \mathrm{s}$ | Energie, Arbeit, Wärmemenge |
| Kelvin | K | Basiseinheit | Temperatur, absolute |
| Kilogramm | kg | Basiseinheit | Masse |
| Lumen | lm | $= \mathrm{cd} \cdot \mathrm{sr}$ | Lichtstrom |
| Lux | lx | $= \mathrm{lm/m^2}$ | Beleuchtungsstärke |
| Meter | m | Basiseinheit | Länge |
| Mol | mol | Basiseinheit | Stoffmenge |
| Newton | N | $= \mathrm{kg} \cdot \mathrm{m/s^2}$ | Kraft |
| Ohm | Ω | $= \mathrm{V/A}$ | elektr. Widerstand |
| Pascal | Pa | $= \mathrm{N/m^2}$ | Druck, Spannung |
| Radiant | rad | $= \mathrm{m/m} = 1$ | ebener Winkel |
| Sekunde | s | Basiseinheit | Zeit |
| Siemens | S | $= 1/\Omega = \mathrm{A/V}$ | elektr. Leitwert |
| Sievert | Sv | $= \mathrm{J/kg}$ | Äquivalentdosis |
| Steradiant | sr | $= \mathrm{m^2/m^2} = 1$ | Raumwinkel |
| Tesla | T | $= \mathrm{Wb/m^2} = \mathrm{V} \cdot \mathrm{s/m^2}$ | magn. Flussdichte |
| Volt | V | $= \mathrm{W/A}$ | elektr. Spannung |
| Watt | W | $= \mathrm{J/s}$ | Leistung |
| Weber | Wb | $= \mathrm{V} \cdot \mathrm{s}$ | magnetischer Fluss |

## SI-VORSÄTZE für dezimale Vielfache und Teile

| Deka | Hekto | Kilo | Mega | Giga | Tera | Peta | Exa | Zetta | Yotta |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| da | h | k | M | G | T | P | E | Z | Y |
| 10 | $10^2$ | $10^3$ | $10^6$ | $10^9$ | $10^{12}$ | $10^{15}$ | $10^{18}$ | $10^{21}$ | $10^{24}$ |
| $10^{-1}$ | $10^{-2}$ | $10^{-3}$ | $10^{-6}$ | $10^{-9}$ | $10^{-12}$ | $10^{-15}$ | $10^{-18}$ | $10^{-21}$ | $10^{-24}$ |
| d | c | m | µ | n | p | f | a | z | y |
| Dezi | Zenti | Milli | Mikro | Nano | Piko | Femto | Atto | Zepto | Yokto |

| | | |
|---|---|---|
| INHALTSVERZEICHNIS | ⇨ Seite 11 | I |
| GRÖSSEN UND EINHEITEN | ⇨ Seite 28 | G |
| MECHANIK | ⇨ Seite 53 | M |
| WÄRMELEHRE | ⇨ Seite 244 | W |
| AKUSTIK | ⇨ Seite 336 | A |
| OPTIK | ⇨ Seite 363 | O |
| ELEKTRIK | ⇨ Seite 419 | E |
| ATOM- UND KERNPHYSIK | ⇨ Seite 540 | K |
| RELATIVISTISCHE MECHANIK | ⇨ Seite 598 | R |
| FEHLERRECHNUNG | ⇨ Seite 608 | F |
| TABELLEN | ⇨ Seite 617 | T |
| SACHWORTVERZEICHNIS | ⇨ Seite 694 | S |

Horst Kuchling

# Taschenbuch der Physik



**Bleiben Sie auf dem Laufenden!**

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

**www.hanser-fachbuch.de/newsletter**

Horst Kuchling

# Taschenbuch der Physik

22., aktualisierte Auflage

bearbeitet von Dr. Thomas Kuchling

HANSER

**Autor:**
Horst Kuchling, Oberstudienrat i.R.
**Bearbeiter:**
Dr. Thomas Kuchling




Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht. Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, sind vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München;
Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg
Herstellung: Frauke Schafft
Satz: Eberl & Kœsel Studio GmbH
Titelbild: shutterstock.com/sakkmesterke
Covergestaltung: Max Kostopoulos
Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München
Druck und Binden: Eberl & Kœsel GmbH, Altusried-Krugzell
Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47274-7
E-Book-ISBN: 978-3-446-47364-5

# VORWORT

Von diesem sehr erfolgreichen „Taschenbuch der Physik“ wurden bis heute in verschiedenen Sprachen insgesamt mehr als **70 Auflagen** gedruckt.

Das Buch entstand vor etwa **50 Jahren** als „Nachschlagebuch für das Grundlagenfach Physik“, sollte Schülern und Studenten eine Hilfe bei der Ausbildung sein und später im Beruf zum Nachschlagen dienen.

Ständig aktualisiert, verbessert und erweitert wurde es so zu einem **Standardwerk** für Lernende aller Altersstufen und Fachrichtungen. Es informiert präzis und verständlich über alle Teilgebiete der Physik. An vielen Hoch- und Fachhochschulen sowie Gymnasien wird es empfohlen; in der beruflichen Praxis ist es bekannt und eingeführt.

Dieses Taschenbuch

- **hilft** Studenten und Schülern beim Erarbeiten und Wiederholen des Stoffes;
- ist **unentbehrlich** bei der Vorbereitung auf Klausuren und Prüfungen;
- **nützt** im Beruf bei der Auffrischung früher erworbenen Wissens;
- **informiert** zuverlässig über Einheiten, Naturkonstanten und Materialwerte;
- **ersetzt** kein Lehrbuch; denn quantitativ nicht erfassbare, also nur beschreibende Fakten sind nicht oder nur stichwortartig dargestellt;
- **ist viel mehr** als eine Formelsammlung, denn es enthält alle wichtigen Formeln und Gesetze, erläutert ihre Anwendung und gibt Hinweise auf Einheiten und Gültigkeitsgrenzen;
- **eignet** sich auch für Benutzer mit geringeren mathematischen Kenntnissen;
- **enthält** mehr als 500 den Text erläuternde Zeichnungen;
- **ermöglicht** schnellen Zugriff durch ein gut gegliedertes Inhaltsverzeichnis, das Daumenregister und ein umfangreiches Sachwortverzeichnis.

Seine Aufgabe, eine Brücke zwischen reiner Formelsammlung und Lehrbuch zu sein, erfüllt es vor Allem durch die didaktisch geschickte Gestaltung sowie leicht verständliche Texte und Abbildungen.

Dem Verlag gilt mein Dank für die stets gute Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Dipl.-Phys. Vogelsang für seine fachkundige Hilfe bei der Entstehung des Buches, sowie besonders Herrn Dipl.-Phys. Jochen Horn für die immer verständnisvolle Unterstützung meiner Wünsche bei der weiteren Verbesserung des Buches.

Möge das Taschenbuch den vielen Benutzern beim Lernen, Studieren und Arbeiten auch weiterhin ein **unentbehrlicher**, sowie **zuverlässiger Helfer** und **Ratgeber** sein.

Mittweida, im August 2014 Horst Kuchling

# VORWORT ZUR 22. AUFLAGE

Der Erfolg des „Taschenbuchs für Physik“ beruht auf der langjährigen Berufserfahrung meines Vaters als Gymnasiallehrer und Fachschuldozent, auf die er bei der Entstehung und Entwicklung des Buches zurückgreifen konnte.

Für die vorliegende **22. Auflage** blieben die bewährte Darstellungsform und der Umfang unverändert. Es wurden Fehler beseitigt, die insbesondere durch aufmerksame Nutzer erkannt wurden. Weiterhin wurden Zahlenwerte auf den aktuellen Stand gebracht sowie neue Erkenntnisse, Bestimmungen und Festlegungen – darunter die grundlegenden Veränderungen im Internationalen Einheitensystem (SI) – berücksichtigt. Sinnvolle und umsetzbare Vorschläge aus dem Leserkreis wurden eingearbeitet. Abbildungen wurden teilweise neu gezeichnet bzw. ergänzt.

Für Anregungen, Verbesserungsvorschläge sowie Hinweise auf Fehler sind Verlag und Bearbeiter auch in Zukunft sehr dankbar.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Roland Fetzner für die Überlassung eines Tools zur Neuberechnung der Hysteresekurven. Dem Hanser Verlag danke ich für die gute Unterstützung bei der Vorbereitung dieser Auflage und hoffe, dass der „KUCHLING“ wie bisher seinen Platz als hilfreicher Begleiter in der Ausbildung und im Beruf findet.

Oberschöna, im Dezember 2021 Thomas Kuchling

# BENUTZUNGSHINWEISE

- Die Stoffauswahl in diesem Buch beschränkt sich – im Gegensatz zu Lehrbüchern – auf quantitativ erfassbare, also berechenbare Fakten. Beschreibendes wird nur sehr kurz oder überhaupt nicht dargestellt.
- Sämtliche Formeln dieses Buches sind als **Größengleichungen** geschrieben, also unabhängig von den gewählten Einheiten. Wird aus Gründen der Zweckmäßigkeit ausnahmsweise eine *zugeschnittene* Größengleichung benutzt, so ist sie als solche gekennzeichnet.
- Grundsätzlich werden **SI-Einheiten** verwendet. Jedoch wird mit „VT" auf ihre dezimalen Vielfachen und Teile hingewiesen, wenn deren Anwendung *üblich* und *zweckmäßig* ist. Neben der jeweiligen Formel sind die Einheiten aller Größen tabellenartig aufgeführt.
  Umrechnungen ungesetzlicher Einheiten in gesetzliche sind den Umrechnungstabellen auf der hinteren Einbandinnenseite oder der Liste wichtiger Größen und deren Einheiten → [3.6] zu entnehmen.
- Die Werte der **physikalischen Konstanten** entsprechen der neuesten CODATA-Veröffentlichung (2018).
  In der **Tabelle** (→ hintere Einbandinnenseite) ist die *Unsicherheit* der letzten Stellen als *Standardabweichung* in Klammern angefügt.
- Die **Genauigkeit** der Konstanten und Umrechnungsfaktoren *bei den Formeln* im gesamten Buch und in den Umrechnungstabellen ist auf **4 Stellen** (unabhängig von der Stellung des Kommas) begrenzt, weil in der Regel Mess- und Materialwerte höchstens mit dieser Genauigkeit vorliegen. Dies entspricht auch den Gepflogenheiten der Praxis. Bei Formeln, die eine *höhere* Rechengenauigkeit erfordern, will man *aussagekräftige* Ergebnisse erhalten, ist die Genauigkeit der Konstanten dieser Forderung angepasst.
- Bei der üblichen Verwendung elektronischer Rechner sollte man sich vor „Scheingenauigkeiten" hüten. Es ist *unsinnig*, die **Ergebnisse** einer Rechnung mit mehr Stellen anzugeben, als bei den gegebenen Größen vorhanden waren. *Sinnvolles* Runden ist hier notwendig.

- Auf andere Stellen des Buches wird **verwiesen**
  - auf ein Kapitel: → [23.5]
  - auf eine Formel: (W 16.22)
  - auf eine Tabelle: (→ Tabelle 43).
- **Ableitungen** nach der Zeit sind – wie üblich – durch einen Punkt über dem Formelzeichen der abgeleiteten Größe gekennzeichnet, z. B. $v = \mathrm{d}s/\mathrm{d}t = \dot{s}$.
- Entsprechend DIN 1338 wurden **Formelzeichen** *kursiv (schräg)*, **Einheitenzeichen** dagegen steil (senkrecht) gedruckt.
  Formelzeichen **vektorieller Größen** sind im gesamten Buch ohne den Vektorpfeil geschrieben, wenn die Richtung der Größe keine Rolle spielt, also nur der **Betrag** der Größe (Zahlenwert × Einheit) gemeint ist.
- Als Quelle für die **Tabellenwerte** diente die Standardliteratur, u. a.
  - Kohlrausch, Praktische Physik, Band 3, B. G. Teubner Stuttgart,
  - Karlsruher Nuklidkarte

  Bei widersprüchlichen Angaben wurde der *wahrscheinlichere* Wert gewählt. Dabei sind kleine Unstimmigkeiten nicht immer vermeidbar.
- **Lehrbücher** für weitergehende Informationen
  - Leute: PHYSIK und ihre Anwendungen in Technik und Umwelt. Carl Hanser Verlag, München
  - Lindner: PHYSIK für Ingenieure. Carl Hanser Verlag, München
  - Müller/Heinemann/Krämer/Zimmer: Übungsbuch PHYSIK. Carl Hanser Verlag, München
  - Paus: PHYSIK in Experimenten und Beispielen. Carl Hanser Verlag, München
  - Stroppe: PHYSIK für Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften. Carl Hanser Verlag, München
  - Zeitler/Simon: PHYSIK für Techniker. Carl Hanser Verlag, München
  - Dobrinski/Krakau/Vogel: Physik für Ingenieure. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden
  - Halliday/Resnick/Walker: Physik. Wiley-VCH Verlag, Weinheim
  - Hering/Martin/Stohrer: Physik für Ingenieure. Springer Vieweg, Berlin
  - Meschede: Gerthsen Physik. Springer Spektrum, Heidelberg Berlin
  - Tipler/Mosca: Physik: für Studierende der Naturwissenschaften und Technik. Springer Spektrum, Heidelberg
  - Harten: Physik. Eine Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. Springer Vieweg, Berlin

# INHALTSVERZEICHNIS


**G GRÖSSEN UND EINHEITEN . . . . . 28**

**1 Physikalische Größen . . . . . 28**
1.1 Basisgrößenarten . . . . . 28
1.2 Abgeleitete Größenarten . . . . . 28
1.3 Formelzeichen . . . . . 29
1.4 Dimension . . . . . 30
1.5 Skalare Größen . . . . . 30
1.6 Vektorielle Größen . . . . . 31
1.7 Rechnen mit vektoriellen Größen . . . . . 32
1.7.1 Summe vektorieller Größen . . . . . 32
1.7.2 Differenz vektorieller Größen . . . . . 32
1.7.3 Produkt einer vektoriellen mit einer skalaren Größe . . 33
1.7.4 Skalarprodukt zweier vektorieller Größen . . . . . 33
1.7.5 Vektorprodukt zweier vektorieller Größen . . . . . 34
1.7.6 Komponentendarstellung vektorieller Größen . . . . . 35

**2 Gleichungen physikalischer Größen . . . . . 36**
2.1 Größengleichungen . . . . . 36
2.2 Zugeschnittene Größengleichungen . . . . . 36
2.2.1 Tabellen . . . . . 37
2.2.2 Koordinatenachsen . . . . . 38
2.3 Zahlenwertgleichungen . . . . . 38

**3 Internationales Einheitensystem (SI) . . . . . 39**
3.1 Basiseinheiten des SI . . . . . 39
3.2 Abgeleitete SI-Einheiten . . . . . 40
3.3 Dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten . . . . . 41
3.4 Einheiten außerhalb des SI (SI-fremde Einheiten) . . . . . 41
3.5 Gesetzliche Einheiten . . . . . 42
3.6 Physikalische Größenarten und ihre Einheiten . . . . . 42

**M MECHANIK . . . . . 53**

**4 Basiseinheiten der Mechanik . . . . . 53**
4.1 Einheit der Länge . . . . . 53
4.1.1 Fläche . . . . . 54
4.1.2 Volumen . . . . . 55
4.1.3 Winkel . . . . . 55
4.2 Zeiteinheit . . . . . 56
4.3 Masseneinheit . . . . . 57

**5 Statik des starren Körpers . . . 58**
5.1 Zusammensetzen von Kräften . . . 58
5.1.1 Kräfte mit gleicher Wirkungslinie . . . 58
5.1.2 Kräfte mit gleichem Angriffspunkt . . . 59
5.1.3 Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten . . . 60
5.1.4 Parallele Kräfte . . . 60
5.2 Zerlegen von Kräften . . . 61
5.3 Drehmoment . . . 62
5.4 Gleichgewichtsbedingungen . . . 63
5.5 Einfache Maschinen . . . 64
5.5.1 Hebel . . . 64
5.5.2 Feste Rolle . . . 65
5.5.3 Lose Rolle . . . 65
5.5.4 Flaschenzug . . . 65
5.5.5 Differenzialflaschenzug . . . 66
5.5.6 Geneigte Ebene . . . 66
5.5.7 Keil . . . 67
5.5.8 Schraube . . . 67
5.6 Gleichgewicht . . . 68
5.6.1 Schwerpunkt (Massenmittelpunkt) . . . 68
5.6.2 Gleichgewichtsarten . . . 70
5.6.3 Standfestigkeit . . . 70

**6 Kinematik . . . 71**
6.1 Translation . . . 71
6.1.1 Gleichförmige Translation . . . 72
6.1.2 Gleichmäßig beschleunigte Translation . . . 73
6.1.3 Ungleichmäßig beschleunigte Translation . . . 77
6.2 Fall und Wurf . . . 80
6.2.1 Freier Fall . . . 80
6.2.2 Senkrechter Wurf . . . 81
6.2.3 Zusammengesetzte Bewegung . . . 82
6.2.4 Waagerechter Wurf . . . 83
6.2.5 Schräger Wurf . . . 85
6.3 Rotation . . . 87
6.3.1 Gleichförmige Rotation . . . 90
6.3.2 Gleichmäßig beschleunigte Rotation . . . 90
6.3.3 Ungleichmäßig beschleunigte Rotation . . . 94
6.3.4 Bewegung auf der Kreisbahn (Umfangsbewegung) . . . 97
6.3.5 Größen der Rotation als Vektoren . . . 98
6.4 Krummlinige Bewegung . . . 98

**7 Dynamik . . . 101**
7.1 Kräfte bei der Translation . . . 101
7.1.1 Masse und Kraft . . . 101
7.1.2 Dichte . . . 104
7.1.3 Federkraft . . . 106

7.1.4 Reibungskraft . . . 107
7.1.5 Trägheitskräfte bei der Translation . . . 108
7.2 Arbeit, Energie und Leistung . . . 109
7.2.1 Arbeit . . . 109
7.2.2 Energie . . . 114
7.2.3 Gesetz von der Erhaltung der Energie . . . 116
7.2.4 Leistung . . . 117
7.2.5 Wirkungsgrad . . . 119
7.3 Impuls und Stoß . . . 120
7.3.1 Impuls . . . 120
7.3.2 Kraftstoß . . . 120
7.3.3 Impulssatz . . . 122
7.3.4 Elastischer Stoß . . . 122
7.3.5 Unelastischer Stoß . . . 124
7.3.6 Teilelastischer Stoß . . . 125
7.4 Dynamik der Drehbewegung (Dynamik starrer Körper) . . . 127
7.4.1 Zentripetalkraft . . . 127
7.4.2 Trägheitskräfte bei der Rotation . . . 128
7.4.3 Dynamisches Grundgesetz der Rotation . . . 129
7.4.4 Trägheitsmoment . . . 131
7.4.5 Arbeit bei der Rotation . . . 138
7.4.6 Leistung bei der Rotation . . . 139
7.4.7 Rotationsenergie . . . 140
7.4.8 Drehimpuls (Drall) . . . 141
7.5 Gravitation . . . 143
7.5.1 Gravitationsgesetz . . . 144
7.5.2 Fallbeschleunigung . . . 145
7.5.3 Gravitationsfeld . . . 146
7.5.4 Arbeit im Gravitationsfeld . . . 147
7.5.5 Astronautische Geschwindigkeiten . . . 147
7.5.6 Kepler'sche Gesetze . . . 150
7.5.7 Daten des Sonnensystems . . . 151

**8 Ruhende Flüssigkeiten . . . 153**
8.1 Druck in Flüssigkeiten . . . 154
8.1.1 Kolbendruck . . . 154
8.1.2 Schweredruck . . . 155
8.2 Kompressibilität . . . 156
8.3 Auftrieb . . . 156
8.3.1 Bestimmung der Dichte fester Körper . . . 157
8.3.2 Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten . . . 158

**9 Ruhende Gase . . . 159**
9.1 Druck und Volumen eines Gases . . . 159
9.1.1 Überdruck . . . 160
9.1.2 Messung des Gasdrucks . . . 160

9.2 Luftdruck . . . 160
9.2.1 Luftdruckmessung . . . 162
9.2.2 Wirkung des Luftdrucks . . . 163
9.2.3 Auftrieb in Gasen . . . 163

**10 Strömungen . . . 164**
10.1 Reibungsfreie Strömung . . . 164
10.1.1 Ausfluss aus Gefäßen . . . 164
10.1.2 Durchfluss durch Röhren . . . 165
10.1.3 Druck in Strömungen . . . 166
10.1.4 Druckmessung in Strömungen . . . 168
10.2 Laminare Strömung . . . 170
10.2.1 Dynamische Viskosität (Zähigkeit) . . . 171
10.2.2 Laminare Strömung durch ein Rohr . . . 172
10.2.3 Laminare Strömung um eine Kugel . . . 175
10.3 Turbulente Strömung . . . 176
10.3.1 Strömungswiderstand . . . 176
10.3.2 Strömungsleistung . . . 177
10.3.3 Reynolds'sches Ähnlichkeitsgesetz . . . 177

**11 Moleküle . . . 179**
11.1 Molekularkräfte . . . 179
11.1.1 Kohäsion und Adhäsion . . . 179
11.1.2 Oberflächenspannung . . . 180
11.1.3 Kapillarität . . . 182
11.2 Molekularbewegung . . . 183
11.2.1 Diffusion . . . 184
11.2.2 Osmose . . . 184
11.3 Lösungen . . . 184
11.3.1 Molekulardisperse Systeme (echte Lösungen) . . . 184
11.3.2 Kolloiddisperse Systeme (kolloide Lösungen) . . . 185
11.3.3 Korpuskulardisperse Systeme . . . 185

**12 Elastizität fester Körper . . . 187**
12.1 Dehnung . . . 187
12.2 Kompression . . . 190
12.3 Scherung . . . 191
12.4 Torsion (Drillung) . . . 192
12.5 Härte . . . 193

**13 Mechanische harmonische Schwingungen . . . 195**
13.1 Ungedämpfte harmonische Schwingung . . . 196
13.1.1 Phasenwinkel . . . 196
13.1.2 Elongation . . . 197
13.1.3 Geschwindigkeit . . . 198
13.1.4 Beschleunigung . . . 198
13.1.5 Rückstellkraft . . . 199

13.2 Eigenfrequenz der ungedämpften harmonischen Schwingung 200
13.2.1 Schwingungsgleichung . . . 200
13.2.2 Lineare Federschwingung . . . 201
13.2.3 Drehschwingung . . . 202
13.2.4 Pendelschwingungen . . . 203
13.2.5 Flüssigkeitsschwingungen . . . 206
13.2.6 Schwingungsenergie . . . 206
13.3 Freie gedämpfte Schwingung . . . 208
13.3.1 Schwingungsgleichung . . . 209
13.3.2 Elongation . . . 210
13.3.3 Eigenfrequenz . . . 212
13.3.4 Aperiodische Bewegung . . . 213
13.4 Erzwungene Schwingung . . . 216
13.4.1 Schwingungsgleichung . . . 216
13.4.2 Elongation . . . 217
13.4.3 Resonanz . . . 218
13.5 Überlagerung von Schwingungen . . . 221
13.5.1 Schwingungen gleicher Richtung und Frequenz . . . 221
13.5.2 Schwingungen gleicher Richtung und ungleicher Frequenz . . . 223
13.5.3 Schwingungen ungleicher Richtung . . . 225
13.6 Gekoppelte Schwingungen . . . 229

**14 Mechanische Wellen . . . 232**
14.1 Wellenausbreitung . . . 232
14.1.1 Huygens'sches Prinzip . . . 232
14.1.2 Wellenarten . . . 232
14.2 Lineare Sinuswelle . . . 234
14.2.1 Wellengleichung . . . 234
14.2.2 Elongation . . . 234
14.2.3 Phasengeschwindigkeit . . . 235
14.2.4 Phasensprung . . . 236
14.2.5 Stehende Wellen . . . 236
14.3 Wellen in ausgedehnten Medien . . . 238
14.3.1 Überlagerung . . . 238
14.3.2 Reflexion . . . 239
14.3.3 Brechung . . . 239
14.3.4 Beugung . . . 240
14.4 Größen des Wellenfeldes . . . 241
14.4.1 Energiedichte . . . 241
14.4.2 Energiestrom . . . 241
14.4.3 Leistung . . . 242
14.4.4 Intensität . . . 242
14.4.5 Wellenwiderstand . . . 243

**W WÄRMELEHRE . . . . . 244**

**15 Temperatur . . . . . 244**
15.1 Temperaturmessung . . . . . 245
15.1.1 Temperaturskalen . . . . . 245
15.1.2 Thermometer . . . . . 246
15.2 Ausdehnung fester Körper . . . . . 247
15.2.1 Längenänderung . . . . . 247
15.2.2 Flächenänderung . . . . . 248
15.2.3 Volumenänderung . . . . . 249
15.3 Ausdehnung von Flüssigkeiten . . . . . 250
15.3.1 Volumenänderung . . . . . 250
15.3.2 Dichteänderung . . . . . 251
15.4 Ausdehnung der Gase . . . . . 251
15.4.1 Volumenänderung . . . . . 251
15.4.2 Druckänderung . . . . . 253
15.5 Gasgesetze . . . . . 255
15.5.1 Zustandsgleichung des idealen Gases . . . . . 255
15.5.2 Gasdichte . . . . . 256
15.5.3 Normvolumen . . . . . 258
15.5.4 Gasgemische . . . . . 258
15.5.5 Molare Größen . . . . . 259

**16 Wärmeenergie . . . . . 262**
16.1 Wärmemenge . . . . . 262
16.1.1 Wärmeinhalt . . . . . 263
16.1.2 Wärmekapazität . . . . . 263
16.1.3 Wasserwert . . . . . 264
16.2 Spezifische Wärmekapazität . . . . . 265
16.3 Wärmemischung . . . . . 267
16.4 Wärmequellen . . . . . 268
16.4.1 Sonnenenergie . . . . . 268
16.4.2 Verbrennungsenergie . . . . . 269
16.4.3 Elektrische Energie . . . . . 270
16.4.4 Mechanische Energie . . . . . 270

**17 Aggregatzustände . . . . . 272**
17.1 Schmelzen und Erstarren . . . . . 272
17.1.1 Schmelzpunkt . . . . . 273
17.1.2 Erstarrungspunkt von Lösungen . . . . . 273
17.1.3 Volumenänderung . . . . . 274
17.1.4 Schmelzwärme . . . . . 274
17.1.5 Lösungswärme . . . . . 275
17.2 Verdampfen und Kondensieren . . . . . 275
17.2.1 Siedepunkt . . . . . 276
17.2.2 Siedepunkt von Lösungen . . . . . 276
17.2.3 Volumenänderung . . . . . 276

17.2.4 Verdampfungswärme . . . . . 277
17.2.5 Verdunsten . . . . . 278
17.2.6 Sublimieren . . . . . 278
17.3 Dämpfe . . . . . 278
17.3.1 Gesättigter Dampf . . . . . 278
17.3.2 Ungesättigter Dampf . . . . . 279
17.3.3 Dampfbildung im gaserfüllten Raum . . . . . 279
17.3.4 Tripelpunkt . . . . . 280
17.3.5 Luftfeuchtigkeit . . . . . 281
17.4 Reale Gase . . . . . 283
17.4.1 Zustandsgleichung realer Gase . . . . . 283
17.4.2 Kritische Temperatur . . . . . 284
17.4.3 Verflüssigung der Gase . . . . . 285

**18 Zustandsänderung des idealen Gases . . . . . 287**
18.1 Erster Hauptsatz . . . . . 287
18.1.1 Volumenänderungsarbeit . . . . . 288
18.1.2 Innere Energie . . . . . 289
18.1.3 Enthalpie . . . . . 290
18.2 Isochore Zustandsänderung . . . . . 290
18.3 Isobare Zustandsänderung . . . . . 291
18.4 Isotherme Zustandsänderung . . . . . 292
18.5 Isentrope Zustandsänderung . . . . . 294
18.6 Polytrope Zustandsänderung . . . . . 297
18.7 Kreisprozesse . . . . . 301
18.7.1 Carnot'scher Kreisprozess . . . . . 302
18.7.2 Thermischer Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses . . . . 303
18.7.3 Thermische Maschinen . . . . . 304
18.8 Zweiter Hauptsatz . . . . . 306
18.8.1 Reversible und irreversible Prozesse . . . . . 306
18.8.2 Entropie . . . . . 307

**19 Kinetische Wärmetheorie . . . . . 312**
19.1 Anzahl und Masse der Moleküle . . . . . 312
19.1.1 Loschmidt-Konstante . . . . . 312
19.1.2 Avogadro-Konstante . . . . . 312
19.1.3 Boltzmann-Konstante . . . . . 313
19.1.4 Masse eines Moleküls . . . . . 313
19.2 Druck in einem Gas . . . . . 313
19.3 Geschwindigkeit der Moleküle . . . . . 315
19.3.1 Maxwell-Verteilung der Geschwindigkeit . . . . . 315
19.3.2 Wahrscheinlichste Geschwindigkeit . . . . . 316
19.3.3 Mittlere quadratische Geschwindigkeit . . . . . 317
19.3.4 Mittelwert der Geschwindigkeit . . . . . 317
19.4 Energie der Moleküle . . . . . 318
19.4.1 Kinetische Energie eines Moleküls . . . . . 318

19.4.2 Gleichverteilungssatz . . . . . 319
19.4.3 Innere Energie und spezifische Wärmekapazität . . . . . 319
19.5 Stoßzahl und freie Weglänge . . . . . 321
19.5.1 Mittlere Stoßzahl . . . . . 321
19.5.2 Mittlere freie Weglänge . . . . . 322

**20 Wärmetransport . . . . . 324**
20.1 Wärmeströmung (Konvektion) . . . . . 324
20.2 Wärmeleitung . . . . . 324
20.3 Wärmeübergang . . . . . 327
20.4 Wärmedurchgang . . . . . 328
20.5 Temperaturstrahlung . . . . . 331
20.5.1 Absorption . . . . . 331
20.5.2 Emission . . . . . 332
20.5.3 Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann . . . . . 333
20.5.4 Strahlungsgesetz von Planck . . . . . 334
20.5.5 Verschiebungsgesetz von Wien . . . . . 335

**A AKUSTIK . . . . . 336**

**21 Schallerzeugung . . . . . 336**
21.1 Wesen des Schalls . . . . . 336
21.2 Schallquellen . . . . . 337
21.2.1 Schwingende Saiten . . . . . 337
21.2.2 Schwingende Luftsäulen . . . . . 338
21.3 Tonleiter . . . . . 338
21.3.1 Harmonische (diatonische) Tonleiter . . . . . 339
21.3.2 Chromatische Tonleiter . . . . . 339
21.3.3 Gleichmäßig temperierte chromatische Tonleiter . . . . 340
21.3.4 Normstimmton . . . . . 340
21.3.5 Intervalle . . . . . 341

**22 Schallausbreitung . . . . . 343**
22.1 Schallgeschwindigkeit . . . . . 343
22.1.1 Schallgeschwindigkeit in Festkörpern . . . . . 343
22.1.2 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten . . . . . 343
22.1.3 Schallgeschwindigkeit in Gasen . . . . . 344
22.1.4 Schallgeschwindigkeit in Luft . . . . . 344
22.2 Doppler-Effekt . . . . . 345
22.3 Überlagerung von Schallwellen . . . . . 349
22.3.1 Auslöschung . . . . . 349
22.3.2 Verstärkung . . . . . 349
22.3.3 Schwebung . . . . . 349

**23 Schallmessung . . . . . 351**
23.1 Schallfeldgrößen . . . . . 351
23.1.1 Schallschnelle . . . . . 351
23.1.2 Schalldruck . . . . . 352
23.1.3 Schallintensität . . . . . 353

23.1.4 Schallpegel . . . 354
23.1.5 Relativer Schallpegel . . . 357
23.2 Hören . . . 357
23.2.1 Hörfläche . . . 357
23.2.2 Lautstärkepegel . . . 358
23.2.3 Bewerteter Schallpegel . . . 360

**24 Ultraschall . . . 361**
24.1 Eigenschaften . . . 361
24.1.1 Schallstärke . . . 361
24.1.2 Ausbreitung . . . 361
24.2 Erzeugung von Ultraschall . . . 362

**O OPTIK . . . 363**

**25 Strahlenoptik . . . 363**
25.1 Lichtausbreitung . . . 363
25.1.1 Geradlinigkeit der Ausbreitung . . . 363
25.1.2 Lichtgeschwindigkeit . . . 363
25.2 Reflexion . . . 364
25.2.1 Reflexionsgesetz . . . 364
25.2.2 Ebener Spiegel . . . 365
25.2.3 Hohlspiegel (Konkavspiegel) . . . 365
25.2.4 Wölbspiegel (Konvexspiegel) . . . 367
25.3 Brechung . . . 368
25.3.1 Brechungsgesetz . . . 368
25.3.2 Totalreflexion . . . 369
25.3.3 Planparallele Platte . . . 370
25.3.4 Prisma . . . 371
25.4 Linsen . . . 372
25.4.1 Linsenarten . . . 372
25.4.2 Bestimmung der Brennweite . . . 374
25.4.3 Konstruktion des Linsenbildes . . . 375
25.4.4 Abbildungsgesetze . . . 376
25.4.5 Dicke Linsen . . . 377
25.4.6 Abbildungsfehler . . . 378
25.5 Optische Geräte . . . 379
25.5.1 Projektor . . . 379
25.5.2 Kamera (Fotoapparat) . . . 381
25.5.3 Auge . . . 382
25.5.4 Lupe . . . 384
25.5.5 Mikroskop . . . 385
25.5.6 Fernrohre . . . 386
25.6 Zerlegung des Lichts . . . 388
25.6.1 Lichtquellen . . . 388
25.6.2 Lichtzerlegung . . . 389
25.6.3 Komplementärfarben . . . 390

25.6.4 Farbmischung . . . 390
25.6.5 Spektren . . . 391
25.6.6 Dispersion . . . 393

**26 Wellenoptik . . . 394**
26.1 Interferenz . . . 394
26.1.1 Farben dünner Schichten . . . 394
26.1.2 Newton'sche Ringe . . . 395
26.2 Beugung . . . 396
26.2.1 Beugung am engen Spalt . . . 397
26.2.2 Beugung am Doppelspalt . . . 398
26.2.3 Beugungsgitter . . . 398
26.2.4 Beugungsspektrum . . . 399
26.2.5 Beugung an kreisförmiger Öffnung . . . 399
26.2.6 Auflösungsvermögen optischer Geräte . . . 400
26.3 Polarisation . . . 401
26.3.1 Polarisation durch Reflexion . . . 402
26.3.2 Polarisation durch Doppelbrechung . . . 403
26.3.3 Spannungsdoppelbrechung . . . 404
26.3.4 Kerr-Effekt . . . 405
26.3.5 Optische Aktivität . . . 405
26.3.6 Faraday-Effekt . . . 406

**27 Lichtstrahlung . . . 407**
27.1 Strahlungsphysikalische Größen . . . 407
27.2 Lichttechnische Größen (Fotometrie) . . . 409
27.2.1 Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad . . . 409
27.2.2 Lichtstärke . . . 410
27.2.3 Leuchtdichte . . . 412
27.2.4 Lichtstrom . . . 413
27.2.5 Spezifische Lichtausstrahlung . . . 414
27.2.6 Lichtmenge . . . 414
27.2.7 Beleuchtungsstärke . . . 415
27.2.8 Belichtung . . . 416
27.3 Fotometer . . . 417
27.3.1 Messung der Lichtstärke . . . 417
27.3.2 Messung des Gesamtlichtstroms . . . 418
27.3.3 Messung der Beleuchtungsstärke . . . 418

**E ELEKTRIK . . . 419**

**28 Gleichstromkreis . . . 419**
28.1 Elektrischer Strom . . . 419
28.1.1 Elektrische Stromstärke . . . 419
28.1.2 Elektrische Ladung . . . 419
28.2 Elektrische Spannung . . . 420
28.2.1 Quellenspannung $U_q$ (Urspannung) . . . 420
28.2.2 Spannungsabfall $U$ . . . 421

28.3 Elektrischer Widerstand . . . . . 421
28.3.1 Spezifischer elektrischer Widerstand . . . . . 423
28.3.2 Widerstand und Temperatur . . . . . 423
28.4 Elektrischer Stromkreis . . . . . 424
28.5 Stromverzweigung . . . . . 427
28.6 Schaltung von Widerständen . . . . . 427
28.6.1 Reihenschaltung . . . . . 427
28.6.2 Parallelschaltung . . . . . 428
28.6.3 Spannungsteiler . . . . . 429
28.6.4 Wheatstone'sche Messbrücke . . . . . 429
28.7 Messung von Stromstärke und Spannung . . . . . 430
28.7.1 Strommesser . . . . . 430
28.7.2 Spannungsmesser . . . . . 431
28.8 Elektrische Arbeit und Leistung . . . . . 432
28.8.1 Elektrische Arbeit . . . . . 432
28.8.2 Elektrische Leistung . . . . . 433

**29 Elektrisches Feld . . . . . 434**
29.1 Elektrische Ladung . . . . . 434
29.2 Elektrische Feldstärke . . . . . 435
29.2.1 Elektrisches Potenzial . . . . . 436
29.2.2 Elektrische Flussdichte . . . . . 438
29.2.3 Dielektrikum . . . . . 439
29.2.4 Feldstärke an Kugeloberflächen . . . . . 440
29.3 Kapazität . . . . . 441
29.3.1 Kondensator . . . . . 442
29.3.2 Parallelschaltung von Kondensatoren . . . . . 445
29.3.3 Reihenschaltung von Kondensatoren . . . . . 445
29.4 Kraft und Energie im elektrischen Feld . . . . . 446
29.4.1 Kraftwirkung im Feld . . . . . 446
29.4.2 Energie des Feldes . . . . . 447
29.4.3 Energiedichte . . . . . 448
29.4.4 Auf- und Entladung eines Kondensators . . . . . 448

**30 Magnetisches Feld . . . . . 451**
30.1 Dauermagnetismus (permanenter Magnetismus) . . . . . 451
30.1.1 Stabmagnet . . . . . 451
30.1.2 Magnetfeld der Erde . . . . . 451
30.2 Elektromagnetismus . . . . . 452
30.2.1 Magnetische Feldstärke . . . . . 452
30.2.2 Durchflutungsgesetz . . . . . 454
30.2.3 Magnetische Spannung . . . . . 455
30.2.4 Magnetische Flussdichte . . . . . 457
30.2.5 Magnetischer Fluss . . . . . 458
30.2.6 Stoff im magnetischen Feld . . . . . 459
30.2.7 Ferromagnetische Stoffe . . . . . 461

30.3 Elektromagnetische Induktion . . . . . 464
30.3.1 Induktionsgesetz . . . . . 464
30.3.2 Induktion im bewegten Leiter . . . . . 465
30.3.3 Selbstinduktion . . . . . 466
30.3.4 Schaltung von Induktivitäten . . . . . 468
30.3.5 Ein- und Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivität 468
30.4 Kraft und Energie im magnetischen Feld . . . . . 469
30.4.1 Kraftwirkungen im Feld . . . . . 469
30.4.2 Energie des Feldes . . . . . 475
30.4.3 Energiedichte . . . . . 476
30.4.4 Elektrische und magnetische Feldgrößen . . . . . 477

**31 Elektrische Maschinen . . . . . 478**
31.1 Generatoren . . . . . 478
31.1.1 Wechselstromgenerator . . . . . 478
31.1.2 Gleichstromgenerator . . . . . 480
31.1.3 Drehstromgenerator . . . . . 481
31.2 Motoren . . . . . 482
31.2.1 Wechselstrommotoren . . . . . 483
31.2.2 Gleichstrommotoren . . . . . 483
31.2.3 Drehstrommotoren . . . . . 484

**32 Wechselstromkreis . . . . . 485**
32.1 Effektivwerte von Strom und Spannung . . . . . 485
32.2 Wechselstromwiderstand . . . . . 486
32.2.1 Induktiver Widerstand . . . . . 486
32.2.2 Kapazitiver Widerstand . . . . . 488
32.2.3 Blindwiderstand . . . . . 489
32.2.4 Scheinwiderstand . . . . . 490
32.2.5 Phasenverschiebung . . . . . 491
32.2.6 Resonanz . . . . . 492
32.3 Wechselstromleistung . . . . . 493
32.3.1 Wirkleistung . . . . . 493
32.3.2 Blindleistung . . . . . 494
32.3.3 Scheinleistung . . . . . 495
32.4 Transformator . . . . . 496

**33 Elektrische Leitung . . . . . 498**
33.1 Stromleitung durch Festkörper . . . . . 500
33.1.1 Energiebändermodell . . . . . 500
33.1.2 Metallische Leiter . . . . . 501
33.1.3 Thermoelektrizität . . . . . 502
33.1.4 Halbleiter . . . . . 504
33.1.5 Eigenleitung . . . . . 504
33.1.6 n-Leitung . . . . . 506
33.1.7 p-Leitung . . . . . 507
33.1.8 pn-Übergang . . . . . 507

33.1.9 Bipolarer Transistor . . . . . 509
33.1.10 Unipolarer Transistor . . . . . 512
33.2 Stromleitung in Flüssigkeiten . . . . . 513
33.2.1 Elektrolyse . . . . . 513
33.2.2 Galvanische Elemente . . . . . 515
33.2.3 Akkumulatoren . . . . . 515
33.3 Stromleitung in Gasen . . . . . 517
33.3.1 Unselbstständige Entladung . . . . . 517
33.3.2 Selbstständige Entladung . . . . . 518
33.3.3 Glimmentladung . . . . . 518
33.3.4 Kathodenstrahlen . . . . . 519
33.3.5 Kanalstrahlen . . . . . 520
33.3.6 Röntgenstrahlung . . . . . 520
33.4 Stromleitung im Vakuum . . . . . 520
33.4.1 Energie und Geschwindigkeit freier Elektronen . . . . . 520
33.4.2 Elektronenbewegung im elektrischen Querfeld . . . . . 523
33.4.3 Elektronenemission aus Metallen . . . . . 524
33.4.4 Elektronenröhren . . . . . 527

**34 Elektrische Schwingungen und Wellen . . . . . 530**
34.1 Elektromagnetische Schwingungen . . . . . 530
34.1.1 Schwingkreis . . . . . 530
34.1.2 Ungedämpfte elektromagnetische Schwingung . . . . . 530
34.1.3 Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen . . . . . 532
34.1.4 Offener Schwingkreis . . . . . 532
34.1.5 Gedämpfte elektromagnetische Schwingung . . . . . 533
34.2 Elektromagnetische Wellen . . . . . 534
34.2.1 Elektromagnetische Welle auf einer Leitung . . . . . 534
34.2.2 Freie elektromagnetische Wellen . . . . . 536
34.2.3 Spektrum elektromagnetischer Wellen . . . . . 538

**K ATOM- UND KERNPHYSIK . . . . . 540**

**35 Quanten . . . . . 540**
35.1 Energie-Masse-Relation . . . . . 540
35.2 Photon . . . . . 541
35.2.1 Masse des Photons . . . . . 541
35.2.2 Impuls des Photons . . . . . 541
35.2.3 Compton-Effekt . . . . . 542
35.3 Materiewellen . . . . . 544
35.4 Unschärferelation . . . . . 546

**36 Atome . . . . . 548**
36.1 Aufbau und Kennzeichnung . . . . . 548
36.1.1 Isotope Nuklide . . . . . 549
36.1.2 Isobare Nuklide . . . . . 549
36.1.3 Isotone Nuklide . . . . . 550

36.2 Masse . . . 550
36.2.1 Atommasse . . . 550
36.2.2 Anzahl der Atome . . . 552
36.2.3 Massendefekt . . . 552
36.3 Kernbindungsenergie . . . 553
36.4 Größe . . . 554
36.4.1 Elektronenradius . . . 554
36.4.2 Kernradius . . . 555
36.4.3 Atomradius . . . 555

**37 Atomhülle . . . 556**
37.1 Bohr'sche Postulate . . . 556
37.1.1 1. Postulat . . . 556
37.1.2 2. Postulat . . . 557
37.2 Wasserstoffatom . . . 557
37.2.1 Bahngeschwindigkeit . . . 557
37.2.2 Umlauffrequenz . . . 558
37.2.3 Bahnradius . . . 559
37.2.4 Energieniveau . . . 560
37.2.5 Frequenzen der Strahlung . . . 562
37.2.6 Wasserstoffspektrum . . . 563
37.3 Quantenzahlen . . . 564
37.3.1 Hauptquantenzahl $n$ . . . 564
37.3.2 Nebenquantenzahl $l$ (Drehimpulsquantenzahl) . . . 564
37.3.3 Magnetische Quantenzahl $m$ . . . 565
37.3.4 Spinquantenzahl $s$ . . . 566
37.3.5 Besetzung der Schalen . . . 567
37.4 Strahlungsemission . . . 568
37.4.1 Termschema . . . 568
37.4.2 Anregung . . . 568
37.4.3 Metastabile Zustände . . . 569
37.4.4 Röntgenstrahlung . . . 570
37.5 Wellenmechanisches Atommodell . . . 571

**38 Radioaktivität . . . 573**
38.1 Radioaktive Umwandlung (radioaktiver Zerfall) . . . 573
38.1.1 Stabilität des Kerns . . . 573
38.1.2 $\alpha$-Zerfall . . . 574
38.1.3 $\beta$-Zerfall . . . 574
38.1.4 $\beta^+$-Zerfall . . . 575
38.1.5 $\gamma$-Emission . . . 576
38.2 Statistik des Zerfalls . . . 576
38.2.1 Zerfallskonstante . . . 576
38.2.2 Zerfallsgesetz . . . 576
38.2.3 Halbwertszeit . . . 577
38.2.4 Aktivität . . . 577

38.3 Zerfallsreihen . . . 579
38.4 Schwächung der Kernstrahlung . . . 580
38.4.1 γ-Strahlung . . . 580
38.4.2 β-Strahlung . . . 582
38.4.3 α-Strahlung . . . 583
38.5 Dosimetrie . . . 584
38.5.1 Energiedosis . . . 584
38.5.2 Energiedosisleistung . . . 584
38.5.3 Ionendosis . . . 585
38.5.4 Äquivalentdosis . . . 586
38.6 Strahlenschutz . . . 587
38.7 Strahlennachweis . . . 588

**39 Künstliche Kernumwandlungen . . . 589**
39.1 Teilchenbeschleuniger . . . 589
39.2 Kernreaktionen . . . 589
39.3 Uranspaltung . . . 590
39.3.1 Kettenreaktion . . . 591
39.3.2 Energiebilanz . . . 592
39.4 Kernfusion . . . 592
39.5 Anwendung radioaktiver Nuklide . . . 593

**40 Elementarteilchen . . . 594**
40.1 Elementare Teilchen . . . 595
40.1.1 Leptonen . . . 595
40.1.2 Quarks . . . 595
40.2 Zusammengesetzte Elementarteilchen (Hadronen) . . . 596
40.2.1 Mesonen . . . 596
40.2.2 Baryonen . . . 597

**R RELATIVISTISCHE MECHANIK . . . 598**

**41 Relativistische Mechanik . . . 598**
41.1 Galilei-Transformation . . . 598
41.1.1 Zeitkoordinaten . . . 599
41.1.2 Ortskoordinaten . . . 599
41.1.3 Geschwindigkeit . . . 599
41.1.4 Beschleunigung . . . 600
41.2 Lorentz-Transformation . . . 600
41.2.1 Ortskoordinaten . . . 601
41.2.2 Zeitkoordinaten . . . 601
41.3 Relativistische Kinematik . . . 601
41.3.1 Zeitdilatation . . . 601
41.3.2 Längenkontraktion . . . 602
41.3.3 Addition von Geschwindigkeiten . . . 603
41.4 Relativistische Dynamik . . . 604
41.4.1 Masse . . . 604
41.4.2 Impuls . . . 605

41.4.3 Kraft . . . 606
41.4.4 Energie . . . 606

**F FEHLERRECHNUNG . . . 608**

**42 Fehlerrechnung bei physikalischen Messungen . . . 608**
42.1 Fehlerbegriff . . . 608
42.2 Systematische Fehler . . . 608
42.3 Zufällige Fehler . . . 609
42.3.1 Mittelwert der Messreihe . . . 609
42.3.2 Standardabweichung (mittlerer Fehler) der Einzelmessung . . . 610
42.3.3 Standardabweichung (mittlerer Fehler) des Mittelwertes . . . 611
42.4 Fehlerfortpflanzung . . . 612
42.4.1 Mittelwert des Funktionswertes . . . 612
42.4.2 Mittlerer Fehler des Funktionswertes . . . 613
42.4.3 Größtfehler des Funktionswertes . . . 614
42.4.4 Fehlerschätzung . . . 615
42.5 Darstellung des Endergebnisses . . . 615

**T TABELLEN . . . 617**
Tabelle 1a Dichte fester Stoffe . . . 617
Tabelle 1b Dichte von Flüssigkeiten . . . 619
Tabelle 1c Normdichte gasförmiger Stoffe . . . 619
Tabelle 2 Reibungszahlen . . . 620
Tabelle 3 Stoßzahl . . . 622
Tabelle 4 Kompressibilität von Flüssigkeiten . . . 622
Tabelle 5 Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe . . . 623
Tabelle 6 Dynamische Viskosität und kinematische Viskosität . . . 624
Tabelle 7 Widerstandsbeiwert . . . 625
Tabelle 8 Oberflächenspannung . . . 626
Tabelle 9 Elastizitätsmodul, Schubmodul, Kompressionsmodul . . . 627
Tabelle 10 Längenausdehnungskoeffizient fester Stoffe . . . 628
Tabelle 11 Volumenausdehnungskoeffizient von Flüssigkeiten . . . 630
Tabelle 12 Volumenausdehnungskoeffizient gasförmiger Stoffe . . . 630
Tabelle 13 Luftdichte in Abhängigkeit von Druck und Temperatur . . . 631
Tabelle 14 Spezielle Gaskonstante . . . 631
Tabelle 15 Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur . . . 632
Tabelle 16 Spezifische Wärmekapazität fester Stoffe . . . 632
Tabelle 17 Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten . . . 634
Tabelle 18 Spezifische Wärmekapazität von Gasen . . . 635
Tabelle 19 Spezifischer Heizwert fester Brennstoffe . . . 636
Tabelle 20 Spezifischer Heizwert flüssiger Brennstoffe . . . 636
Tabelle 21 Spezifischer Heizwert gasförmiger Brennstoffe . . . 636
Tabelle 22 Schmelztemperatur und spezifische Schmelzwärme . . . 637
Tabelle 23 Siedetemperatur und spezifische Verdampfungswärme . . . 640

Tabelle 24 Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Druck . . . 643
Tabelle 25 Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Luftdruck . 643
Tabelle 26 Sättigungsdruck . . . . . 644
Tabelle 27 Sättigungsdruck und Sättigungsmenge für Wasserdampf . . . . 644
Tabelle 28 Kryoskopische und ebullioskopische Konstante . . . . . 645
Tabelle 29 Van-der-Waals-Konstanten . . . . . 645
Tabelle 30 Kritische Temperatur und kritischer Druck . . . . . 646
Tabelle 31 Wärmeleitfähigkeit . . . . . 647
Tabelle 32 Wärmeübergangskoeffizient . . . . . 649
Tabelle 33 Wärmedurchgangskoeffizient . . . . . 650
Tabelle 34 Emissionsgrad . . . . . 651
Tabelle 35 Schallgeschwindigkeit . . . . . 653
Tabelle 36 Schalldämmmaß . . . . . 654
Tabelle 37 Lautstärkepegel . . . . . 655
Tabelle 38 Lichtgeschwindigkeit . . . . . 655
Tabelle 39 Brechzahl . . . . . 656
Tabelle 40 Grenzwinkel . . . . . 657
Tabelle 41 Polarisationswinkel . . . . . 657
Tabelle 42 Wellenlängen wichtiger Spektrallinien . . . . . 658
Tabelle 43 Hauptdispersion und Abbe'sche Zahl . . . . . 658
Tabelle 44 Gesamtlichtstrom und Lichtausbeute . . . . . 659
Tabelle 45 Spezifischer elektrischer Widerstand . . . . . 661
Tabelle 46 Temperaturkoeffizient . . . . . 662
Tabelle 47 Permittivitätszahl . . . . . 663
Tabelle 48 Permeabilitätszahl . . . . . 664
Tabelle 49 Curie-Temperatur ferromagnetischer Stoffe . . . . . 666
Tabelle 50 Beweglichkeit von Ladungsträgern . . . . . 667
Tabelle 51 Sprungtemperatur bei Supraleitern . . . . . 668
Tabelle 52 Elektrochemisches Äquivalent . . . . . 669
Tabelle 53 Elektrochemische Spannungsreihe . . . . . 669
Tabelle 54 Ablösearbeit . . . . . 670
Tabelle 55 Elektronenanordnung bei den Elementen . . . . . 671
Tabelle 56 Chemische Elemente und ihre Isotope . . . . . 674
Tabelle 57 Halbwertszeit und Zerfallsenergie radioaktiver Isotope . . . . . 689
Tabelle 58 Schwächungskoeffizient für $\gamma$-Strahlung . . . . . 691
Tabelle 59 Schwächungskoeffizient für $\gamma$-Strahlung des Co-60 . . . . . 692
Tabelle 60 Halbwertsschichtdicke für $\gamma$-Strahlung . . . . . 692
Tabelle 61 Maximale Reichweite und Halbwertsschichtdicke für $\beta$-Strahlung in Aluminium . . . . . 692
Tabelle 62 Dosisleistungskonstante . . . . . 693
Tabelle 63 Griechische Buchstaben . . . . . 693

**S SACHWORTVERZEICHNIS . . . . . 694**

# GRÖSSEN UND EINHEITEN G

## 1 Physikalische Größen

**Physikalische Größen** sind messbare Merkmale (Eigenschaften) physikalischer Objekte (Dinge, Zustände, Vorgänge).

**Physikalische Gesetzmäßigkeiten** sind mathematische Verknüpfungen solcher Größen.

Der **Wert** jeder physikalischen Größe (**Größenwert**) ist das Produkt aus einem *Zahlenwert* und einer *Einheit*.
**Größenwert** = **Zahlenwert** × **Einheit**.

Der Ausdruck Zeit = 5 Sekunden
$t = 5\,\mathrm{s}$

besagt also, dass die gemessene Zeit das 5fache einer Sekunde beträgt.

Der Zahlenwert allein reicht zur Bestimmung des Wertes einer physikalischen Größe nicht aus. Die entsprechende Einheit darf demnach niemals weggelassen werden!

***Beachte:***

- Für Zahlenwert und Einheit werden manchmal noch die Bezeichnungen *Maßzahl* und *Maßeinheit* benutzt.

### 1.1 Basisgrößenarten

In der Physik werden 7 Basisgrößenarten (früher Grundgrößenarten genannt) verwendet. Es sind dies:

**Länge, Zeit, Masse, Temperatur, elektrische Stromstärke, Stoffmenge und Lichtstärke.**

### 1.2 Abgeleitete Größenarten

Aus den Basisgrößenarten lassen sich alle weiteren Größenarten entweder als Aussage eines Naturgesetzes oder als zweckmäßige Definition in Form von Potenzprodukten (Produkte und Quotienten) ableiten.

***Beispiel:***

Geschwindigkeit = Weg/Zeit; Arbeit = Kraft · Weg;
Dichte = Masse/Volumen; Ladung = Stromstärke · Zeit;
Kraft = Masse · Beschleunigung; Leistung = Arbeit/Zeit.



## 1.3 Formelzeichen

Die Bezeichnungen physikalischer Größen dürfen besonders in Gleichungen, Tabellen, grafischen Darstellungen usw. durch ein Symbol, das **Formelzeichen**, ersetzt werden. In Übereinstimmung mit internationalen Vereinbarungen (IUPAP-Dokument U.I.P.20 und andere) wurden die Formelzeichen der physikalischen Größenarten durch entsprechende Normen (besonders DIN 1304, Teil 1–Teil 8) festgelegt.

Diese Bestimmungen gelten auch für die Anwendung der Formelzeichen außerhalb der Physik, z. B. in der Technik.

Als Formelzeichen werden Buchstaben des lateinischen und des griechischen Alphabets verwendet. Entsprechend DIN 1338 sind sie in Büchern und Zeitschriften *kursiv (schräg)* zu drucken. Das gilt auch für Indizes, sofern sie aus einem Formelzeichen bestehen. Abkürzungen und Zahlen werden dagegen senkrecht gedruckt.

Alle genannten Bestimmungen und Festlegungen wurden in diesem Buch berücksichtigt.

■ Eckige Klammern [ ] um ein Formelzeichen bedeuten „Einheit von …“; z. B.

$[U] = \mathrm{V}$ gelesen: Einheit der Spannung = Volt.

Eckige Klammern um eine Einheit (z. B. [V]) sind **falsch**, wenn auch eine immer noch weit verbreitete **Unsitte**!

■ Geschweifte Klammern { } um ein Formelzeichen bedeuten „Zahlenwert von …“; z. B.

$\{U\} = 230$ gelesen: Zahlenwert der Spannung = 230.

Da der Wert einer Größe (Größenwert) aus dem Produkt *Zahlenwert* mal *Einheit* besteht, ergibt sich für obiges Beispiel:

Spannung $U = \{U\} \cdot [U] = 230\,\mathrm{V}$.

■ Zwischen Zahlenwert und Einheit einer physikalischen Größe ist beim Schreiben stets ein Abstand zu lassen, z. B.

$A = 5\,\mathrm{mm}^2$; $r = 12\,\mathrm{cm}$; $\varphi = 0{,}2\,\mathrm{rad}$; $T = 300\,\mathrm{K}$; $t = -5\,^{\circ}\mathrm{C}$.

*Ausnahme:* Winkelangaben in Grad (°), Minute (′) und Sekunde (″), z. B. $\alpha = 22^\circ 30' 15''$; $\beta = 90^\circ$.

## 1.4 Dimension

Die Dimension einer physikalischen Größenart gibt deren Zusammenhang mit den Basisgrößen an. Sie ist das Potenzprodukt der Dimensionszeichen der Basisgrößenarten. Als Dimensionszeichen werden senkrechte lateinische und griechische Großbuchstaben verwendet.

***Übersicht:***

| Basisgrößenart | Formelzeichen | Dimensionszeichen |
|---|---|---|
| Länge | $l$ | L |
| Zeit | $t$ | T, Z |
| Masse | $m$ | M |
| elektrische Stromstärke | $I$ | I |
| Temperatur (thermodynamische, absolute) | $T$ | Θ, T |
| Stoffmenge | $n$ | N |
| Lichtstärke | $I_V$ | J, $I_L$ |

Demnach lautet z. B. die Dimension der Geschwindigkeit = Länge/Zeit: $\dim v = \mathsf{LT}^{-1}$.

***Beachte:***

- Zwischen den Begriffen **Dimension** und **Einheit** ist sorgfältig zu unterscheiden. Gelegentlich wird die Einheit **fälschlich** als Dimension bezeichnet.
- Die Dimension physikalischer Größenarten → [3.6].

## 1.5 Skalare Größen

Es muss zwischen **skalaren** und **vektoriellen** Größen unterschieden werden.

Skalare Größen sind durch **Zahlenwert** und **Einheit** vollständig bestimmt.

***Beispiel:***

Zeit $t$, Temperatur $T$, elektrische Ladung $Q$, Masse $m$.

Als Formelzeichen skalarer Größen werden *kursive* (*schräg* gedruckte) kleine und große Buchstaben des lateinischen sowie des griechischen Alphabets verwendet.

Mit skalaren Größen wird wie mit reellen Zahlen gerechnet. Alle dafür geltenden Gesetzmäßigkeiten sind ohne Einschränkung anwendbar.

Skalare Größen sind positiv oder negativ, wenn ihr Zahlenwert positiv oder negativ ist.

*Ausnahmen:* absolute Temperatur, Flächeninhalt, Volumen, Masse u. a. sind immer *positiv*.



## 1.6 Vektorielle Größen

Vektorielle Größen sind durch **Zahlenwert**, **Einheit** und **Richtung** vollständig bestimmt.

***Beispiel:***

Geschwindigkeit, Kraft, elektrische Feldstärke.

Als Formelzeichen vektorieller Größen verwendet man ebenfalls *kursive* kleine und große Buchstaben des lateinischen und des griechischen Alphabets.

Der vektorielle Charakter wird durch einen Pfeil über dem sonst üblichen Formelzeichen ausgedrückt: $\vec{v}$, $\vec{F}$, $\vec{E}$ usw.

***Beachte:***

- Manchmal werden Vektoren in Büchern auch durch *Fettdruck* gekennzeichnet: $\boldsymbol{v}$, $\boldsymbol{F}$, $\boldsymbol{E}$ usw.
- Früher war die Kennzeichnung durch *Frakturbuchstaben* (deutsche Buchstaben) üblich: $\mathfrak{v}$, $\mathfrak{F}$, $\mathfrak{E}$ ...

Spielt bei der Anwendung einer vektoriellen Größe $\vec{A}$ ihre Richtung keine Rolle, benötigt man also nur Zahlenwert und Einheit, **Betrag** der Größe $\vec{A}$ genannt, so schreibt man $|\vec{A}|$ oder kurz $A$.

Veranschaulicht wird eine vektorielle physikalische Größe durch eine Strecke mit bestimmter Länge und Richtung.

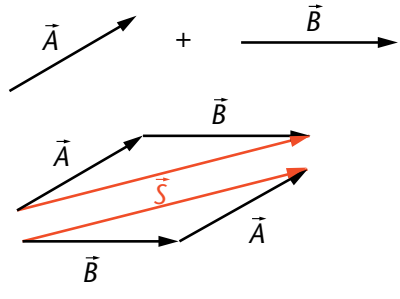
**Freie Vektoren** können parallel zu sich selbst (in der Ebene oder im Raum) verschoben werden. In der Physik sind Vektoren meist an ihre Wirkungslinie gebunden und nur längs dieser verschiebbar (**linienflüchtige Vektoren**). **Gebundene Vektoren** beginnen in einem bestimmten festen Punkt (z. B. im Koordinatenursprung) und können überhaupt nicht verschoben werden, z. B. **Ortsvektoren**. Für das Rechnen mit vektoriellen Größen gelten besondere Gesetzmäßigkeiten → [1.7].

## 1.7 Rechnen mit vektoriellen Größen

Es werden hier nur die wichtigsten Regeln für das Rechnen mit vektoriellen Größen angeführt. Sie reichen i. Allg. für den Umgang mit den Formeln dieses Buches aus. Weitere Angaben müssen jedoch entsprechenden Mathematikbüchern entnommen werden.

### 1.7.1 Summe vektorieller Größen

Bei dieser **geometrischen Addition** werden die beiden Vektoren unter Beibehaltung ihrer Richtung aneinander gereiht.




(G 1.1) $$\vec{A} + \vec{B} = \vec{B} + \vec{A} = \vec{S}$$

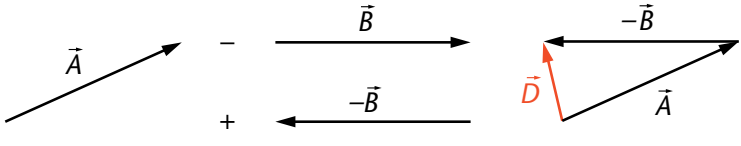
Der Summenvektor $\vec{S}$ verbindet den Anfang des ersten Vektors mit dem Ende des zweiten.

### 1.7.2 Differenz vektorieller Größen

Bei dieser **geometrischen Subtraktion** wird zunächst der Gegenvektor des Subtrahenden gebildet und dieser dann addiert.

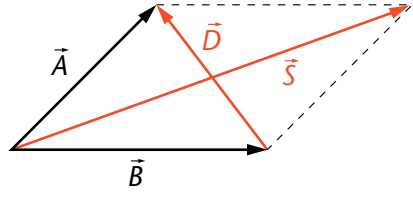
(G 1.2) $$\vec{A} - \vec{B} = \vec{A} + (-\vec{B}) = \vec{D}$$

Der Differenzvektor $\vec{D}$ verbindet den Anfang des ersten mit dem Ende des zweiten (Gegen-)Vektors.



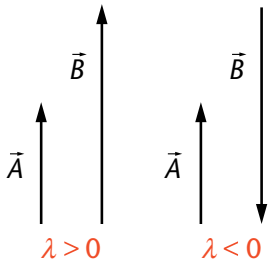

***Beachte:***

- Summen- und Differenzvektor bilden die beiden Diagonalen eines Vektorparallelogramms.



### 1.7.3 Produkt einer vektoriellen mit einer skalaren Größe

Die Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar ergibt ebenfalls einen Vektor gleicher oder entgegengesetzter Richtung.




(G 1.3) $\vec{B} = \lambda \vec{A}$ oder $|\vec{B}| = |\lambda|\,|\vec{A}|$

***Beachte:***

- Für $\lambda > 0$ hat $\vec{B}$ die gleiche Richtung wie $\vec{A}$; für $\lambda < 0$ hat $\vec{B}$ die Gegenrichtung von $\vec{A}$.

Nach (G 1.3) kann man zu jedem Vektor $\vec{A}$ durch Multiplikation mit $\lambda = 1/A$ den **Einheitsvektor** $\vec{A}^0$ finden. $\vec{A}^0$ stimmt in der Richtung mit Vektor $\vec{A}$ überein, besitzt jedoch den Betrag $|\vec{A}^0| = A^0 = 1$.

So lässt sich jeder Vektor darstellen als Produkt aus seinem Betrag und seinem Einheitsvektor.

(G 1.4) $\vec{A} = |\vec{A}|\vec{A}^0 = A\vec{A}^0$

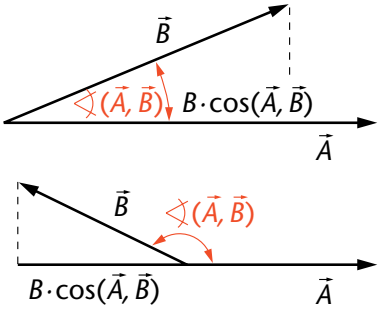
Setzt man in (G 1.3) $\lambda = 0$, so ergibt sich nach der Multiplikation mit $\vec{A}$: $\vec{B} = \vec{0}$.

$\vec{0}$ ist richtungslos und hat den Betrag $|\vec{0}| = 0$. Er wird als **Nullvektor** bezeichnet, bei ihm fallen Anfangs- und Endpunkt zusammen.

### 1.7.4 Skalarprodukt zweier vektorieller Größen

Unter dem skalaren Produkt zweier Vektoren versteht man das Produkt aus dem Betrag des einen Vektors mit dem Betrag der Projektion des anderen auf ihn.

Wenn
$\vec{A}, \vec{B}$ 2 Vektoren,
$(\vec{A}, \vec{B})$ Winkel zwischen den Vektoren $\vec{A}$ und $\vec{B}$,




dann gilt für das skalare Produkt beider Vektoren

(G 1.5) $\vec{A} \cdot \vec{B} = AB\cos(\vec{A}, \vec{B})$

***Beachte:***

- $\vec{A} \cdot \vec{B}$ (sprich: A Punkt B) heißt skalares Produkt, weil das Ergebnis ein Skalar ist.
- Das Ergebnis kann – abhängig vom Winkel – jeden Wert von $+AB$ bis $-AB$, auch null, besitzen.
- Das skalare Produkt wird häufig auch als inneres Produkt bezeichnet.
- Für das skalare Produkt des Vektors $\vec{A}$ mit sich selbst folgt aus (G 1.5)

(G 1.6) $$\boxed{\vec{A} \cdot \vec{A} = \vec{A}^2 = A^2}$$

### 1.7.5 Vektorprodukt zweier vektorieller Größen

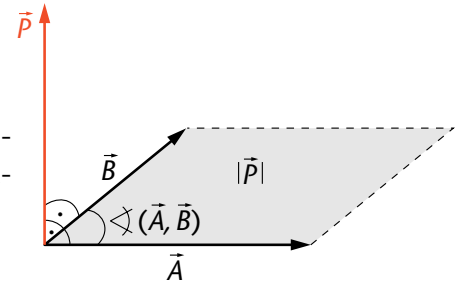
Unter dem Vektorprodukt zweier Vektoren $\vec{A}$ und $\vec{B}$ versteht man den Vektor $\vec{P}$, der senkrecht auf einer Fläche eines von den Vektoren $\vec{A}$ und $\vec{B}$ gebildeten Parallelogramms steht und dessen Betrag gleich dem Flächeninhalt dieses Parallelogramms ist.

Wenn
$\vec{A}, \vec{B}$ 2 Vektoren,
$(\vec{A}, \vec{B})$ Winkel zwischen den Vektoren $\vec{A}$ und $\vec{B}$,

dann gilt für das Vektorprodukt zweier vektorieller Größen

(G 1.7) $$\boxed{\vec{P} = \vec{A} \times \vec{B} = AB \sin(\vec{A}, \vec{B}) \vec{P}^0}$$

wobei $|\vec{P}| = P = AB \sin(\vec{A}, \vec{B})$,
$\vec{P} \perp \vec{A}$ und $\vec{P} \perp \vec{B}$
sowie $\vec{A}, \vec{B}$ und $\vec{P}$ in dieser Reihenfolge ein Rechtssystem bilden.




***Beachte:***

- $\vec{A} \times \vec{B}$ (sprich: A Kreuz B) heißt Vektorprodukt, weil das Ergebnis ein Vektor ist. Es wird häufig auch als vektorielles Produkt, Kreuzprodukt oder äußeres Produkt bezeichnet.

### 1.7.6 Komponentendarstellung vektorieller Größen

Wenn

$\vec{A}$ Vektor im kartesischen (rechtwinkligen) Koordinatensystem,

$\vec{A}_x, \vec{A}_y, \vec{A}_z$ vektorielle Komponenten von $\vec{A}$,

$A_x, A_y, A_z$ Beträge (skalare Komponenten) von $\vec{A}$, auch als Koordinaten des Vektors $\vec{A}$ bezeichnet,

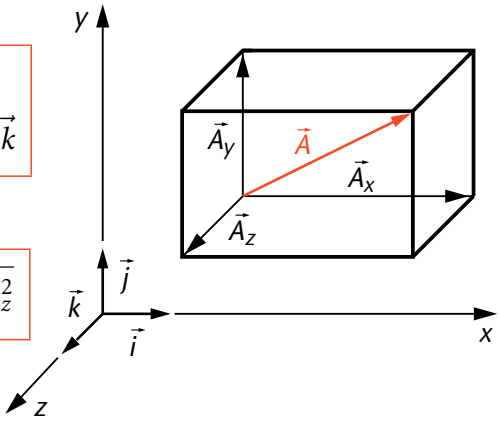
$\vec{i}$ Einheitsvektor in Richtung der $x$-Achse,

$\vec{j}$ Einheitsvektor in Richtung der $y$-Achse,

$\vec{k}$ Einheitsvektor in Richtung der $z$-Achse,

dann gilt

(G 1.8)
$$\vec{A} = \vec{A}_x + \vec{A}_y + \vec{A}_z = A_x\vec{i} + A_y\vec{j} + A_z\vec{k}$$

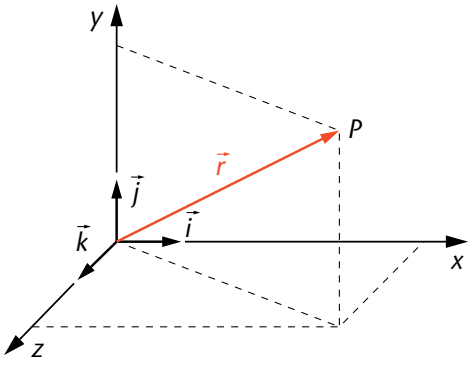



und für den Betrag des Vektors $\vec{A}$

(G 1.9)
$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}$$

**Ortsvektor (Radiusvektor)**

Der Ortsvektor $\vec{r}$ bestimmt die Lage eines beliebigen Punktes $P$ im Raum. Er reicht vom Koordinatenursprung bis zum Punkt $P$.




Wenn

$\vec{r}$ Radiusvektor, Ortsvektor,

$x, y, z$ Koordinaten des Punktes $P$,

$\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ Einheitsvektoren,

dann gilt für den Ortsvektor $\vec{r}$ analog zu (G 1.8) und (G 1.9)

(G 1.10)
$$\vec{r} = \overrightarrow{OP} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}$$

und für seinen Betrag $|\vec{r}|$

(G 1.11)
$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

# 2 Gleichungen physikalischer Größen

Die Verknüpfung physikalischer Größen erfolgt mit mathematischen **Gleichungen** (allgemein „Formeln“ genannt). Es ist zwischen drei Arten zu unterscheiden:

- Größengleichungen → [2.1],
- zugeschnittene Größengleichungen → [2.2] und
- Zahlenwertgleichungen → [2.3].

## 2.1 Größengleichungen

Grundsätzlich sollten nur Größengleichungen verwendet werden. In ihnen stellt jedes Formelzeichen → [1.3] die Kurzbezeichnung einer physikalischen Größe dar, deren Wert das Produkt Zahlenwert × Einheit ist. Größengleichungen sind deshalb **unabhängig von den benutzten Einheiten**. Es können alle Einheiten verwendet werden, ohne dass die Gültigkeit einer Größengleichung eingeschränkt wird. Auch in diesem Buch sind alle Gleichungen als Größengleichung geschrieben.

## 2.2 Zugeschnittene Größengleichungen

Muss häufig mit derselben Gleichung gerechnet werden oder enthält diese Konstanten oder Materialwerte, so ist es zweckmäßig, die Einheiten zusammenzufassen und auch die wiederkehrenden Zahlenwerte bereits auszurechnen. Natürlich können dann die Einheiten der restlichen Größen nicht mehr frei gewählt werden. Man erhält eine Größengleichung, die für den konkreten Fall „zugeschnitten“ ist. Die Angabe der Einheit erfolgt direkt am Formelzeichen unter einem (meist schrägen) Bruchstrich, z. B.

$U/\mathrm{V}$ Spannung in Volt,

$v \Big/ \dfrac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$ Geschwindigkeit in Kilometer je Stunde, oder auch $\dfrac{v}{\mathrm{km/h}}$,

$P/\mathrm{W}$ Leistung in Watt u. Ä.

Auch in zugeschnittenen Größengleichungen bedeutet jedes Formelzeichen eine physikalische Größe, deren Wert ebenfalls das Produkt aus Zahlenwert und Einheit ist. Nach dem Einsetzen eines Wertes lässt sich die Einheit kürzen.

***Beispiel:***

Für die Endgeschwindigkeit eines Elektrons im elektrischen Feld gilt nach [33.4.1]

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} \quad \text{mit} \quad e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}\,\text{C} \quad \text{und} \quad m_e = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\,\text{kg}.$$

Erweitert man die Größen mit den gewünschten Einheiten und setzt die gegebenen Konstanten ein, so erhält man

$$\frac{v}{\text{km/s}} \cdot \text{km/s} = \sqrt{0{,}352 \cdot 10^{12}\,\frac{\text{C}}{\text{kg}} \cdot \frac{U}{\text{V}} \cdot \text{V}}.$$

Mit $\text{C} = \text{A} \cdot \text{s} = \dfrac{\text{W} \cdot \text{s}}{\text{V}} = \dfrac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{V}}$ und $1\,\text{km} = 10^3\,\text{m}$ folgt nach Umstellung

$$\frac{v}{\text{km/s}} = \sqrt{0{,}352 \cdot 10^{12}\,\frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2 \cdot \text{V}}{\text{s}^2 \cdot \text{V} \cdot \text{kg} \cdot 10^6\,\text{m}^2} \cdot \frac{U}{\text{V}}}.$$

Kürzen führt zur zugeschnittenen Größengleichung

$$v \Big/ \frac{\text{km}}{\text{s}} = 593\sqrt{U/\text{V}}.$$

Die *übersichtlichste* Schreibweise erhält man nach Umstellung

$$v = 593\sqrt{U/\text{V}}\,\frac{\text{km}}{\text{s}}.$$

Nach Einsetzen einer Spannung $U$ in V(olt) ergibt sich mit dieser zugeschnittenen Größengleichung die Geschwindigkeit $v$ direkt in km/s.

### 2.2.1 Tabellen

Zahlenangaben in Tabellen bilden zusammen mit den Angaben im Tabellenkopf ebenfalls eine zugeschnittene Größengleichung, denn Zahlenwerte haben natürlich nur bei gleichzeitiger Angabe der entsprechenden Einheit einen Sinn.

***Beispiel:***

| **Schallgeschwindigkeit** | $c \Big/ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ |
|---|---|
| Luft (0 °C) | 332 |
| Blei | 1 200 |
| Stahl | 5 100 |
| usw. | |

Als Gleichung gelesen: Geschwindigkeit in Meter/Sekunde $= 332$; also $c \Big/ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 332$ oder umgestellt $c = 332 \, \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

### 2.2.2 Koordinatenachsen

In grafischen Darstellungen werden zur Beschriftung der Achsen stets Größengleichungen verwendet. Sie müssen jedoch zugeschnitten werden, weil auch hier der Zahlenwert nur bei gleichzeitiger Festlegung der entsprechenden Einheit einen Sinn hat.

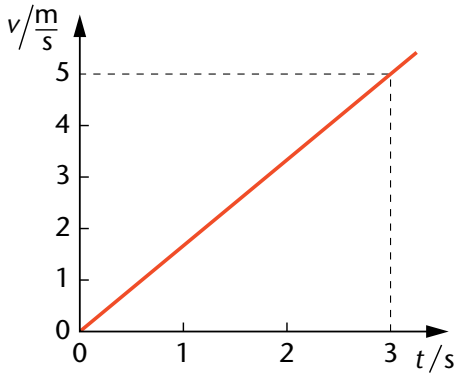
***Beispiel:***

Zu einem Punkt der Kurve des Diagramms gehört folgendes Wertepaar:

$5 = v \Big/ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$ und $3 = t/\mathrm{s}$.

Diese zugeschnittenen Größengleichungen ergeben nach Umstellung das Wertepaar

$v = 5\,\mathrm{m/s}$ und $t = 3\,\mathrm{s}$.




## 2.3 Zahlenwertgleichungen

Sie sind grundsätzlich abzulehnen, weil in ihnen Formelzeichen lediglich den Zahlenwert einer Größe verkörpern. Sie gelten demnach nur, wenn bestimmte, genau vorzuschreibende Einheiten verwendet werden.

Da Zahlenwertgleichungen im **Widerspruch** zur Festlegung

Größenwert = Zahlenwert × Einheit $\rightarrow$ [1]

stehen, werden sie in der physikalischen Literatur *nicht benutzt*. Allerdings finden sie noch immer in der Praxis Anwendung.

# 3 Internationales Einheitensystem (SI)



Das Messen ist eine der wichtigsten Aufgaben in Physik und Technik. Neben den erforderlichen Messgeräten werden dafür vor allem genormte Einheiten benötigt, die in einem System („Maßsystem“) zusammengefasst sind.

Heute wird ausschließlich das 1960 international vereinbarte „Système International d'Unités“ verwendet. Dieses „Internationale Einheitensystem“ wird in allen Sprachen der Welt mit SI abgekürzt, seine Einheiten werden als **SI-Einheiten** bezeichnet.

## 3.1 Basiseinheiten des SI

Das SI baut auf folgenden 7 Basiseinheiten (Grundeinheiten) auf:

| | | |
|---|---|---|
| ▶ Einheit der Zeit | die **Sekunde** | **(s)** |
| ▶ Einheit der Länge | der **Meter** | **(m)** |
| ▶ Einheit der Masse | das **Kilogramm** | **(kg)** |
| ▶ Einheit der elektrischen Stromstärke | das **Ampere** | **(A)** |
| ▶ Einheit der Temperatur | das **Kelvin** | **(K)** |
| ▶ Einheit der Stoffmenge | das **Mol** | **(mol)** |
| ▶ Einheit der Lichtstärke | die **Candela** | **(cd)** |

Seit 2019 werden diese ausschließlich über Naturkonstanten definiert (9. SI Broschüre, EU-Richtlinie 2019/1258 vom 23. Juli 2019):

- Eine **Sekunde** ist gleich der Dauer von 9 192 361 770 Schwingungen der Strahlung, die der Energie des Übergangs zwischen zwei Hyperfeinstrukturniveaus des ungestörten Grundzustands im $^{133}$Cs-Atoms entspricht.
- Ein **Meter** entspricht der Länge des Weges, die das Licht im Vakuum im 1/299 792 458ten Teil einer Sekunde zurücklegt.
- Ein **Kilogramm** wird mit der Wirkung von einem $\mathrm{kgm^2/s}$ verknüpft. Mit den Festlegungen für Sekunde und Meter ist das Kilogramm über die Planck-Konstante ($1\,\mathrm{kg} = 1{,}475\,521\,4 \cdot 10^{40} \cdot h \cdot \Delta v_{\mathrm{Cs}}/c^2$) definiert.
- Ein **Ampere** entspricht dem Stromfluss von $1/1{,}602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ Elementarladungen pro Sekunde.

- Ein **Kelvin** entspricht einer Änderung der thermodynamischen Temperatur, die mit einer Änderung der thermischen Energie um $1{,}380\,649\,10^{-23}$ J einhergeht.
- Ein **Mol** ist die Stoffmenge eines Systems, das $6{,}022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ eines bestimmten Einzelteilchens enthält.
- Eine **Candela** ist die Lichtstärke einer Strahlungsquelle (in eine bestimmte Richtung), die mit einer Frequenz von $540 \cdot 10^{12}$ Hz emittiert und die eine Strahlungsintensität in diese Richtung von 1/683 W/sr hat.

***Übersicht:***

| **Definierende Konstanten** | | |
|---|---|---|
| Hyperfeinübergangsfrequenz des Cäsiumatoms | $\Delta\nu_{Cs}$ | 9 192 361 770 Hz |
| Lichtgeschwindigkeit | $c$ | 299 792 458 m/s |
| Planck-Konstante | $h$ | $6{,}626\,070\,15 \cdot 10^{-34}$ J · s |
| Elementarladung | $e$ | $1{,}602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C |
| Boltzmann-Konstante | $k$ | $1{,}380\,649 \cdot 10^{-23}$ J/K |
| Avogadro-Konstante | $N_A$ | $6{,}022\,140\,76 \cdot 10^{23}$ 1/mol |
| Fotometrisches Strahlungsäquivalent | $K_{cd}$ | 683 lm/W |

## 3.2 Abgeleitete SI-Einheiten

Die weiteren SI-Einheiten werden als *Potenzprodukte* aus den Basiseinheiten **kohärent**, also *ohne* Verwendung von Zahlenfaktoren, abgeleitet. In [3.6] sind sie mit „SI“ gekennzeichnet. Alle anderen Einheiten sind **inkohärent** und somit keine SI-Einheiten.

Eine Liste der SI-Einheiten mit besonderem Namen → vordere Einbandinnenseite.

***Beispiel:***

Watt (W) ist eine *kohärente* Leistungseinheit, weil

$1\,\mathrm{W} = 1\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2/\mathrm{s}^3$, also *ohne* Zahlenfaktor abgeleitet.

Kilowatt (kW) ist eine *inkohärente* Leistungseinheit, weil

$1\,\mathrm{kW} = 10^3\,\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2/\mathrm{s}^3$, also *mit Hilfe* eines Zahlenfaktors abgeleitet.

## 3.3 Dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten

Weil die SI-Einheiten für den praktischen Gebrauch vielfach zu groß oder zu klein sind, dürfen von ihnen dezimale Vielfache und Teile mit Hilfe besonderer **Vorsätze** gebildet werden, sofern dies im Einzelfall nicht ausdrücklich untersagt ist. Eine Tabelle mit diesen SI-Vorsätzen → vordere Einbandinnenseite.

Bei der Anwendung der Vorsätze müssen einige Regeln beachtet werden. Die wichtigsten sind:

- Keine Einheit darf gleichzeitig mehr als einen Vorsatz erhalten.
- Die Kombination der Kurzzeichen des Vorsatzes und der Einheit gilt als **ein** Symbol, das ohne Verwendung von Klammern in eine Potenz erhoben wird. Oder anders ausgedrückt: Exponenten der Einheit gelten auch für den dezimalen Vorsatz.
- Vorsätze, die einer ganzzahligen Potenz von $10^3$ entsprechen (also $10^{3n}$), sind zu bevorzugen. Die Vorsätze Hekto, Deka, Dezi und Zenti sollen nur bei den Einheiten verwendet werden, bei denen sie *bereits üblich* sind.
- Bei zusammengesetzten Einheiten darf jede der Einheiten einen dezimalen Vorsatz erhalten, sofern er für diese Einheit zulässig ist. Angestrebt werden soll jedoch, möglichst nur einen Vorsatz, und diesen im Zähler, zu verwenden.
- Die Einheiten von Ergebnissen sollen mit *dem* Vorsatz versehen werden, der den Zahlenwert möglichst in den Bereich **0,1 . . . 1 000** bringt.

Einheiten, die mit einem Vorsatz für dezimale Vielfache und Teile versehen wurden, sind zwar *inkohärent* und nicht Bestandteil des SI. Sie gelten jedoch als *gesetzliche* Einheiten, z. B. 1 Kilometer (km) = $10^3$ m.

In [3.6] sind sie mit „VT“ gekennzeichnet.

## 3.4 Einheiten außerhalb des SI (SI-fremde Einheiten)

Sie sind *inkohärent* abgeleitet, aber wegen ihrer Bedeutung in Wissenschaft, Technik und Wirtschaft zugelassen; einige jedoch nur in **Spezialgebieten**.

In [3.6] sind sie mit „g“ bzw. „(g)“ gekennzeichnet.

## 3.5 Gesetzliche Einheiten

Mit dem „Gesetz über Einheiten im Messwesen“ und der „Ausführungsverordnung“ zu diesem Gesetz vom 13.12.1985 in Verbindung mit DIN 1301, Teil 1 (12.93) wurde festgelegt, dass in Deutschland gesetzliche Einheiten sind:

- die Basiseinheiten des SI → [3.1],
- die abgeleiteten SI-Einheiten → [3.2],
- die dezimalen Vielfachen und Teile von SI-Einheiten → [3.3],
- bestimmte SI-fremde Einheiten, z. T. mit eingeschränktem Anwendungsbereich.

## 3.6 Physikalische Größenarten und ihre Einheiten

In der folgenden Liste sind alle wesentlichen physikalischen Größenarten in alphabetischer Reihenfolge mit Angabe von Formelzeichen und Dimension zusammengestellt. Für jede Größe ist zunächst die *SI-Einheit* und ihre Beziehung zu den Basiseinheiten angegeben. Es folgen *SI-fremde* sowie *ungültige* und *ausländische* Einheiten mit ihren Beziehungen zur jeweiligen SI-Einheit.

***Erläuterungen zu folgender Übersicht:***

**Dimensionssymbole:**

| | |
|---|---|
| L | Länge |
| M | Masse |
| T | Zeit |
| I | elektrische Stromstärke |
| Θ | Temperatur |
| N | Stoffmenge |
| J | Lichtstärke |

**Abkürzungen in der Spalte „Gültigkeit“:**

| | |
|---|---|
| SI | SI-Einheit (Basis- oder kohärent abgeleitete Einheit) |
| VT | dezimale Vielfache oder Teile von SI-Einheiten |
| g | SI-fremde Einheit, jedoch gesetzlich |
| (g) | SI-fremde Einheit, jedoch gesetzlich, aber Gültigkeit eingeschränkt auf bestimmten Anwendungsbereich |
| o | SI-fremde Einheit, in Spezialgebieten benutzt und von den gesetzlichen Bestimmungen nicht betroffen |
| ug | ungesetzliche (ungültige) Einheit |
| a | ungesetzliche (ausländische) Einheit |

**Abkürzungen in der Spalte „Vielfache und Teile VT“:**

\+ SI-Vorsätze sind zulässig
− SI-Vorsätze sind nicht zulässig
/ zusammengesetzte Einheit, → bei der jeweiligen Einheit



| **Größe** ***Formelzeichen*** | Dimension | |
|---|---|---|
| Einheit (Einheitenzeichen) = Beziehung | Gültigkeit | VT |
| **Abklingkoeffizient** ***δ*** | | $T^{-1}$ |
| 1/Sekunde (1/s) | SI | / |
| **Aktivität** ***A*** | | $T^{-1}$ |
| Becquerel (Bq) = 1/s | SI | + |
| Curie (Ci) = $3{,}7 \cdot 10^{10}$ Bq = 37 GBq | ug | + |
| **Äquivalentdosis** ***H*** | | $L^2\,T^{-2}$ |
| Sievert (Sv) = J/kg = $m^2/s^2$ | SI | + |
| Rem (rem) = $10^{-2}$ J/kg = $10^{-2}$ Sv = 10 mSv | ug | + |
| **Arbeit** ***W*** | | $L^2\,M\,T^{-2}$ |
| **Energie** ***E*** | | |
| **Wärmemenge** ***Q*** | | |
| Joule (J) = N · m = W · s = kg · $m^2/s^2$ | SI | + |
| Kilowattstunde (kWh) = $3{,}6 \cdot 10^6$ J = 3,6 MJ | g | − |
| Elektronvolt (eV) = $1{,}602\,176\,5 \cdot 10^{-19}$ J | (g) | + |
| Kilopondmeter (kp · m) = 9,806 65 J | ug | − |
| Erg (erg) = dyn · cm = $10^{-7}$ J = 0,1 µJ | ug | + |
| Kalorie (cal) = 4,186 8 J | ug | + |
| PS · h = 0,735 498 75 kWh = $2{,}647\,795\,5 \cdot 10^6$ J = 2,647 795 5 MJ | ug | − |
| horse-power hour (hp · h) = 2,684 52 MJ | a | − |
| inch-pound-force (in · lbf) = 0,112 98 J | a | − |
| foot-pound-force (ft · lbf) = 1,355 8 J | a | − |
| yard-pound-force (yd · lbf) = 4,067 45 J | a | − |
| foot-ton-force (ft · tonf) = 3,037 kJ | a | − |
| foot-poundal (ft · pdl) = 42,14 mJ | a | − |
| British thermal unit (Btu) = 1,055 06 kJ | a | − |
| **Beleuchtungsstärke** ***E*** | | $L^{-2}\,J$ |
| Lux (lx) = lm/$m^2$ = cd · sr/$m^2$ | SI | + |
| footcandle (fc) = 1 lm/$ft^2$ = 10,764 lx | a | − |
| **Belichtung** ***H*** | | $L^{-2}\,T\,J$ |
| Luxsekunde (lx · s) = cd · sr · s/$m^2$ | SI | / |
| **Beschleunigung** ***a*** | | $L\,T^{-2}$ |
| Meter/Sekundenquadrat (m/$s^2$) | SI | / |
| km/(h · s) = 0,277 778 m/$s^2$ | g | / |
| Gal (Gal) = $10^{-2}$ m/$s^2$ = 1 cm/$s^2$ | ug | + |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Bestrahlung** $H_e$ | | | $\mathrm{M\,T^{-2}}$ |
| Joule/Quadratmeter ($\mathrm{J/m^2} = \mathrm{kg/s^2}$) | | SI | / |
| **Bestrahlungsstärke** $E_e$ | | | $\mathrm{M\,T^{-3}}$ |
| Watt/Quadratmeter ($\mathrm{W/m^2} = \mathrm{kg/s^3}$) | | SI | / |
| **Brechwert** $D$ | | | $\mathrm{L^{-1}}$ |
| Dioptrie ($\mathrm{dpt} = 1/\mathrm{m}$) | | (g) | – |
| **Dämpfungskonstante** $\beta$ | | | $\mathrm{M\,T^{-1}}$ |
| Kilogramm/Sekunde (kg/s) | | SI | / |
| **Dichte** $\varrho$ | | | $\mathrm{L^{-3}\,M}$ |
| Kilogramm/Kubikmeter ($\mathrm{kg/m^3}$) | | SI | / |
| Kilogramm/Kubikdezimeter ($\mathrm{kg/dm^3} = \mathrm{t/m^3} = 10^3\,\mathrm{kg/m^3}$) | | VT | / |
| Gramm/Kubikzentimeter ($\mathrm{g/cm^3} = \mathrm{kg/dm^3} = \mathrm{t/m^3} = 10^3\,\mathrm{kg/m^3}$) | | VT | / |
| pound per cubic foot ($\mathrm{lb/ft^3} = 16{,}018\,\mathrm{kg/m^3}$) | | a | – |
| pound per cubic inch ($\mathrm{lb/in^3} = 27{,}680\,\mathrm{t/m^3}$) | | a | – |
| pound per cubic yard ($\mathrm{lb/yd^3} = 0{,}593\,28\,\mathrm{kg/m^3}$) | | a | – |
| ounce per gallon (UK) ($\mathrm{oz/gal} = 6{,}236\,1\,\mathrm{kg/m^3}$) | | a | – |
| ounce per gallon (US) ($\mathrm{oz/gal} = 7{,}489\,3\,\mathrm{kg/m^3}$) | | a | – |
| **Dielektrizitätskonstante** → **Permittivität** | | | |
| **Drehimpuls** $L$ | | | $\mathrm{L^2\,M\,T^{-1}}$ |
| $\mathrm{N \cdot m \cdot s} = \mathrm{kg \cdot m^2/s}$ | | SI | / |
| **Drehmoment, Kraftmoment** $M$ | | | $\mathrm{L^2\,M\,T^{-2}}$ |
| Newtonmeter ($\mathrm{N \cdot m} = \mathrm{kg \cdot m^2/s^2}$) | | SI | / |
| Kilopondmeter ($\mathrm{kp \cdot m} = 9{,}806\,65\,\mathrm{N \cdot m}$) | | ug | – |
| Pondzentimeter ($\mathrm{p \cdot cm} = 9{,}806\,65 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{N \cdot m} = 98{,}066\,5\,\mu\mathrm{N \cdot m}$) | | ug | – |
| **Drehzahl** → **Frequenz** | | | |
| **Druck** $p$ | | | $\mathrm{L^{-1}\,M\,T^{-2}}$ |
| Pascal ($\mathrm{Pa} = \mathrm{N/m^2} = \mathrm{J/m^3} = \mathrm{kg/(s^2 \cdot m)}$) | | SI | + |
| Bar ($\mathrm{bar} = 10^5\,\mathrm{Pa} = 0{,}1\,\mathrm{MPa}$) | | g | + |
| Millibar ($\mathrm{mbar} = \mathrm{hPa} = 100\,\mathrm{Pa}$) | | g | – |
| Millimeter-Quecksilbersäule ($\mathrm{mmHg} = 133{,}322\,\mathrm{Pa}$) | | (g) | – |
| Torr = mm Hg = 133,322 4 Pa | | ug | + |
| technische Atmosphäre (at) = $1\,\mathrm{kp/cm^2} = 9{,}806\,65 \cdot 10^4\,\mathrm{Pa} = 98{,}066\,5\,\mathrm{kPa}$ | | ug | + |
| physikalische Atmosphäre (atm) = 760 Torr = 1,013 25 bar = $1{,}013\,25 \cdot 10^5\,\mathrm{Pa} = 101{,}325\,\mathrm{kPa}$ | | ug | + |
| Meter Wassersäule (mWS) = 0,1 at = 9,806 65 kPa | | ug | – |
| pound-force per square inch ($\mathrm{lbf/in^2}$) = psi = 6,894 76 kPa | | a | – |

**Elastizitätsmodul → Spannung, mechanische**

| **Elektrizitätsmenge, Ladung** ***Q*** | | T I |
|---|---|---|
| Coulomb (C) = A · s | SI | + |
| Amperestunde (Ah) = 3 600 A · s = 3 600 C = 3,6 kC | g | / |

**Energie → Arbeit**

| **Energiedosis** ***D*** | | $L^2\,T^{-2}$ |
|---|---|---|
| Gray (Gy) = J/kg = $m^2/s^2$ | SI | + |
| Rad (rd) = $10^{-2}$ Gy = 10 mGy | ug | + |

| **Energiedosisleistung** ***Ḋ*** | | $L^2\,T^{-3}$ |
|---|---|---|
| Gray/Sekunde (Gy/s) = W/kg = $m^2/s^3$ | SI | / |
| Rad/Sekunde (rd/s) = $10^{-2}$ W/kg = $10^{-2}$ Gy/s = 10 mGy/s | ug | / |

**Entropie → Wärmekapazität**

**Federkonstante → Richtgröße**

| **Feldstärke, elektrische** ***E*** | | $L\,M\,T^{-3}\,I^{-1}$ |
|---|---|---|
| Volt/Meter (V/m) = kg · m/($s^3$ · A) | SI | / |
| Newton/Coulomb (N/C) = V/m | SI | / |
| Volt/Zentimeter (V/cm) = $10^2$ V/m | VT | / |

| **Feldstärke, magnetische** ***H*** | | $L^{-1}\,I$ |
|---|---|---|
| Ampere/Meter (A/m) | SI | / |
| Newton/Weber (N/Wb) = A/m | SI | / |
| Oersted (Oe) = 79,577 5 A/m | ug | / |

| **Fläche, Flächeninhalt** ***A*** | | $L^2$ |
|---|---|---|
| Quadratmeter ($m^2$) | SI | – |
| Ar (a) = 100 $m^2$ | (g) | + |
| Hektar (ha) = 100 a = $10^4$ $m^2$ | (g) | – |
| Barn (b) = $10^{-28}$ $m^2$ = 100 $fm^2$ | (g) | + |
| square mile ($mi^2$) = 3,097 6 · $10^6$ $yd^2$ = 2,589 988 $km^2$ | a | – |
| square yard ($yd^2$) = 9 $ft^2$ = 1 296 $in^2$ = 0,836 13 $m^2$ | a | – |
| square foot ($ft^2$) = 144 $in^2$ = 0,092 903 $m^2$ = 9,290 3 $dm^2$ | a | – |
| square inch ($in^2$) = 0,645 16 · $10^{-3}$ $m^2$ = 6,451 6 $cm^2$ | a | – |
| acre (a) = 4 046,86 $m^2$ | a | – |
| circular foot (circ ft) = 7,297 · $10^{-2}$ $m^2$ = 729,7 $cm^2$ | a | – |
| circular inch (circ in) = 5,067 · $10^{-4}$ $m^2$ = 5,067 $cm^2$ | a | – |
| circular mil (circ mil) = 5,067 · $10^{-10}$ $m^2$ = 506,7 µ$m^2$ | a | – |

**Flächenladungsdichte → Flussdichte, elektrische**

| **Fluss, magnetischer** ***Φ*** | | $L^2\,M\,T^{-2}\,I^{-1}$ |
|---|---|---|
| Weber (Wb) = V · s = kg · $m^2$/($s^2$ · A) | SI | + |
| Maxwell (M) = $10^{-8}$ Wb = 10 nWb | ug | + |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Flussdichte, elektrische** ***D*** | | $L^{-2}TI$ | |
| **Flächenladungsdichte** ***σ*** | | | |
| Coulomb/Quadratmeter ($C/m^2$) = $A \cdot s/m^2$ | | SI | / |
| **Flussdichte, magnetische** ***B*** | | $MT^{-2}I^{-1}$ | |
| **Induktion, magnetische** ***B*** | | | |
| Tesla (T) = $Wb/m^2 = V \cdot s/m^2 = kg/(s^2 \cdot A)$ | | SI | + |
| Gauß (G) = $10^{-4}$ T = 0,1 mT | | ug | + |
| **Frequenz** ***f*** | | $T^{-1}$ | |
| **Drehzahl** ***n*** | | | |
| **Umdrehungsfrequenz** ***f*** | | | |
| Hertz (Hz) = 1/s | | SI | + |
| Umdrehung/Sekunde (U/s) = 1/s | | ○ | – |
| Umdrehung/Minute (U/min) = $1{,}666\,7 \cdot 10^{-2}$ 1/s | | ○ | – |
| **Geschwindigkeit** ***v*** | | $LT^{-1}$ | |
| Meter/Sekunde (m/s) | | SI | / |
| Kilometer/Stunde (km/h) = 1/3,6 m/s = 0,277 8 m/s | | g | – |
| Knoten (kn) = sm/h = 0,514 4 m/s = 1,852 km/h | | o | – |
| Mach = 1 192 km/h = 331 m/s | | o | – |
| inch per second (in/s) = ips = 0,025 4 m/s = 0,091 44 km/h | | a | – |
| foot per second (ft/s) = 0,304 8 m/s = 1,097 3 km/h | | a | – |
| yard per second (yd/s) = 0,914 4 m/s = 3,292 km/h | | a | – |
| mile per hour (mi/hr) = mph = 0,447 m/s = 1,609 km/h | | a | – |
| **Gewichtskraft** → **Kraft** | | | |
| **Heizwert, spezifischer** ***H*** | | $L^2T^{-2}$ | |
| Joule/Kilogramm (J/kg) = $m^2/s^2$ | | SI | / |
| kcal/kg = 4 186,8 J/kg = 4,186 8 kJ/kg | | ug | – |
| **Impuls** ***p*** | | $LMT^{-1}$ | |
| Newtonsekunde (N · s) = kg · m/s | | SI | / |
| **Induktion, magnetische** → **Flussdichte, magnetische** | | | |
| **Induktivität** ***L*** | | $L^2MT^{-2}I^{-2}$ | |
| Henry (H) = $Wb/A = kg \cdot m^2/(s^2 \cdot A^2)$ | | SI | + |
| **Ionendosis** ***J*** | | $M^{-1}TI$ | |
| Coulomb/Kilogramm (C/kg) = A · s/kg | | SI | / |
| Röntgen (R) = $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ C/kg = 258 µC/kg | | ug | + |
| **Ionendosisleistung** $\dot{J}$ | | $M^{-1}I$ | |
| Ampere/Kilogramm (A/kg) | | SI | / |
| Röntgen/Sekunde (R/s) = $2{,}58 \cdot 10^{-4}$ A/kg = 0,258 mA/kg | | ug | / |
| **Kapazität, elektrische** ***C*** | | $L^{-2}M^{-1}T^4I^2$ | |
| Farad (F) = $C/V = s^4 \cdot A^2/(kg \cdot m^2)$ | | SI | + |
| **Kompressionsmodul** → **Spannung, mechanische** | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Kraft** $F$ | | | $\mathrm{L\,M\,T^{-2}}$ |
| **Gewichtskraft** $F_G, G$ | | | |
| Newton (N) $= \mathrm{J/m} = \mathrm{kg \cdot m/s^2}$ | | SI | + |
| Kilopond (kp) $= 9{,}806\,65$ N | | ug | – |
| Pond (p) $= 9{,}806\,65 \cdot 10^{-3}$ N $= 9{,}806\,65$ mN | | ug | + |
| Dyn (dyn) $= 10^{-5}$ N $= 10\,\mu$N | | ug | + |
| poundal (pdl) $= 0{,}138\,255$ N | | a | – |
| pound-force (lbf) $= 4{,}448\,22$ N | | a | – |
| long ton-force (tonf) $= 9\,964{,}02$ N $= 9{,}964\,02$ kN | | a | – |
| short ton-force (sh tonf) $= 8\,896{,}44$ N $= 8{,}896\,44$ kN | | a | – |
| **Kraftmoment** → **Drehmoment** | | | |
| **Kreisfrequenz** $\omega$ | | | $\mathrm{T^{-1}}$ |
| 1/Sekunde (1/s) | | SI | / |
| **Ladung** → **Elektrizitätsmenge** | | | |
| **Länge** $l$**, Weg** $s$**, Radius** $r$**, Höhe** $h$ | | | L |
| Meter (m) | | SI | + |
| astronomische Einheit (AE) $= 1{,}496\,00 \cdot 10^{11}$ m $= 149{,}600$ Gm | | o | – |
| Lichtjahr (ly) $= 9{,}460\,5 \cdot 10^{15}$ m | | o | + |
| Parsec (pc) $= 3{,}085\,7 \cdot 10^{16}$ m $= 30{,}857$ Pm | | o | + |
| Seemeile (sm) $= 1\,852$ m $= 1{,}852$ km | | o | – |
| Angström (Å) $= 10^{-10}$ m $= 0{,}1$ nm | | ug | – |
| X-Einheit (XE) $= 1{,}002\,02 \cdot 10^{-13}$ m $= 0{,}100\,202$ pm | | ug | – |
| Zoll (″) $= 0{,}025\,4$ m $= 25{,}4$ mm | | ug | – |
| mile (mi) $= 1\,609{,}344$ m $= 1{,}609\,344$ km | | a | – |
| yard (yd) $= 0{,}914\,4$ m $= 91{,}44$ cm | | a | – |
| foot (ft) $= 0{,}304\,8$ m $= 30{,}48$ cm | | a | – |
| inch (in) $= 0{,}025\,4$ m $= 25{,}4$ mm | | a | – |
| Fermi (f) $= 10^{-15}$ m $= 1$ fm | | ug | – |
| **Längenausdehnungskoeffizient** $\alpha$ | | | $\Theta^{-1}$ |
| 1/Kelvin ($\mathrm{K^{-1}}$) | | SI | – |
| **Leistung** $P$ | | | $\mathrm{L^2\,M\,T^{-3}}$ |
| Watt (W) $= \mathrm{J/s} = \mathrm{kg \cdot m^2/s^3}$ | | SI | + |
| Var (var) $= \mathrm{W} = \mathrm{kg \cdot m^2/s^3}$ | | (g) | + |
| kpm/s $= 9{,}806\,65$ W | | ug | / |
| Pferdestärke (PS) $= 735{,}498\,75$ W | | ug | – |
| Kalorie/Sekunde (cal/s) $= 4{,}186\,8$ W | | ug | / |
| Kilokalorie/Stunde (kcal/h) $= 1{,}163$ W | | ug | – |
| foot-pound-force per second (ft · lbf/s) $= 1{,}355\,8$ W | | a | – |
| inch-pound-force per second (in · lbf/s) $= 0{,}112\,98$ W | | a | – |
| yard-pound-force per second (yd · lbf/s) $= 4{,}067\,45$ W | | a | – |
| foot-poundal per second (ft · pdl/s) $= 42{,}14$ mW | | a | – |
| horse-power (hp) $= 745{,}7$ W | | a | – |
| British thermal unit per second (Btu/s) $= 1{,}055\,06$ kW | | a | – |
| British thermal unit per hour (Btu/h) $= 0{,}293$ W | | a | – |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Leitfähigkeit, elektrische** $\varkappa$ | | $L^{-3}\,M^{-1}\,T^{3}\,I^{2}$ | |
| Siemens/Meter (S/m) $= 1/(\Omega \cdot m) = s^3 \cdot A^2/(kg \cdot m^3)$ | | SI | / |
| **Leitwert, elektrischer** $G$ | | $L^{-2}\,M^{-1}\,T^{3}\,I^{2}$ | |
| Siemens (S) $= 1/\Omega = A/V = s^3 \cdot A^2/(kg \cdot m^2)$ | | SI | + |
| **Leuchtdichte** $L$ | | $L^{-2}\,J$ | |
| Candela/Quadratmeter (cd/m$^2$) | | SI | / |
| Stilb (sb) $= cd/cm^2 = 10^4\,cd/m^2 = 10\,kcd/m^2$ | | ug | + |
| Apostilb (asb) $= 1/\pi\,cd/m^2 = 0{,}318\,31\,cd/m^2$ | | ug | – |
| lambert (la) $= 1/\pi$ sb $= 10^4$ asb $= 3{,}183 \cdot 10^3\,cd/m^2 = 1\,kcd/m^2$ | | a | – |
| foot-lambert (ft · la) $= 1/\pi\,cd/ft^2 = 3{,}426\,cd/m^2$ | | a | – |
| candela per square foot (cd/ft$^2$) $= 10{,}76\,cd/m^2$ | | a | – |
| candela per square inch (cd/in$^2$) $= 1{,}550\,kcd/m^2$ | | a | – |
| **Lichtmenge** $Q$ | | T J | |
| Lumensekunde (lm · s) $=$ cd · sr · s | | SI | + |
| **Lichtstärke** $I$ | | J | |
| Candela (cd) | | SI | + |
| **Lichtstrom** $\Phi$ | | J | |
| Lumen (lm) $=$ cd · sr | | SI | + |
| **Masse** $m$ | | M | |
| Kilogramm (kg) | | SI | – |
| Gramm (g) $= 10^{-3}$ kg | | g | + |
| Tonne (t) $= 10^3$ kg $= 1$ Mg | | g | + |
| atomare Masseneinheit (u) $= 1{,}660\,539 \cdot 10^{-27}$ kg | | (g) | + |
| metrisches Karat (Kt) $= 2 \cdot 10^{-4}$ kg $= 0{,}2$ g $= 200$ mg | | (g) | – |
| long ton (lg tn, l tn) $=$ ton $= 2\,240$ lb $= 1{,}016\,047$ t | | a | – |
| short ton (sh tn) $= 2\,000$ lb $= 0{,}907\,185$ t | | a | – |
| pound (lb) $= 16$ oz $= 0{,}453\,592$ kg | | a | – |
| ounce (oz) $= 0{,}028\,349\,5$ kg $= 28{,}349\,5$ g | | a | – |
| **Masse, molare** $M$ | | $M\,N^{-1}$ | |
| Kilogramm/Mol (kg/mol) | | SI | / |
| **Oberflächenspannung** $\sigma$ | | $M\,T^{-2}$ | |
| Newton/Meter (N/m) $= kg/s^2$ | | SI | / |
| Dyn/Zentimeter (dyn/cm) $= 10^{-3}$ N/m $= 1$ mN/m | | ug | / |
| **Permeabilität** $\mu$ | | $L\,M\,T^{-2}\,I^{-2}$ | |
| Henry/Meter (H/m) $= V \cdot s/(A \cdot m) = kg \cdot m/(s^2 \cdot A^2)$ | | SI | / |
| **Permittivität** $\varepsilon$ | | $L^{-3}\,M^{-1}\,T^{4}\,I^{2}$ | |
| **Dielektrizitätskonstante** | | | |
| Farad/Meter (F/m) $= A \cdot s/(V \cdot m) = A^2 \cdot s^4/(kg \cdot m^3)$ | | SI | / |
| **Raumwinkel** $\Omega$ | | | |
| Steradiant (sr) $= m^2/m^2 = 1$ | | SI | + |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Richtgröße, Federkonstante** ***k*** | | $\mathrm{M\,T^{-2}}$ | |
| Newton/Meter (N/m) = $\mathrm{kg/s^2}$ | | SI | / |
| Kilopond/Zentimeter (kp/cm) = 980,665 N/m | | ug | / |
| Kilopond/Meter (kp/m) = 9,806 65 N/m | | ug | / |
| **Richtmoment** → **Winkelrichtgröße** | | | |
| **Schalldruck** ***p*** | | $\mathrm{L^{-1}\,M\,T^{-2}}$ | |
| Pascal (Pa) = $\mathrm{N/m^2 = kg/(m \cdot s^2)}$ | | SI | + |
| Mikrobar (µbar) = 0,1 Pa | | g | − |
| **Schallintensität** ***J*** | | $\mathrm{M\,T^{-3}}$ | |
| Watt/Quadratmeter ($\mathrm{W/m^2}$) = $\mathrm{J/(s \cdot m^2) = kg/s^3}$ | | SI | / |
| **Schmelzwärme, spezifische** → **Wärme, spezifische** | | | |
| **Schubmodul** → **Spannung, mechanische** | | | |
| **Spannung, elektrische** ***U*** | | $\mathrm{L^2\,M\,T^{-3}\,I^{-1}}$ | |
| Volt (V) = $\mathrm{W/A = kg \cdot m^2/(s^3 \cdot A)}$ | | SI | + |
| **Spannung, magnetische** ***V*** | | I | |
| Ampere (A) | | SI | + |
| **Spannung, mechanische** ***σ*** | | $\mathrm{L^{-1}\,M\,T^{-2}}$ | |
| **Elastizitätsmodul** ***E*** | | | |
| **Kompressionsmodul** ***K*** | | | |
| **Schubmodul** ***G*** | | | |
| Pascal (Pa) = $\mathrm{N/m^2 = kg/(s^2 \cdot m)}$ | | SI | + |
| $\mathrm{kp/mm^2 = 9{,}806\,65 \cdot 10^6\ N/m^2 = 9{,}806\,65\ MPa}$ | | ug | − |
| $\mathrm{kp/cm^2 = 9{,}806\,65 \cdot 10^4\ N/m^2 = 98{,}066\,5\ kPa}$ | | ug | − |
| **Stoffmenge** ***n*** | | N | |
| Mol (mol) | | SI | + |
| **Strahldichte** $L_e$ | | $\mathrm{M\,T^{-3}}$ | |
| $\mathrm{W/(sr \cdot m^2) = kg/(s^3 \cdot sr)}$ | | SI | / |
| **Strahlstärke** $I_e$ | | $\mathrm{L^2\,M\,T^{-3}}$ | |
| Watt/Steradiant (W/sr) = $\mathrm{kg \cdot m^2/(s^3 \cdot sr)}$ | | SI | / |
| **Strahlungsfluss** $\Phi_e$ | | $\mathrm{L^2\,M\,T^{-3}}$ | |
| **Strahlungsleistung** | | | |
| Watt (W) = $\mathrm{kg \cdot m^2/s^3}$ | | SI | + |
| **Stromdichte, elektrische** ***J*** | | $\mathrm{L^{-2}\,I}$ | |
| Ampere/Quadratmeter ($\mathrm{A/m^2}$) | | SI | / |
| **Stromstärke, elektrische** ***I*** | | I | |
| Ampere (A) | | SI | + |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Temperatur, thermodynamische (absolute)** $T$ | | | $\Theta$ |
| Kelvin (K) | | SI | + |
| Grad Kelvin (°K) = K | | ug | – |
| degree Rankine (°R) = 5/9 K | | a | – |
| degree Fahrenheit (°F); $n$ °F = 5/9($n$ − 32) °C | | a | – |
| **Temperatur, Celsius-** $\vartheta$ | | | $\Theta$ |
| Grad Celsius (°C); $\vartheta = T - T_0$; $T_0$ = 273,15 K | | SI | – |
| **Temperaturdifferenz** $\Delta T, \Delta\vartheta$ | | | $\Theta$ |
| Kelvin (K) | | SI | + |
| Grad Celsius (°C) = K | | SI | – |
| Grad (grd) = K | | ug | – |
| **Trägheitsmoment** $J$ | | | $L^2$ M |
| Kilogramm-Quadratmeter (kg · m$^2$) | | SI | / |
| **Umdrehungsfrequenz → Frequenz** | | | |
| **Verdampfungswärme, spezifische → Wärme, spezifische** | | | |
| **Verschiebungsdichte → Flussdichte, elektrische** | | | |
| **Viskosität, dynamische** $\eta$ | | | $L^{-1}$ M $T^{-1}$ |
| Pascalsekunde (Pa · s) = N · s/m$^2$ = kg/(m · s) | | SI | / |
| Poise (P) = 0,1 Pa · s | | ug | + |
| Zentipoise (cP) = $10^{-3}$ Pa · s = 1 mPa · s | | ug | – |
| **Viskosität, kinematische** $\nu$ | | | $L^2$ $T^{-1}$ |
| Quadratmeter/Sekunde (m$^2$/s) | | SI | / |
| Stokes (St) = $10^{-4}$ m$^2$/s = cm$^2$/s | | ug | + |
| Zentistokes (cSt) = $10^{-6}$ m$^2$/s = mm$^2$/s | | ug | – |
| **Volumen** $V$ | | | $L^3$ |
| Kubikmeter (m$^3$) | | SI | – |
| Liter ($\ell$, l, L) = $10^{-3}$ m$^3$ = 1 dm$^3$ | | g | + |
| cubic yard (yd$^3$) = 27 ft$^3$ = 46 656 in$^3$ = 0,764 555 m$^3$ | | a | – |
| cubic foot (ft$^3$) = 1 728 in$^3$ = 2,831 685 · $10^{-2}$ m$^3$ = 28,316 85 dm$^3$ | | a | – |
| cubic inch (in$^3$) = 1,638 706 · $10^{-5}$ m$^3$ = 16,387 06 cm$^3$ | | a | – |
| register ton (reg. ton) = 100 ft$^3$ = 2,831 7 m$^3$ | | a | – |
| bushel (UK) (bushel) = 8 gal (UK) = 36,369 dm$^3$ | | a | – |
| gallon (UK) (gal) = 4,546 dm$^3$ | | a | – |
| bushel (US) (bu) = 35,239 dm$^3$ | | a | – |
| gallon (US) (gal) = 3,785 dm$^3$ | | a | – |
| **Volumen, molares** $V_m$ | | | $L^3$ $N^{-1}$ |
| Kubikmeter/Mol (m$^3$/mol) | | SI | / |
| **Volumenausdehnungskoeffizient** $\gamma$ | | | $\Theta^{-1}$ |
| 1/Kelvin (K$^{-1}$) | | SI | – |
| **Wärme(menge) → Arbeit** | | | |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Wärme, spezifische** ***q*** | | $L^2\,T^{-2}$ | |
| Joule/Kilogramm (J/kg) = $m^2/s^2$ | | SI | / |
| Kalorie/Gramm (cal/g) = kcal/kg = 4 186,8 J/kg = 4,186 8 kJ/kg | | ug | – |
| **Wärmedurchgangskoeffizient** ***k, U*** | | $M\,T^{-3}\,\Theta^{-1}$ | |
| **Wärmeübergangskoeffizient** ***α, h*** | | | |
| $W/(m^2 \cdot K) = kg/(s^3 \cdot K)$ | | SI | / |
| kcal/($m^2$ · h · grd) = 1,163 W/($m^2$ · K) | | ug | / |
| cal/($cm^2$ · s · grd) = 4,186 8 · $10^4$ W/($m^2$ · K) = 41,868 kW/($m^2$ · K) | | ug | / |
| **Wärmekapazität** ***C*** | | $L^2\,M\,T^{-2}\,\Theta^{-1}$ | |
| **Entropie** ***S*** | | | |
| Joule/Kelvin (J/k) = W · s/K = N · m/K = kg · $m^2/(s^2 \cdot K)$ | | SI | / |
| Kilokalorie/Grad (kcal/grd) = 4 186,8 J/K = 4,186 8 kJ/K | | ug | / |
| Kalorie/Grad (cal/grd) = 4,186 8 J/K | | ug | / |
| **Wärmekapazität, molare** $C_m$ | | $L^2\,M\,T^{-2}\,\Theta^{-1}\,N^{-1}$ | |
| J/(mol · K) = kg · $m^2/(s^2 \cdot mol \cdot K)$ | | SI | / |
| **Wärmekapazität, spezifische** ***c*** | | $L^2\,T^{-2}\,\Theta^{-1}$ | |
| J/(kg · K) = $m^2/(s^2 \cdot K)$ | | SI | / |
| kcal/(kg · grd) = cal/(g · grd) = 4 186,8 J/(kg · K) = 4,186 8 kJ/(kg · K) | | ug | / |
| **Wärmeleitfähigkeit** ***λ*** | | $L\,M\,T^{-3}\,\Theta^{-1}$ | |
| $W/(m \cdot K) = kg \cdot m/(s^3 \cdot K)$ | | SI | / |
| kcal/(m · h · grd) = 1,163 W/(m · K) | | ug | / |
| cal/(cm · s · grd) = 418,68 W/(m · K) | | ug | / |
| **Widerstand, elektrischer** ***R*** | | $L^2\,M\,T^{-3}\,I^{-2}$ | |
| Ohm (Ω) = V/A = kg · $m^2/(s^3 \cdot A^2)$ | | SI | + |
| **Widerstand, spezifischer elektrischer** ***ϱ*** | | $L^3\,M\,T^{-3}\,I^{-2}$ | |
| Ohmmeter (Ω · m) = V · m/A = kg · $m^3/(s^3 \cdot A^2)$ | | SI | + |
| Ohmzentimeter (Ω · cm) = $10^{-2}$ Ω · m | | VT | / |
| Ω · $mm^2$/m = $10^{-6}$ Ω · m = μΩ · m | | VT | / |
| **Winkel, ebener** ***α, φ, ...*** | | | |
| Radiant (rad) = m/m = 1 | | SI | + |
| Grad (°) = (π/180) rad = 17,453 29 mrad | | g | – |
| Minute (′) = 1°/60 = 0,290 888 2 mrad | | g | – |
| Sekunde (″) = 1′/60 = 1°/3 600 = 4,848 14 μrad | | g | – |
| Gon (gon) = (π/200) rad = 0,9° = 15,707 96 mrad | | g | + |
| Neugrad (g) = (π/200) rad = 1 gon | | ug | – |
| Neuminute (c) = (π/2 · $10^4$) rad = 10 mgon | | ug | – |
| Neusekunde (cc) = (π/2 · $10^6$) rad = 0,1 mgon | | ug | – |
| degree (d) = 1,745 329 · $10^{-2}$ rad = 17,453 29 mrad | | a | – |
| degré (°, d) = 1,745 329 · $10^{-2}$ rad = 17,453 29 mrad | | a | – |

| | | |
|---|---|---|
| **Winkelbeschleunigung $\alpha$** | | $T^{-2}$ |
| Radiant/Sekundenquadrat (rad/s$^2$) = 1/s$^2$ | SI | / |
| Grad/Sekundenquadrat (°/s$^2$) = 1,745 329 · 10$^{-2}$ rad/s$^2$ = 17,453 29 mrad/s$^2$ | g | – |
| **Winkelgeschwindigkeit $\omega$** | | $T^{-1}$ |
| Radiant/Sekunde (rad/s) = 1/s | SI | / |
| Grad/Sekunde (°/s) = 1,745 329 · 10$^{-2}$ rad/s = 17,453 29 mrad/s | g | – |
| **Winkelrichtgröße $D$** | | $L^2\,M\,T^{-2}$ |
| **Richtmoment** | | |
| Newtonmeter/Radiant (N · m/rad) = kg · m$^2$/s$^2$ | SI | / |
| Kilopondmeter/Radiant (kp · m/rad) = 9,806 65 N · m/rad | ug | / |
| Pondzentimeter/Grad (p · cm/°) = 5,618 797 mN · m/rad | ug | / |
| **Zeit $t$** | | T |
| Sekunde (s) | SI | + |
| Minute (min) = 60 s | g | – |
| Stunde (h) = 60 min = 3 600 s | g | – |
| Tag (d) = 24 h = 1 440 min = 86 400 s | g | – |
| **Zerfallskonstante $\lambda$** | | $T^{-1}$ |
| 1/Sekunde (1/s) | SI | / |

# MECHANIK M

## 4 Basiseinheiten der Mechanik



### 4.1 Einheit der Länge

**SI-Einheit der Länge:** $[l] = \text{Meter (m)}$.

Grundlage der Längenmessung war das Urmeter, ein in Paris aufbewahrter Stab aus einer Platin-Iridium-Legierung. Die Länge dieses Stabes sollte gleich dem zehnmillionsten Teil eines Erdmeridianquadranten (Längengrad zwischen Pol und Äquator) sein. 1962 wurde ein Meter als die Länge von 1 650 763,73 Wellenlängen der gelben Strahlung des Atoms Krypton 86 im Vakuum festgelegt. Seit 1983 wird das Meter über die Vakuumlichtgeschwindigkeit definiert.

Der Meter ist der Weg, den das Licht im Vakuum innerhalb von 1/299 792 458 Sekunde durchläuft.

***Umrechnung:***

| | | |
|---|---|---|
| $10^{-3}$ km = **1 m** = 10 dm = 100 cm = $10^3$ mm = $10^6$ µm (Mikrometer) = $10^9$ nm (Nanometer) = $10^{12}$ pm (Pikometer) | | |
| *SI-fremde Längen-Einheiten:* | | |
| 1 Seemeile | = 1 852 m | = 1,852 km |
| 1 astronomische Einheit (AE) | = 1,496 00 · $10^{11}$ m | = 149,600 Gm |
| 1 Lichtjahr (ly) | = 9,460 5 · $10^{15}$ m | = 9,460 5 Pm |
| 1 Parsec (pc) | = 3,085 7 · $10^{16}$ m | = 30,857 Pm |
| 1 Angström (Å) | = $10^{-10}$ m | = 100 pm |
| 1 X-Einheit (XE) | = 1,002 02 · $10^{-13}$ m | = 100,202 fm |
| 1 mile (mi) = 1 760 yd | = 1 609,344 m | = 1,609 344 km |
| 1 yard (yd) = 3 ft | = 0,914 4 m | = 91,44 cm |
| 1 foot (ft) = 12 in | = 0,304 8 m | = 30,48 cm |
| 1 inch (in) = Zoll (″) | = 0,025 4 m | = 25,4 mm |

***Beachte:***

- Die Bezeichnung „Mikron“ bzw. „My (μ)“ für $10^{-6}$ m = 1 Mikrometer (μm) ist *unzulässig*.

***Übersicht:***

| **Größen und Entfernungen in der Natur** | in m |
|---|---|
| Durchmesser eines Atomkerns | $1{,}5 \cdot 10^{-14}$ |
| Durchmesser eines Atoms | $3 \cdot 10^{-10}$ |
| Wellenlänge des sichtbaren Lichts | $5 \cdot 10^{-7}$ |
| Durchmesser der Erde | $1{,}3 \cdot 10^{7}$ |
| Entfernung Erde–Mond | $3{,}8 \cdot 10^{8}$ |
| Durchmesser der Sonne | $1{,}4 \cdot 10^{9}$ |
| Entfernung Erde–Sonne | $1{,}5 \cdot 10^{11}$ |
| Entfernung zum nächsten Fixstern | $4 \cdot 10^{16}$ |
| Durchmesser der Milchstraße | $7 \cdot 10^{20}$ |
| Grenze des Weltalls | $1 \cdot 10^{26}$ |

- Zum Messen von Längen werden hauptsächlich benutzt: Maßstäbe, Bandmaße und Parallelendmaße, Messschieber, Messschrauben und Messuhren, optische Methoden (Interferenz und Laufzeit von Licht), Radar- und Laserstrahlen.

### 4.1.1 Fläche

**SI-Einheit der Fläche:** $[A]$ = Quadratmeter ($m^2$),
*außerdem*: Ar (a), Hektar (ha) für die Fläche von Flur- und Grundstücken.

***Umrechnung:***

$10^{-6}\ km^2 = \mathbf{1\ m^2} = 10^2\ dm^2 = 10^4\ cm^2 = 10^6\ mm^2$
1 Ar (a) = 100 $m^2$
1 Hektar (ha) = 100 a = $10^4$ $m^2$

| *SI-fremde Flächen-Einheiten:* | | |
|---|---|---|
| 1 square mile ($mi^2$) | = $3{,}097\,6 \cdot 10^6$ $yd^2$ | = $2{,}589\,988 \cdot 10^6$ $m^2$ |
| | | = 2,589 988 $km^2$ |
| 1 square yard ($yd^2$) | = 9 $ft^2$ = 1 296 $in^2$ | = 0,836 1 $m^2$ |
| 1 square foot ($ft^2$) | = 144 $in^2$ | = 0,092 9 $m^2$ |
| | | = 9,29 $dm^2$ |
| 1 square inch ($in^2$) | | = $0{,}645\,2 \cdot 10^{-3}$ $m^2$ |
| | | = 6,452 $cm^2$ |

***Beachte:***

- Die Abkürzungen qcm für $cm^2$ (Quadratzentimeter),
  qm für $m^2$ (Quadratmeter),
  qkm für $km^2$ (Quadratkilometer)
  sind *unzulässig!*

■ Der Inhalt unregelmäßig begrenzter Flächen lässt sich mit dem Polarplanimeter bestimmen.



### 4.1.2 Volumen

**SI-Einheit des Volumens:** $[V]$ = Kubikmeter ($m^3$),
*außerdem:* Liter (l, $\ell$, L) = $10^{-3}\ m^3$.

***Umrechnung:***

| | | |
|---|---|---|
| **1 m³** = $10^3$ dm³ = $10^6$ cm³ = $10^9$ mm³ | | |
| 1 Liter ($\ell$) = 1 dm³ | Milliliter (m$\ell$) = 1 cm³ | |
| *SI-fremde Volumen-Einheiten:* | | |
| cubic yard (yd³) | = 27 ft³ = 46 656 in³ | = 0,764 6 m³ |
| cubic foot (ft³) | = 1 728 in³ | = 28,32 dm³ |
| cubic inch (in³) | | = 16,39 cm³ |
| register ton (reg. ton) | = 100 ft³ | = 2,832 m³ |
| bushel | = 8 gal (brit.) | = 36,37 dm³ |
| gallon (gal) brit. | | = 4,546 dm³ |
| gallon (gal) USA | | = 3,785 dm³ |

***Beachte:***

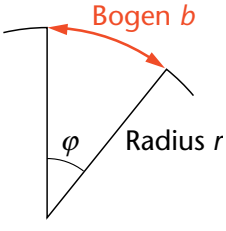
- Die Abkürzungen cbm für $m^3$ (Kubikmeter),
  cdm für $dm^3$ (Kubikdezimeter),
  ccm für $cm^3$ (Kubikzentimeter)
  sind *unzulässig!*

■ Das Volumen unregelmäßig geformter fester Körper kann z. B. mit einem Überlaufgefäß oder durch Auftriebsmessung in einer Flüssigkeit mit bekannter Dichte bestimmt werden.

### 4.1.3 Winkel

Der Winkel wird definiert als das Verhältnis des von den Winkelschenkeln eingeschlossenen Kreisbogens zum Radius:

$\varphi = \frac{b}{r}$ rad (früher als *Bogenmaß* bezeichnet).



**SI-Einheit des Winkels:** $[\varphi]$ = Radiant (rad) = m/m = 1,
*außerdem:* Grad (°),
(Winkel-)Minute (′),
(Winkel-)Sekunde (″).

1 Vollwinkel = 2π rad = 360°.

***Umrechnung:***

| 1 Grad (°) = 60 Minuten (′) = 3 600 Sekunden (″) | | |
|---|---|---|
| 360° = 2π rad = 6,283 rad | 1° = 17,45 mrad | 1 rad = 57,3° |
| 180° = π rad = 3,142 rad | 1′ = 290,9 µrad | 1 mrad = 3,438′ |
| 90° = π/2 rad = 1,571 rad | 1″ = 4,848 µrad | 1 µrad = 0,206 3″ |

***Beachte:***

- Die Einheit Radiant muss bei Winkelangaben nur mitgeschrieben werden, wenn Verwechslungen mit Grad möglich sind. Da der Radiant ein Streckenverhältnis ist, ist der Quotient der Einheiten gleich eins.
- Eine weitere gesetzliche Einheit ist das Gon (gon). Es wird vor allem in der Geodäsie verwendet: 100 gon = 90° = 1,570 8 rad.
- Vorsätze für dezimale Vielfache und Teile sind unzulässig bei Grad, Minute und Sekunde.

Zum Messen dienen Winkelmesser, oft kombiniert mit einem Zielfernrohr (Theodolit).

## 4.2 Zeiteinheit

**SI-Einheit der Zeit:** $[t]$ = Sekunde (s).

Die Sekunde ist definiert als die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung des Atoms Caesium 133, die dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus im Grundzustand entspricht.

***Umrechnung:***

1 Tag (d) = 24 Stunden (h) = 1 440 Minuten (min) = 86 400 Sekunden (s)
1 Stunde (h) = 60 min = 3 600 s
1 Jahr (a) = 365 d = 8 760 h = $5{,}256 \cdot 10^5$ min = $31{,}536 \cdot 10^6$ s = 31,536 Ms

***Beachte:***

- Vorsätze für dezimale Teile und Vielfache dürfen nur bei der Zeiteinheit Sekunde (s) verwendet werden.

- *Unzulässige* Abkürzungen für die Sekunde sind sec oder sek. Richtig: s.

■ Zum Messen bzw. Vergleich der Zeit dienen periodisch verlaufende Vorgänge, z. B. Schwingungen: Pendeluhren, Quarzuhren; ferner Atom- und Moleküluhren (Maser). Für lange Zeiträume eignet sich der radioaktive Zerfall von Atomkernen mit sehr großer Halbwertszeit.

„Funkuhren“ erhalten ein Zeit- und Datumssignal von einem Zeitzeichensender. Das Funksignal wird von einer Atomuhr (Cäsium-Zeitbasis) gesteuert.



## 4.3 Masseneinheit

**SI-Einheit der Masse:** $[m]$ = Kilogramm (kg).

Das Kilogramm wurde ursprünglich definiert als die Masse des internationalen Kilogrammprototyps, eines in Paris aufbewahrten Zylinders aus Platin-Iridium von 39 mm Höhe und 39 mm Durchmesser. Seit 2019 ist das Kilogramm mit der Planck-Konstante und den Definitionen der Sekunde und des Meters verknüpft.

***Umrechnung:***

| | |
|---|---|
| **1 kg** = $10^3$ g = $10^6$ mg (Milligramm) = $10^9$ µg (Mikrogramm) | |
| 1 Dekagramm (dag)*) = 10 g | |
| 1 Tonne (t) = 1 Megagramm (Mg) = 10 Dezitonnen (dt) = $10^3$ kg | |
| 1 Dezitonne = 100 kg | |
| *SI-fremde Massen-Einheiten:* | |
| 1 long ton (l tn) = 2 240 lb | = 1 016,05 kg = 1,016 05 t |
| 1 short ton (sh tn) = 2 000 lb | = 907,2 kg = 0,907 2 t |
| 1 slug (slug) = 1 lbf/(ft · $s^2$) = 32,174 lb | = 14,594 kg |
| 1 pound (lb) = 16 oz | = 0,453 6 kg = 453,6 g |
| 1 ounce (oz) | = 0,028 35 kg = 28,35 g |

*) Besonders in Polen, Ungarn, Österreich, der Tschechischen und der Slowakischen Republik gebräuchlich; manchmal abgekürzt mit dkg.

***Beachte:***

- Die Masseneinheit Karat (Kt, auch: k, ct) wird für den Handel mit Edelsteinen und Perlen verwendet: 1 Kt = 0,2 g.
- Bei Gold bedeutet 1 Karat, dass 1/24 des Materials aus Gold besteht; reines Gold hat demnach 24 Karat.

■ Massen werden durch Vergleich mit geeichten Massestücken bestimmt, am einfachsten mit Balkenwaagen.

# 5 Statik des starren Körpers

Ein Körper wird als starr bezeichnet, wenn die von außen auf ihn wirkenden Kräfte seine Gestalt nicht verändern. Kräfte sind *vektorielle* Größen. Sie werden bestimmt durch *Betrag, Richtung* und *Lage der Wirkungslinie*. Dargestellt werden sie durch Pfeile, deren Spitze die Richtung angibt und deren Länge ein Maß für die Größe der Kraft ist. Sie können am starren Körper nur entlang ihrer Wirkungslinie verschoben werden (**linienflüchtige Vektoren**).

**SI-Einheit der Kraft:** $[F] = \text{Newton (N)} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2$.
*Ungesetzliche* Einheiten: Kilopond (kp) $= 9{,}806\,65$ N,
Dyn (dyn) $= 10^{-5}$ N $= 10\,\mu$N.

Umrechnung von Krafteinheiten → hintere Einbandinnenseite.

## 5.1 Zusammensetzen von Kräften

Wirken mehrere Kräfte auf einen Körper, so kann man diese zu einer *Resultierenden* (Ersatzkraft) zusammensetzen. Die Einzelkräfte nennt man *Komponenten*. Das Vereinigen der Komponenten zu einer Resultierenden stellt eine geometrische Addition dar.

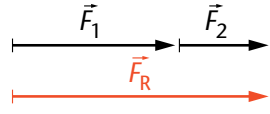
Schreibweise vektorieller Größen → [1.6].
Rechnen mit vektoriellen Größen → [1.7].

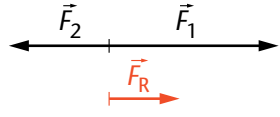
***Beachte:***

- In den folgenden Abschnitten sind Kräfte nur dann vektoriell geschrieben, wenn ihre Richtung zu beachten ist. **In allen anderen Fällen sind stets nur die Beträge gemeint.**

### 5.1.1 Kräfte mit gleicher Wirkungslinie

Besitzen mehrere Kräfte eine gemeinsame Wirkungslinie, so findet man die Resultierende als *Summe* oder *Differenz* der **Beträge** aller Einzelkräfte:




**algebraische Addition**

(M 5.1) $\boxed{F_R = F_1 + F_2}$

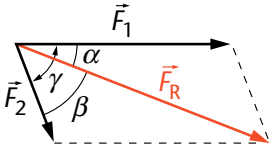
### 5.1.2 Kräfte mit gleichem Angriffspunkt

Zwei in *einem* Punkt angreifende Kräfte werden mit Hilfe des Kräfteparallelogramms zu einer Resultierenden vereinigt. Die Diagonale des Parallelogramms gibt *Betrag* und *Richtung* der resultierenden Kraft an:

**geometrische Addition**

(M 5.2) $$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

■ Die Resultierende kann auch berechnet werden.




Wenn
$F_R$ Betrag der resultierenden Kraft,
$F_1$ Betrag der Einzelkraft (Komponente) 1,
$F_2$ Betrag der Einzelkraft (Komponente) 2,
$\gamma$ Winkel zwischen den beiden Komponenten $= \alpha + \beta$,

dann gilt nach dem Kosinussatz der Trigonometrie

(M 5.3) $$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos\gamma}$$

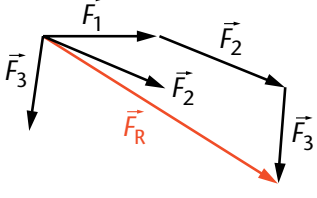
Die Richtung der Resultierenden ergibt sich aus dem Sinussatz

(M 5.4) $$\sin\alpha = \frac{F_2}{F_R}\sin\gamma \qquad \text{und} \qquad \sin\beta = \frac{F_1}{F_R}\sin\gamma$$

Bilden beide Kräfte einen rechten Winkel, so vereinfachen sich (M 5.3) und (M 5.4) mit $\cos 90^\circ = 0$ und $\sin 90^\circ = 1$ zu

(M 5.5) $$F_R = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} \qquad \text{und} \qquad \sin a = \frac{F_2}{F_R}$$

■ Wenn *mehr als zwei* Kräfte in einem Punkt angreifen, ist das Parallelogramm mehrere Male zu bilden, oder man benutzt besser das **Krafteck** (Kräftezug, Kräftepolygon). Man reiht alle Kraftvektoren unter Beachtung von *Größe* und *Richtung* aneinander. Die Resultierende aller Kräfte ist dann die Verbindung zwischen dem Anfang der ersten und dem Ende der letzten Kraft:



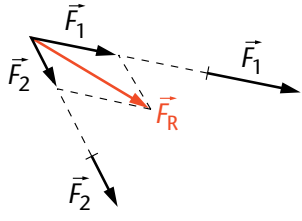

M

**geometrische Addition**

(M 5.6) $$\vec{F}_\mathrm{R} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \vec{F}_3 + \ldots$$

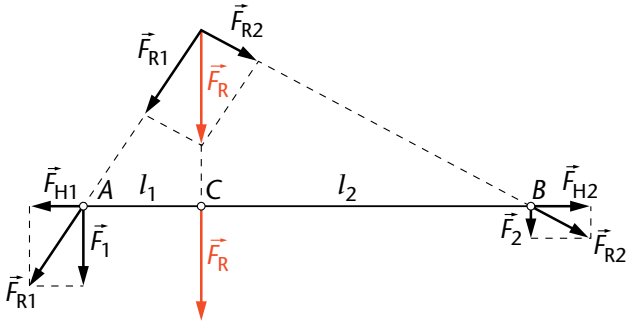
Das Krafteck ist geschlossen, wenn Anfang des ersten und Ende des letzten Kraftvektors zusammenfallen. Die Resultierende ist dann gleich null, d. h., alle Kräfte sind im Gleichgewicht, ihre Wirkungen heben sich auf.

### 5.1.3 Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten



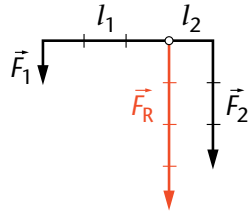

Solche Kräfte verschiebt man auf ihren Wirkungslinien bis zu deren Schnittpunkt. Dann kann das Kräfteparallelogramm in der üblichen Weise gebildet werden. Der Angriffspunkt der Resultierenden darf wieder längs ihrer Wirkungslinie verschoben werden. Die Konstruktion liefert nur *Betrag, Richtung* und *Wirkungslinie* der Resultierenden, nicht aber deren Angriffspunkt. Kraftvektoren sind linienflüchtig → [1.6].

### 5.1.4 Parallele Kräfte




Die Wirkungslinien paralleler Kräfte besitzen keinen Schnittpunkt. Deshalb fügt man jeder Komponente eine Hilfskraft zu. Beide Hilfskräfte müssen gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet sein, damit sie sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben.

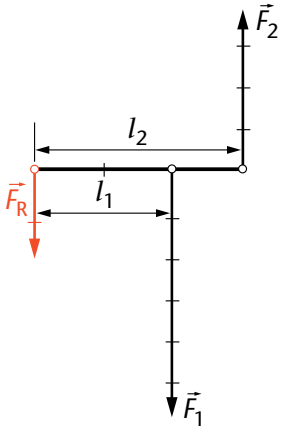
Dann werden die Resultierenden aus den Kräften und den Hilfskräften zur Gesamtresultierenden zusammengesetzt.




Die Resultierende kann auch berechnet werden. Ihr *Betrag* ist

$$F_\mathrm{R} = F_1 + F_2.$$

Die Wirkungslinie der Resultierenden teilt den Abstand der Kräfte im umgekehrten Verhältnis beider Kräfte:




**Die Abstände paralleler Kräfte zur Resultierenden verhalten sich umgekehrt wie die Kräfte selbst.**

(M 5.7) $$F_1 : F_2 = l_2 : l_1$$

***Beachte:***

- Bei antiparallelen Kräften (parallel, jedoch entgegengesetzt gerichtet) wendet man das gleiche Verfahren an. Die Resultierende liegt dann *außerhalb*, also nicht zwischen den Kräften, ihr Betrag ist $F_R = F_1 - F_2$.

## 5.2 Zerlegen von Kräften

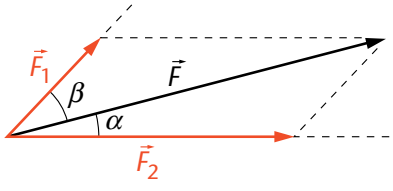
Eine Kraft kann in beliebig viele Komponenten zerlegt werden. Bei der wichtigen Zerlegung in zwei mit der Kraft in einer Ebene liegenden Komponenten müssen von diesen die *Richtungen* oder die *Größen* bekannt sein.

Meist kennt man die *Richtungen* der zu ermittelnden Komponenten. Ihre Wirkungslinien zieht man durch den Angriffspunkt der zu zerlegenden Kraft und konstruiert das Parallelogramm.

Die Komponenten können auch berechnet werden.

Wenn

$F$ Betrag der zu zerlegenden Kraft,
$F_1$ Betrag der Komponente 1,
$F_2$ Betrag der Komponente 2,
$\alpha$ Winkel zwischen $\vec{F}$ und $\vec{F}_2$,
$\beta$ Winkel zwischen $\vec{F}$ und $\vec{F}_1$,

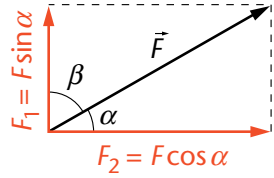



dann gilt

(M 5.8) $$F_1 = F\frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha+\beta)} \quad \text{und} \quad F_2 = F\frac{\sin\beta}{\sin(\alpha+\beta)}$$

- Oft ist es nötig, Kräfte in zwei zueinander *senkrechte* Komponenten zu zerlegen.

Wegen $\alpha + \beta = 90°$ und $\sin\beta = \cos\alpha$ vereinfacht sich (M 5.8) zu



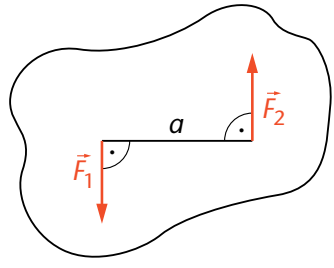

(M 5.9)
$$\begin{aligned} F_1 &= F\sin\alpha = F\cos\beta \\ F_2 &= F\cos\alpha = F\sin\beta \end{aligned}$$

***Beachte:***

- Liegen die Kräfte $F_1$ und $F_2$ parallel zu den Achsen eines rechtwinkligen Koordinatensystems, so werden sie häufig als $F_x$ und $F_y$ bezeichnet.

## 5.3 Drehmoment

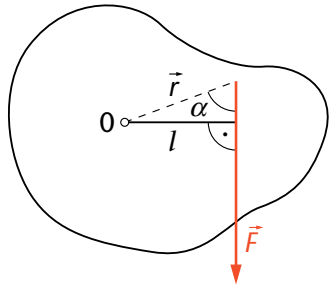
Wirkt eine Kraft auf einen drehbaren starren Körper, so erzeugt sie ein Drehmoment. Die Wirkung entspricht der eines *Kräftepaares*.




Unter einem Drehmoment versteht man das Produkt aus einer Kraft und dem senkrechten Abstand ihrer Wirkungslinie vom Drehpunkt.

**SI-Einheit des Drehmoments:** $[M]$ = Newtonmeter (N · m).
*Ungesetzliche* Einheiten: Kilopondmeter (kp · m) = 9,807 N · m
Pondzentimeter (p · cm) = $9{,}807 \cdot 10^{-5}$ N · m
= 98,07 µN · m.

Wenn
$M$ Drehmoment,
$F$ wirkende Kraft,
$r$ Abstand Drehpunkt–Angriffspunkt,
$l$ senkrechter Abstand Drehpunkt–Wirkungslinie der Kraft,
$\alpha$ Winkel zwischen $F$ und $r$,

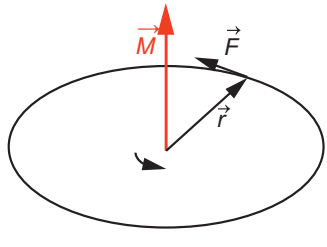



dann gilt

(M 5.10) $$M = Fl = Fr\sin\alpha$$

oder in vektorieller Schreibweise

(M 5.11) $$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$



Das Drehmoment $\vec{M}$ ist das Vektorprodukt aus Radiusvektor $\vec{r}$ und Kraft $\vec{F}$.

Das Drehmoment ist ein **axialer Vektor**. Er liegt in der Drehachse und weist bei Rechtsdrehung nach vorn (Schrauben- oder Korkenzieherregel). Seine Länge entspricht dem Betrag von $\vec{M}$. Axiale Vektoren sind an keine Wirkungslinie gebunden, sondern parallel verschiebbar (**freie Vektoren**).

Wirken auf einen drehbaren Körper *mehrere* Drehmomente, dann gilt der

**Momentensatz**:
Das resultierende Drehmoment ist gleich der Summe der einzelnen Drehmomente.

***Beachte:***

- Hierbei sind zwei Fälle zu unterscheiden:
  - Die Drehmomente wirken in gleicher Ebene. Ihre Summe ergibt sich aus einer **algebraischen Addition**, wobei linksdrehende Momente allgemein als *positiv*, rechtsdrehende als *negativ* bezeichnet werden.
  - Die Drehmomente wirken in verschiedenen Ebenen, die Drehachsen sind nicht parallel. Die Summe ergibt sich aus einer **geometrischen Addition**.

## 5.4 Gleichgewichtsbedingungen

Die auf einen starren Körper wirkenden Kräfte können sowohl eine fortschreitende Bewegung (Translation) als auch eine Drehbewegung (Rotation) erzeugen. Ein Körper ist im Gleichgewicht, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Die Resultierende aller wirkenden Kräfte muss gleich null sein.
- Die Summe aller Drehmomente muss gleich null sein.

Für Kräfte in einer Ebene gilt daher als

**Gleichgewichtsbedingung**

(M 5.12)
$$\sum \vec{F}_x = 0; \quad \sum \vec{F}_y = 0; \quad \sum \vec{M} = 0$$

also
$$\sum_{i=1}^{n} F_i \sin \alpha_i = 0; \quad \sum_{i=1}^{n} F_i \cos \alpha_i = 0; \quad \sum_{i=1}^{n} F_i l_i = 0$$

## 5.5 Einfache Maschinen

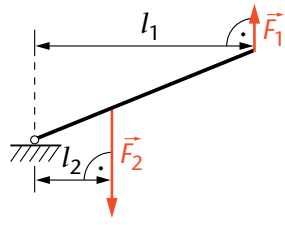
Sie haben die Aufgabe, bei bestimmten Arbeiten *Größe* oder *Richtung* der erforderlichen Kraft zu verändern. Nach (M 7.11) bezeichnet man das Produkt aus Kraft und Weg als Arbeit. Soll die Kraft verkleinert werden, muss dafür der Weg größer werden. Die Größe der Arbeit können diese Maschinen also nicht verändern. Es gilt die so genannte

**„Goldene Regel der Mechanik“:**
Was an Kraft gespart wird, muss an Weg zugesetzt werden.

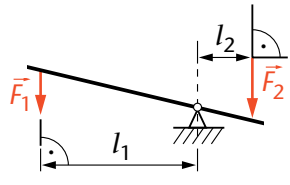
### 5.5.1 Hebel

Als Hebel bezeichnet man einen starren, um eine Achse drehbaren Körper.

Bei einem *einseitigen* Hebel liegt der Drehpunkt am Ende (antiparallele Kräfte) → [5.1.4].




Bei einem *zweiseitigen* Hebel liegt der Drehpunkt zwischen den angreifenden Kräften (parallele Kräfte) → [5.1.4].




Wenn

$F_1$ Kraft, die mit der Last $F_2$ im Gleichgewicht ist,
$F_2$ Last,
$l_1$ Kraftarm, senkrechter Abstand Wirkungslinie der Kraft–Drehpunkt,
$l_2$ Lastarm, senkrechter Abstand Wirkungslinie der Last–Drehpunkt,

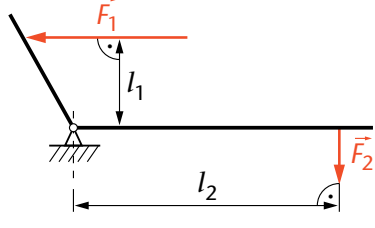
dann gilt das

**Hebelgesetz**

(M 5.13) $\boxed{F_1 l_1 = F_2 l_2}$ Kraft × Kraftarm = Last × Lastarm

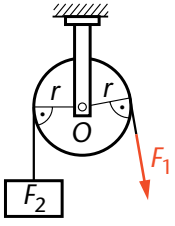
***Beachte:***

- Bei einem *Winkelhebel* bilden beide Hebelarme einen Winkel $< 180°$. Auch hier bedeuten $l_1$ und $l_2$ die *senkrechten* Abstände der Kräfte vom Drehpunkt.



### 5.5.2 Feste Rolle

Sie wirkt als zweiseitiger gleicharmiger Hebel. Die auf beiden Seiten wirkenden Drehmomente sind gleich, also auch die Kräfte. Für die feste Rolle gilt



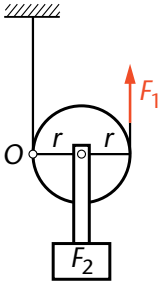

(M 5.14) $\boxed{\text{Kraft} = \text{Last}; \quad F_1 = F_2}$

***Beachte:***

- Eine feste Rolle kann nur die *Richtung* der erforderlichen Kraft beliebig verändern, jedoch nicht deren Größe.

### 5.5.3 Lose Rolle

Sie wirkt als einseitiger Hebel. Bezogen auf einen Drehpunkt $O$ wirken folgende Drehmomente, die im Falle des Gleichgewichts gleich sein müssen: $F_1 \cdot 2r = F_2 \cdot r$. Daraus folgt



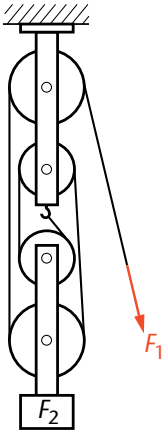

(M 5.15) $\boxed{\text{Kraft} = \text{halbe Last}; \quad F_1 = \dfrac{F_2}{2}}$

***Beachte:***

- Eins lose Rolle *halbiert* die Größe der erforderlichen Kraft.
- Kombiniert mit einer festen Rolle können Größe und Richtung der Kraft verändert werden.

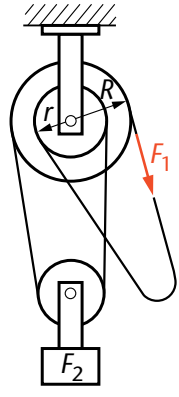
### 5.5.4 Flaschenzug

Er besteht aus insgesamt $n$ Rollen, wobei jeweils die Hälfte fest bzw. lose ist. Die Last verteilt sich auf $n$ parallel verlaufende Seile. Im Falle des Gleichgewichts gilt




(M 5.16) $\boxed{\text{Kraft} = \dfrac{\text{Last}}{\text{Anzahl der Seile}}; \quad F_1 = \dfrac{F_2}{n}}$

### 5.5.5 Differenzialflaschenzug




Er besteht aus 2 festen Rollen unterschiedlichen Durchmessers und einer losen Rolle. Die festen Rollen haben eine gemeinsame Drehachse und sind miteinander fest verbunden.

Wenn
$R$ Radius der größeren festen Rolle,
$r$ Radius der kleineren festen Rolle,
$F_1$ aufzuwendende Kraft,
$F_2$ Last,

dann gilt

(M 5.17) $$F_1 = F_2 \frac{R - r}{2R} = \frac{F_2}{2}\left(1 - \frac{r}{R}\right)$$

### 5.5.6 Geneigte Ebene

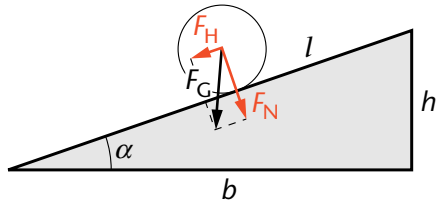
Darunter versteht man eine Ebene, die gegen die Horizontale geneigt ist, früher als „*schiefe*“ Ebene bezeichnet. Die Gewichtskraft eines Körpers auf der geneigten Ebene lässt sich in zwei einen rechten Winkel bildende Kraftkomponenten zerlegen:

- in die **Hangabtriebskraft** parallel zur geneigten Ebene und
- in die **Normalkraft** senkrecht zur geneigten Ebene.

Wenn
$F_G$ Gewichtskraft des Körpers,
$F_H$ Hangabtriebskraft,
$F_N$ Normalkraft,
$b$ (horizontale) Basis der geneigten Ebene,
$l$ Länge der geneigten Ebene,
$h$ Höhe der geneigten Ebene,
$\alpha$ Neigungswinkel,

dann gilt $F_H : F_G = h : l$ oder

(M 5.18) $$F_H = \frac{F_G h}{l} = F_G \sin\alpha$$



und $F_N : F_G = b : l$ oder

(M 5.19) $$F_N = \frac{F_G b}{l} = F_G \cos\alpha$$

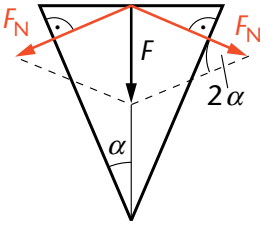
***Beachte:***

- Als **Anstieg** bezeichnet man das Verhältnis $h : b = \tan\alpha$.
- Im Gegensatz dazu wird das Verhältnis $h : l = \sin\alpha$ besonders bei Straßen und Bahnstrecken als **Neigung** (Steigung oder Gefälle) bezeichnet und meist in Prozent angegeben. Bei kleinem Neigungswinkel $\alpha$ ist jedoch der Unterschied zwischen $\tan\alpha$ und $\sin\alpha$ gering.



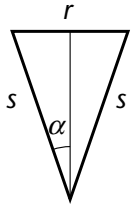
### 5.5.7 Keil

Er besteht aus zwei an der Basis zusammengefügten geneigten Ebenen. Die von den Flanken des Keils ausgeübten seitlichen Kräfte stehen senkrecht auf den Flanken (Normalkraft).




Wenn

$F$ auf den Keilrücken ausgeübte Kraft,
$F_N$ Flankenkraft des Keils,
$r$ Breite des Keilrückens,
$s$ Länge einer Flanke,
$\alpha$ halber Keilwinkel,




dann gilt

(M 5.20) $$F_N = F\frac{s}{r} = \frac{F}{2\sin\alpha}$$

### 5.5.8 Schraube

Eine Schraube kann aufgefasst werden als eine geneigte Ebene, die um einen Kreiszylinder gewickelt wurde.

Wenn

$F_1$ zur Drehung der Schraube erforderliche Kraft, wirksam im Abstand $r$,
$F_2$ Kraft, in Achsrichtung wirkend,
$h$ Ganghöhe der Schraube,

