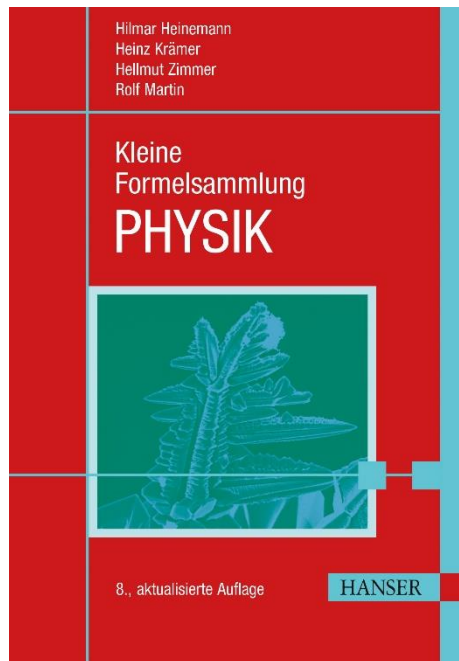


# HANSER



## Leseprobe

zu

## Kleine Formelsammlung PHYSIK

von Hilmar Heinemann, Heinz Krämer, Hellmut Zimmer  
und Rolf Martin

Print-ISBN: 978-3-446-47868-8  
E-Book-ISBN: 978-3-446-47874-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter  
<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446478688>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

# Vorwort

Die vorliegende „Kleine Formelsammlung“ enthält die wichtigsten Formeln ausgewählter Stoffgebiete der Physik, die beim Studium der Ingenieur- oder Naturwissenschaften an Hochschulen für Angewandte Wissenschaften und Universitäten sowie bei der Lösung physikalischer Probleme in der Praxis benötigt werden.

Diese Sammlung dient zum *Nachschlagen* bei Klausuren, zur *Unterstützung* beim Lösen physikalischer Übungsaufgaben im Grundstudium, zur *Auffrischung* von physikalischen Kenntnissen und zur *Erweiterung* des Überblicks bei der Prüfungsvorbereitung. Demzufolge ist sie vor allem für Studierende im Grundstudium mit Physik als Nebenfach sowie für Studierende des Lehramtes Physik gedacht.

Sie gibt aber auch Lehrern und Schülern der Abiturstufe einen Überblick über die grundlegenden Formeln in der Physik und Hilfe bei physikalischen Aufgabenstellungen.

Bei allen Formeln sind die auftretenden *Formelzeichen* erläutert und es werden Hinweise zur Verhütung von Missverständnissen gegeben. Dadurch dürfte diese „Kleine Formelsammlung Physik“ unmittelbar – ohne langes Lesen von Lehrbuchkapiteln – verständlich sein.

Bereits in der 7. Auflage wurde besonders darauf geachtet, dass die Formelzeichen der physikalischen Größen mit jenen des Buches „Physik in Aufgaben und Lösungen“ übereinstimmen. In der Elektrotechnik wurde die Wechselstromrechnung mit komplexen Zeigern aufgenommen; in der geometrischen Optik wurden konsequent die Vorzeichenregeln der DIN 1335 angewandt.



# Inhalt

Vorwort .....	V
---------------	---

## Allgemeine Grundlagen

1	Physikalische Größen und Internationales Einheitensystem (SI) .....	2
2	Physikalische Konstanten .....	7
3	Mess- und Beobachtungsfehler .....	9
4	Koordinaten und Vektoren .....	12

## Mechanik

5	Kinematik .....	18
6	Newton'sche Axiome und Bewegungsgleichung ..	25
7	Kräfte verschiedenen Ursprungs .....	27
8	Arbeit, Energie, Leistung .....	31
9	Impulserhaltungssatz .....	35
10	Bewegung im Zentralfeld .....	40
11	Statik .....	43
12	Rotation starrer Körper .....	45

13	Beschleunigtes Bezugssystem .....	52
14	Spezielle Relativitätstheorie .....	54
15	Verformung fester Körper .....	58
16	Ruhende Flüssigkeiten und Gase .....	63
17	Strömung der idealen Flüssigkeit .....	65
18	Strömung realer Flüssigkeiten und Gase .....	67

## Schwingungen und Wellen

19	Harmonische Schwingungen .....	72
20	Gedämpfte Schwingungen .....	76
21	Erzwungene Schwingungen .....	79
22	Ebene Wellen .....	84
23	Schallwellen .....	87

## Thermodynamik

24	Temperatur und thermische Ausdehnung .....	94
25	Kalorimetrie .....	95
26	Wärmeausbreitung .....	96
27	Wärmestrahlung .....	98
28	Zustandsänderungen des idealen Gases und Erster Hauptsatz .....	100
29	Carnot'scher Kreisprozess und Zweiter Hauptsatz .....	104

## Gaskinetik

30	Mikrophysikalische Betrachtung des Gases . . . . .	108
31	Verknüpfung zwischen mikro- und makrophysikalischen Größen . . . . .	111

## Elektrizität und Magnetismus

32	Gleichstromkreis . . . . .	114
33	Elektrisches Feld . . . . .	120
34	Magnetisches Feld . . . . .	125
35	Induktion . . . . .	128
36	Maxwell'sche Gleichungen . . . . .	130
37	Wechselstromkreis . . . . .	132

## Strahlenoptik

38	Reflexion, Brechung und Dispersion . . . . .	140
39	Dünne Linse und Linsensysteme . . . . .	143
40	Dicke Linse . . . . .	146
41	Spiegel . . . . .	147
42	Auge und optische Vergrößerung . . . . .	149
43	Optische Geräte . . . . .	152

**Wellenoptik**

44	Energie .....	164
45	Interferenz .....	165
46	Beugung .....	168
47	Reflexion und Brechung polarisierten Lichtes ...	172

**Foto- und Radiometrie**

48	Strahlungsphysikalische Größen, Radiometrie ...	176
49	Visuelle Bewertung der Strahlung, lichttechnische Größen, Fotometrie .....	178
50	Zusammenhang zwischen Temperatur und Strahlung .....	180

**Struktur der Materie**

51	Welle-Teilchen-Dualismus .....	184
52	Atomhülle .....	187
53	Quantenmechanik .....	190
54	Atomkern .....	193
55	Dosimetrie .....	197

<b>Index</b> .....	<b>199</b>
--------------------	------------

# Allgemeine Grundlagen



# 1

## Physikalische Größen und Internationales Einheitensystem (SI)

### Physikalische Größe

Eine physikalische Größe  $G$  wird durch ihren **Zahlenwert**  $\{G\}$  und ihre **Maßeinheit**  $[G]$  gekennzeichnet:

$$G = \{G\} \cdot [G]$$

### Basisgrößen, Basiseinheiten

Dem SI liegen sieben Basiseinheiten zugrunde:

Basisgrößen	Basiseinheiten	Dimensionen
Länge $l, r, x$ , etc.	Meter m	L
Masse $m$	Kilogramm kg	M
Zeit $t$	Sekunde s	T
Stromstärke $I, i$	Ampere A	I
Temperatur $T$	Kelvin K	$\Theta$
Stoffmenge $n, \nu$	Mol mol	N
Lichtstärke $I_v$	Candela cd	J

### Definition der Basiseinheiten

Die **Sekunde**: 1 s ist die Dauer von 9 192 631 770 Perioden der Strahlung, die im  $^{133}\text{Cs}$ -Isotop auftritt.

Das **Meter**: 1 m ist die Strecke, die Licht im Vakuum innerhalb des Bruchteils von 1/299 792 458 einer Sekunde zurücklegt.

Das **Kilogramm**:  $1 \text{ kg} = \frac{h}{6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ s/m}^2}$  ist verknüpft mit dem Wert der Planck'schen Konstante  $h$  sowie der Definition der Sekunde und des Meters.

Das **Ampere**:  $1 \text{ A} = \frac{e}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19}} \text{ s}^{-1}$ , ein Ampere entspricht dem Stromfluss von  $6,241\,509\,074 \cdot 10^{18}$  Elementarladungen (Elektronen) pro Sekunde

Das **Kelvin**:  $1 \text{ K} = \frac{1,380\,649\,10^{-23}}{k} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ , ein Kelvin entspricht einer Änderung der thermodynamischen Temperatur, die mit einer Änderung der thermischen Energie ( $kT$ ,  $k$ : Boltzmann-Konstante) um  $1,380\,649\,10^{-23} \text{ J}$  einhergeht.

Das **Mol**: 1 mol ist die Stoffmenge eines Systems, das  $6,022\,140\,76 \cdot 10^{23}$  spezifizierte Einzelteilchen enthält.

Die **Candela**: 1 cd ist die Lichtstärke einer Strahlquelle, die mit einer Frequenz von  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  in eine bestimmte Raumrichtung emittiert und deren Strahlstärke  $1/683 \text{ W/sr}$  in dieser Richtung beträgt.

### Hinweis zur Temperatureinheit:

Während die in Kelvin gemessene thermodynamische Temperatur nur positive Werte hat ( $T > 0$ ), besitzt die weit verbreitete Celsius-Skala einen Nullpunkt bei schmelzendem Eis ( $\vartheta = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ ) und einen zweiten Fixpunkt bei kochendem Wasser ( $\vartheta = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Es gilt der Zusammenhang für die beiden Systeme

$$\frac{T}{\text{K}} = 273,15 + \frac{\vartheta}{^\circ\text{C}}$$

Die Skalenteilung beider Systeme ist gleich. Daher hat eine Temperaturdifferenz in beiden Systemen denselben Zahlenwert

$$\frac{\Delta T}{\text{K}} = \frac{\Delta \vartheta}{^\circ\text{C}}$$

## Abgeleitete Größen und Einheiten

Abgeleitete Größen stehen mit den Basisgrößen durch physikalische Gesetze (Gleichungen) in eindeutigen Zusammenhang. Einheiten abgeleiteter Größen entstehen aus den Basiseinheiten mithilfe der entsprechenden physikalischen Zusammenhänge.

Der Begriff **Maßeinheit** darf nicht verwechselt werden mit dem Begriff **Dimension**. Konventionell sind physikalische Größen in einem System von Dimensionen organisiert. Jede der sieben Basisgrößen des SI hat seine eigene Dimension. Die Symbole der Dimensionen sind in untenstehender Tabelle zusammengestellt. Die Dimension einer abgeleiteten Größe wird als Produkt von Potenzen der Dimensionen der Basisgrößen dargestellt. Beispielsweise ergibt sich für die Geschwindigkeit:  $\dim v = LT^{-1}$  oder für die Kraft:  $\dim F = LMT^{-2}$ .

Die folgende Tabelle listet einige Beispiele abgeleiteter Größen samt ihren Maßeinheiten und Dimensionen auf:

Größe	SI-Einheit	Dimension
Kraft	$F$ $N = \text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	$MLT^{-2}$
Arbeit	$W$ $J = N \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$	$ML^2T^{-2}$
Leistung	$P$ $W = J/s = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$	$ML^2T^{-3}$
Druck	$p$ $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
Frequenz	$f$ $\text{Hz} = \text{s}^{-1}$	$T^{-1}$
el. Spannung	$U$ $V = W/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$	$ML^2T^{-3}I^{-1}$
el. Widerstand	$R$ $\Omega = V/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$	$ML^2T^{-3}I^{-2}$
el. Leitwert	$G$ $S = A/V = \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^3 \cdot \text{A}^2$	$M^{-1}L^{-2}T^3I^2$
el. Ladung	$Q$ $C = A \cdot \text{s}$	$IT$
el. Kapazität	$C$ $F = C/V = \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$	$M^{-1}L^{-2}T^4I^2$
magn. Fluss	$\Phi$ $\text{Wb} = V \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$	$ML^2T^{-2}I^{-1}$
magn. Flussdichte	$B$ $T = \text{Wb}/\text{m}^2 = \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$	$MT^{-2}I^{-1}$
Induktivität	$L$ $H = \text{Wb}/A = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$	$ML^2T^{-2}I^{-2}$
ebener Winkel	$\varphi$ $\text{rad} = \text{m}/\text{m}$	$LL^{-1} = 1$
Raumwinkel	$\Omega$ $\text{sr} = \text{m}^2/\text{m}^2$	$L^2L^{-2} = 1$

Größe		SI-Einheit	Dimension
Aktivität	$A$	$Bq = s^{-1}$	$T^{-1}$
Energiedosis	$D$	$Gy = J/kg = m^2 \cdot s^{-2}$	$L^2T^{-2}$
Äquivalentdosis	$H$	$Sv = J/kg = m^2 \cdot s^{-2}$	$L^2T^{-2}$
Lichtstrom	$\Phi$	$lm = cd \cdot sr$	$JL^2L^{-2}$
Beleuchtungsstärke	$E$	$lx = lm/m^2 = cd sr m^{-2}$	$JL^2L^{-4}$
Brechkraft	$D$	$dpt = m^{-1}$	$L^{-1}$

### Umrechnung von SI-fremden Einheiten

#### Kraft, Druck, Arbeit (Energie), Leistung

1 at = 1 kp/cm <sup>2</sup> = 98 066,5 Pa	technische Atmosphäre physikalische Atmosphäre
1 atm = 101 325 Pa	
1 bar = 10 <sup>5</sup> Pa	
1 dyn = 1 g cm s <sup>-2</sup> = 10 <sup>-5</sup> N	
1 erg = 1 dyn cm = 10 <sup>-7</sup> J	
1 kcal = 4,1868 kJ	Kilokalorie
1 kp = 9,806 65 N	Kilopond
1 mmHg = 1 Torr = 133,322 Pa	mm Quecksilbersäule
1 mmWs = 9,806 65 Pa	mm Wassersäule
1 PS = 75 kp m s <sup>-1</sup> = 735,5 W	Pferdestärke

#### Längen, Geschwindigkeit

1 Å = 10 <sup>-10</sup> m = 100 pm	Ångström
1 f = 10 <sup>-15</sup> m = 1 fm	Fermi
1 kn = 1 sm/h = 0,5144 m/s	Knoten
1 mile = 1609,344 m	Meile
1 sm = 1852 m	Seemeile

#### Winkel

1° = (π/180) rad	Grad
1' = (1/60)° = (π/10 800) rad	Winkelminute
1" = (1/60)' = (π/648 000) rad	Winkelsekunde
1 Gon = (π/200) rad	Gon, Neugrad

## Umrechnung von SI-fremden Einheiten

## Viskosität

1 P = 0,1 Pa s

Poise

1 St =  $10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s

Stokes

## Elektromagnetismus

1 G =  $10^{-4}$  T

Gauß

1 Gb =  $(10/4\pi)$  A

Gilbert

1 Oe =  $(1000/4\pi)$  A/m

Oersted

1 Mx =  $10^{-8}$  Wb

Maxwell

## Photometrie

1 sb =  $10^4$  cd/m<sup>2</sup>

Stilb

1 Ph =  $10^4$  lx

Phot

## Radioaktivität

1 R =  $258 \cdot 10^{-6}$  C/kg

Röntgen

1 Ci =  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq

Curie

## Vorsätze für dezimale Teile und Vielfache der Einheiten

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

# 2

## Physikalische Konstanten

Erdmasse	$m_E = 5,972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
Gravitationskonstante	$G = 6,674\,30 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
Mittlerer Erdradius	$r_E = 6370 \text{ km}$
Mittlerer Erdbahnradius	$r_0 = AE = 149,6 \cdot 10^6 \text{ km}$
Mittlerer Sterntag	$d^* = 86\,164 \text{ s}$
Normfallbeschleunigung	$g_n = 9,806\,65 \text{ m/s}^2$
Sonnenmasse	$m_S = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Atomare Masseneinheit	$u = 1,660\,539\,066\,60 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
Avogadro-Konstante	$N_A = 6,022\,140\,76 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$
Boltzmann-Konstante	$k = 1,380\,649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
Gaskonstante (molare)	$R_m = 8,314\,462\,618 \text{ J}/(\text{mol K})$
Elektrische Feldkonstante	$\epsilon_0 = 8,854\,187\,8128 \cdot 10^{-12} \text{ A s}/(\text{V m})$
Elementarladung	$e = 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
Faraday-Konstante	$F = 96\,485,332\,12 \text{ C/mol}$
Lichtgeschwindigkeit	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
Magnetische Feldkonstante	$\mu_0 = 1,256\,637\,0621 \cdot 10^{-6} \text{ V s}/(\text{A m})$
Bohr'sches Magneton	$\mu_B = 9,274\,010\,0783 \cdot 10^{-24} \text{ A m}^2$
Compton-Wellenlänge	$\lambda_C = 2,426\,310\,239 \cdot 10^{-12} \text{ m}$
Nukleonenradius	$r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Planck'sche Konstante	$h = 6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$
	$\hbar = 1,054\,571\,82 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$

Ruhenergie Elektron	$m_e c^2 = 0,51099895 \text{ MeV}$
Ruhemasse Elektron	$m_e = 9,1093837015 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ $= 5,48579909065 \cdot 10^{-4} \text{ u}$
Ruhemasse Neutron	$m_n = 1,67492749804 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1,00866491595 \text{ u}$
Ruhemasse Proton	$m_p = 1,67262192369 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ $= 1,007276466621 \text{ u}$
Rydberg-Frequenz	$R = 3,2898419602508 \cdot 10^{15} \text{ Hz}$
Spezifische Elektronenladung	$e/m_e = 1,758820011 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$

# 3

## Mess- und Beobachtungsfehler

### Fehlerabschätzung

Messwerte haben Genauigkeitsgrenzen. Die letzte Stelle eines Messwertes ist gerundet. Die Unsicherheit der gemessenen Größe beträgt also maximal die Hälfte der Einheit der letzten Stelle, und zwar sowohl nach oben als auch nach unten. Gehen Messwerte in eine Rechnung ein, so bedingen sie auch eine Unsicherheit des Ergebnisses. Deshalb darf das Ergebnis nur mit der gleichen Anzahl von Stellen angegeben werden wie die Ausgangswerte. Haben diese unterschiedlichen Stellenzahlen, so soll das Ergebnis nur so viele Stellen enthalten wie der Ausgangswert mit der geringsten Stellenzahl. (Bei Feststellung der Stellenzahl bleiben das Komma und die Nullen vor der Ziffernfolge unberücksichtigt.)

Will man genauere Informationen über die Unsicherheit des Ergebnisses haben, so kann man den „Fehler“ abschätzen. Dazu wird das totale Differential benutzt.

$f(x, y, \dots)$  und der **absolute Fehler**  $\Delta f$  sind zu berechnen. Die absoluten Fehler von  $x$  und  $y$  sind  $\Delta x$  und  $\Delta y$ . Das totale Differential von  $f(x, y, \dots)$  ist

$$df = \frac{\partial f}{\partial x} dx + \frac{\partial f}{\partial y} dy + \dots$$

Bei der Fehlerbetrachtung gelten die Näherungen

$$dx \approx \Delta x, \quad dy \approx \Delta y, \quad df \approx \Delta f.$$

Damit folgt

$$\Delta f = \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y + \dots$$



Um den maximalen Fehler zu erfassen, werden nur die Beträge berücksichtigt, und man erhält

$$|\Delta f| = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \right| |\Delta x| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \right| |\Delta y| + \dots$$

Unter Berücksichtigung des abgeschätzten absoluten Fehlers heißt das Ergebnis

$$f = \bar{f} + \Delta f$$

$\bar{f} = f(\bar{x}, \bar{y}, \dots)$ ;  $\bar{x}, \bar{y}, \dots$  Messwerte (Mittelwerte);

$$\Delta f = \pm |\Delta f|$$

Der **relative Fehler** von  $f(x, y, \dots)$  ist

$$\delta = \frac{|\Delta f|}{\bar{f}}$$

Diesen erhält man auch, wenn man  $f(x, y, \dots)$  logarithmiert, also  $\ln f(x, y, \dots)$  bildet, und anschließend differenziert, so dass man  $\frac{df}{f}$  und schließlich  $\frac{|\Delta f|}{f}$  erhält.

### Fehlerausgleich

Durch Mittelwertbildung über mehrere Messwerte  $x_i$  der gleichen Messgröße  $x$  lässt sich der Einfluss **zufälliger Messfehler** verringern. **Systematische Fehler** bleiben davon unberührt.

Der wahrscheinlichste Wert von  $x$  ist der Mittelwert

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

mit  $n$  als Anzahl der Messungen.

# Index

## A

Abbe'sche Zahl 142  
Abbildungsgleichung 143, 147  
Abbildungsmaßstab 144, 148  
Abklingkonstante 76  
Additionstheoreme der Geschwindigkeiten 56  
Admittanz 133  
Airy'sche Beugungsscheibchen 169  
Ampere 3  
Ampere'sches Verkettungsgesetz 125  
Amplitudenresonanz 83  
Anpassung 119  
Apozentrum 42  
Äquivalentdosis 197  
Arbeit, elektrische 116  
Arbeit, mechanische 31, 65  
Archimedisches Prinzip 64  
arctan-Funktion 13  
Atomare Masseneinheit 7  
Atomhülle 187  
Atomkern 193  
Atommasse 194  
Atommasse, relative 194  
Atommassenkonstante 194  
Auflösungsvermögen 171  
Auftrieb 64  
Auge, Sehwinkel 149  
Ausbreitungsgeschwindigkeit 85

Ausdehnung, thermische 94  
Ausstrahlung, spezifische 177  
Avogadro-Konstante 7

## B

Bahngleichung 23  
Barometrische Höhenformel 64  
Basiseinheiten 2  
Basisgrößen 2  
Bepfeilung 117  
Bernoulli'sche Gleichung 66  
Beschleunigung 19  
Beschleunigungsresonanz 83  
Beschleunigungsvektor 19  
Bestrahlung 177  
Bestrahlungsstärke 177  
Beugung 168  
Bewegung auf der Geraden 21  
Bewegung, gleichförmige 21  
Bewegung, gleichmäßig beschleunigte 21  
Bewegung, ungleichmäßig beschleunigte 22  
Bewegung im Gravitationsfeld 42  
Bewegung im Zentralfeld 40  
Bewegung starrer Körper 45  
Bewegung in der Ebene 22

Bewegungsgleichung 25 f., 37, 39, 56,  
 73, 77, 82  
 Bewegungsgleichung bei veränder-  
 lichem Trägheitsmoment 48  
 Bewegungsgleichung der Rotation 45  
 Bezugssehweite 150  
 Bezugssystem, beschleunigt 52  
 Biegung eines Trägers 61  
 Bindungsenergie 195  
 Bohr'sche Elektronenbahnradien 187  
 Bohr'scher Radius 187  
 Bohr'sches Magneton 7, 188  
 Boltzmann-Konstante 7  
 Bragg'sche Gleichung 171  
 Brechkraft 150  
 Brechung polarisierten Lichtes 172  
 Brechungsgesetz 140  
 Brechungsindex 140  
 Brechwert, Brechkraft 150  
 Brechzahl 140  
 Brennweite 145, 148  
 Brewster'sches Gesetz 173  
 Bruchspannung 58

## C

Candela 3  
 Carnot'scher Kreisprozess 104  
 Celsius-Temperatur 94  
 Compton-Effekt 185  
 Compton-Wellenlänge 7  
 Corioliskraft 53  
 Coulombkraft 29, 40  
 Coulomb'sches Gesetz 120

## D

Dämpfungsgrad 83  
 De-Broglie-Beziehung 184  
 Dehnung 59

Dekrement, logarithmisches 77  
 Dichte 43, 87ff., 100, 108  
 Differenzialgleichung 73, 77, 81  
 Dioptrie 145  
 Dispersion 142  
 Dopplereffekt 92  
 Dosimetrie 197  
 Drehimpuls 47  
 Drehimpulserhaltungssatz 48  
 Drehmoment 43  
 Drehschwingung, harmonisch 73  
 Drillung 62  
 Druck 63, 111  
 Druck, statischer 66  
 Druckverlauf 89  
 Durchflutungsgesetz 125

## E

Effektivwert 132  
 Eigenwertgleichung 191  
 Einheitsvektor 14  
 Einstein'sche lichtelektrische Gleichung  
 185  
 Einstein'sche Masse-Energie-Äquivalenz  
 57  
 Elektrolyse 119  
 Elektronenladung 8  
 Elementarladung 7  
 Elongation 89  
 Energie 164  
 Energie, innere 111  
 Energie, kinetische 33, 57  
 Energie, mittlere kinetische 111  
 Energie, potenzielle 32, 121  
 Energie der Lichtquanten 187  
 Energie-Impuls-Beziehung 57  
 Energiedichte 124, 127  
 Energiedichte, mittlere 90  
 Energiedosis 197

Energiedosisleistung 197  
 Energieerhaltung 34  
 Energieerhaltungssatz 164  
 Energiestromdichte 90  
 Energiestromdichtevektor 164  
 Energieterme 188  
 Enthalpie 101  
 Entropie 101  
 Erdbahnradius, mittlerer 7  
 Erdmasse 7  
 Erdradius, mittlerer 7  
 Erreger 79  
 Erster Hauptsatz der Thermodynamik 102  
 Euler'scher Grenzwert 62

## F

Faraday-Konstante 7  
 Federenergie 51  
 Federkraft 27, 33  
 Federschwinger, linearer 74  
 Federschwingung 51  
 Fehler, absoluter 9  
 Fehler, relativer 10  
 Fehler, systematische 10  
 Fehlerausgleich 10  
 Fehler, maximaler 10  
 Fehlerabschätzung 9  
 Feld, elektrisches 120  
 Feld, magnetisches 125  
 Feldkonstante 7  
 Feldlinse 159  
 Feldstärke, elektrische 120  
 Feldstärke, magnetische 125  
 Fernrohr, astronomisches 156  
 Fernrohr, Galilei'sches 158  
 Fernrohr, Kepler'sches 156  
 Flächensatz 41  
 Flächenvektor 16

Fluss, magnetischer 126  
 Flussdichte, magnetische 126  
 Fotometrie 176  
 Freier Fall 21  
 Freiheitsgrad 45  
 Fresnel'sche Formeln 172

## G

Gangunterschied 166  
 Gaskinetik 108  
 Gaskonstante, molare 7, 100  
 Gaskonstante, spezifische 100, 103  
 Gauß'scher Satz 131  
 Gegenwirkungsprinzip 26  
 Gesamtbeschleunigung 24  
 Geschwindigkeit, durchschnittliche 109  
 Geschwindigkeit, mittlere 19, 109  
 Geschwindigkeit, wahrscheinlichste 109  
 Geschwindigkeitsberechnung 20  
 Geschwindigkeitsresonanz 83  
 Geschwindigkeitsvektor 18  
 Gesetz von Hagen und Poiseuille 67  
 Gesetz von Stokes für die laminare Umströmung 69  
 Gewichtskraft 29  
 Gleichgewicht 44  
 Gleichstromkreis 114  
 Gleichverteilungssatz 111  
 Gleitreibungskraft 28  
 Gravitationskonstante 7  
 Gravitationskraft 28, 40  
 Grenzfall, aperiodisch 77  
 Größen, energetische 179  
 Größen, physikalische 2  
 Größen, strahlungsphysikalische 176  
 Größen, visuelle 179  
 Grundgesetz der Mechanik 25  
 Grundstromkreis 118

**H**

Haftreibungskraft 27  
 Harmonische Schwingung 22  
 Häufigkeit, relative 108  
 Heisenberg'sche Unbestimmtheits-  
 relation 186  
 Hellempfindlichkeit 178  
 Hohlspiegel, Brennweite 147  
 Hooke'sches Gesetz 27, 59  
 Huygens-Fresnel'sches Prinzip 168

**I**

Impedanz 133  
 Impulsänderung 35  
 Impulserhaltungssatz 35 f.  
 Impulsmoment 41, 49  
 Induktion 126, 128  
 Induktionsgesetz 128, 130  
 Induktivität 129  
 Intensität 165  
 Intensität einer punktförmigen  
 Schallquelle 91  
 Intensitätsmaxima 170  
 Intensitätsmaximum 169  
 Intensitätsminimum 170  
 Intensitätspegel 91  
 Intensitätsverteilung 168  
 Interferenz 165  
 Interferenz, destruktiv 166  
 Interferenz, konstruktiv 166  
 Internationales Einheitensystem 2  
 Ionendosis 198  
 Isentropenexponent 103

**K**

Kalorimetrie 95  
 Kapazität, elektrische 122

Kapazitätserhöhung durch Dielektrikum  
 124

Kelvin 3  
 Kernradius 193  
 Kernreaktion 196  
 Kilogramm 3  
 Kinematik 18  
 Kirchhoff'sches Gesetz 98, 116  
 Klemmenspannung 118  
 Knickung eines Stabes 62  
 Knotenregel 116  
 Kohärenzbedingung 167  
 Kollektivlinse 159  
 Kompression 60  
 Kondensator 123  
 Kontinuitätsgleichung 65  
 Koordinaten, ebene 13  
 Koordinaten, kartesische 12  
 Kräfte, äußere 36  
 Kräfte, innere 35  
 Kräfte, verschiedenen Ursprungs 27  
 Kraftgesetz 120  
 Kraftstoß 35  
 Kreisbewegung 23  
 Kreuzprodukt 14  
 Kugelkondensator 123  
 Kugelkoordinaten 12  
 Kurzschluss 119  
 Kurzschlussstrom 119

**L**

Ladung, elektrische 114  
 Ladungstransport in Flüssigkeiten 119  
 Lambert'sches Gesetz 177  
 Längenausdehnung 94  
 Längenkontraktion 55  
 Laue-Bedingung 170  
 Leerlauf 119  
 Leerlaufspannung 119

Leistung, elektrische 115, 138  
 Leistung, mechanische 34  
 Leistungszahl 104  
 Leiteranordnungen 123  
 Leiter, langer, gerader 125  
 Leiter, stromdurchflossener 127  
 Leitwert, elektrischer 115  
 Lenz'sche Regel 128  
 Lichtgeschwindigkeit 7, 54  
 Licht, polarisiertes 165  
 Lichtquanten, Energie 187  
 Lichtstrom 178  
 Linkssystem 15  
 Linse, dicke 146  
 Linse, dünne 143  
 Linsenmacher-Gleichung 145  
 Linsensysteme 143, 159  
 Longitudinalwelle 84  
 Lorentzkraft 127  
 Lorentz-Transformation 54  
 Lupe 152

## M

Mach-Kegel 92  
 Maschenregel 116  
 Masse-Energie-Äquivalenz 57  
 Maßeinheit 2  
 Masse, relativistische 56  
 Massendefekt 194  
 Masseneinheit, atomare 194  
 Massenmittelpunkt 25  
 Massenpunkt 25, 72, 76  
 Massenpunkt, Systeme 35  
 Massenträgheitsmoment 45  
 Massenzahl 193  
 Maxwell'sche Geschwindigkeits-  
 verteilung 109  
 Maxwell'sche Gleichungen 130  
 Messbereicherweiterung 119

Mess- und Beobachtungsfehler 9  
 Meter 2  
 Mikroskop 153  
 Mol 3  
 Moseley'sches Gesetz 189

## N

Newton'sche Abbildungsgleichung 143  
 Newton'sche Axiome 25  
 Newton'sches Axiom, erstes 25  
 Newton'sches Axiom, zweites 25  
 Newton'sches Axiom, drittes 26  
 Newton'sches Reibungsgesetz 67  
 Normalspannung 58  
 Normalvergrößerung 151  
 Normfallbeschleunigung 7  
 Nukleonradius 7  
 Nukleonenzahl 193

## O

Objektiv 160  
 Ohm'sches Gesetz 115, 133  
 Ortsberechnung 19  
 Ortsvektor 13, 18  
 Ort-Zeit-Funktion 18, 72, 76, 79  
 Oszillator 74

## P

Parallelschaltung 136  
 – von Kondensatoren 123  
 – von Widerständen 117  
 Pendel 74 f.  
 Pendel, mathematisches 51, 75  
 Pendel, physikalisches 51, 75  
 Pendellänge, reduzierte 51  
 Periodendauer 74  
 Periodensystem, Besetzungsfolge 189

Perizentrum 42  
 Perpetuum mobile 105  
 Phasendifferenz 81, 166  
 Phasengeschwindigkeit 85  
 Phasensprung 86  
 Phasenumwandlung 95  
 Phasenverschiebung 134  
 Physikalische Größen 2  
 Physikalische Konstanten 7  
 Planck'sche Beziehung 184  
 Planck'sche Konstante 7  
 Planck'sches Strahlungsgesetz 180  
 Plattenkondensator 123 f.  
 Poisson-Zahl 59  
 Polarisation 122  
 Polarkoordinaten 13  
 Potenzialdifferenz 121  
 Potenzialkraft 32  
 Poynting-Vektor 164  
 Präzessionsbewegung 49  
 Präzessionskreisfrequenz 50  
 Projektionsmikroskop 155  
 Punktprodukt 14

## Q

Quantenmechanik 190  
 Querkontraktion 59

## R

Radialbeschleunigung 24  
 Radialkraft 30  
 Radiometrie 176  
 Raumkoordinaten 12  
 Rechtsschraubenregel 15  
 Rechtssystem 15  
 Reflexion 172  
 Reflexionsgesetz 141  
 Reflexionsgrad 173  
 Reibungskraft 29  
 Reihenschaltung 135  
 – von Kondensatoren 123  
 – von Widerständen 117  
 Relativitätsprinzip 54  
 Relativitätstheorie, spezielle 54  
 Resonanzfrequenz 83, 138  
 Resonator 79  
 Resonatorschwingung 80  
 Reynolds-Zahl 68  
 Rollreibungskraft 28  
 Röntgenbeugung 171  
 Rotation, starre Körper 45  
 Rotation um eine feste Achse 50  
 Ruhemasse Elektron 8  
 Ruhemasse Neutron 8  
 Ruhemasse Proton 8  
 Ruhende Flüssigkeiten und Gase 63  
 Ruheenergie 8, 57  
 Rydberg-Frequenz 8, 188

## S

Saite, gespannte 89  
 Satz von Steiner 46  
 Schallausschlag 89  
 Schalldruckpegel 91  
 Schallfeldgrößen 89  
 Schallgeschwindigkeit 87  
 Schallintensität 90  
 Schallkennimpedanz 91  
 Schalleistung 91  
 Schallpegel 91  
 Schallschnelle 89  
 Schallwechseldruck 90  
 Schallwechseldruck, Amplitude 90  
 Schallwelle 87  
 Schaltungen von Kondensatoren 123  
 Scheinkraft 52  
 Scherung 60

- Schrödinger-Gleichung 190  
 Schubspannung 60, 68  
 Schweredruck 63  
 Schwerependel 75  
 Schwerpunkt 36  
 Schwingfall 76  
 Schwingung, erzwungene 79  
 Schwingung, gedämpfte 76  
 Schwingung, harmonische 72  
 Schwingverhalten 78  
 Sehwinkel 149  
 Sekunde 2  
 Selbstinduktion 129  
 SI 2  
 SI-fremde Einheiten 5  
 Skalarprodukt 14  
 Sonnenmasse 7  
 Spannung 58  
 Spannung, elektrische 121, 132  
 Spannung, induzierte 128  
 Spannungsteilerregel 117  
 Spiegel 147  
 Spiegel, ebener 148  
 Spule, lange 125  
 Standardabweichung 11  
 Starrer Körper 43  
 Statik 43  
 Stefan-Boltzmann'sches Gesetz 98, 181  
 Sternntag 7  
 Stoß, vollkommen elastischer 38  
 Stoß, vollkommen unelastischer 38  
 Stoß zweier Massenpunkte 38  
 Stoßfrequenz, mittlere 110  
 Strahldichte 176  
 Strahlenoptik 140  
 Strahlstärke 176  
 Strahlungsaustausch zweier Flächen 98  
 Strahlungsenergie 176  
 Strahlungsfluss 176  
 Strahlungsflussdichte 177  
 Strahlungsleistung 176  
 Strahlungsvektor 164  
 Stromdichte, elektrische 114  
 Stromstärke, elektrische 114, 132  
 Stromstärke, konstante 114  
 Stromteilerregel 118  
 Strömung 67  
 Strömung, ideale Flüssigkeit 65  
 Strömung, laminare 67  
 Strömung, turbulente 68  
 Suszeptibilität, elektrische 122  
 Suszeptibilität, magnetische 126
- T**
- Tangentialspannung 58  
 Teilchenmasse 108  
 Teilchenstrom 110  
 Teleobjektiv 161  
 Temperatur 94  
 Temperaturänderung 95  
 Temperatur, thermodynamische 94  
 thermische Zustandsgleichung 100  
 thermodynamische Größen 103  
 Torsion eines Zylinders 62  
 Torsionsenergie 51  
 Torsionsmoment 51  
 Torsionsschwingung 51  
 Torsionswellen 88  
 Totalreflexion 141  
 Trägheitsgesetz 25  
 Trägheitskraft 52  
 Trägheitsmomente 47  
 Translation in x-Richtung 50  
 Transmissionsgrad 173  
 Transversalwelle 84, 88



## U

- Überlagerung 86
- Umströmung, laminare 69
- Umwandlungsgesetz 195

## V

- Vektorprodukt 14
- Verformung, feste Körper 58
- Vergrößerung 150
- Vergrößerung, optische 149
- Verschiebung, elektrische 122
- Verschiebungsarbeit 32
- Viskosität, dynamische 67
- Volumenänderungsarbeit 102
- Volumenausdehnung 94
- Volumenstrom nach Hagen-Poiseuille 68

## W

- Wärmeabgabe 95
- Wärmeaufnahme 95
- Wärmeausbreitung 96
- Wärmebilanz 95
- Wärmedurchgang 96
- Wärmekapazität, spezifische und molare 112
- Wärmeleitung 96 f.
- Wärmeleitungsgleichung 97
- Wärmestrahlung 98
- Wärmestrom 96
- Wärmeübergang 96
- Warmwiderstand 115
- Wechselstromkreis 132
- Weglänge, mittlere freie 110
- Welle, ebene 84
- Welle, stehende 86

- Welle, einlaufende 86
- Wellenausbreitung 84
- Wellenfunktionen 84
- Wellengleichung 85
- Wellenoptik 164
- Wellenwiderstand 91
- Welle, reflektierte 86
- Welle-Teilchen-Dualismus 184
- Widerstand, elektrischer 114
- Widerstände, Schaltung 117
- Widerstandskraft turbulent umströmter Körper 70
- Wien'sches Verschiebungsgesetz 180
- Winkelbeschleunigung 23
- Winkelgeschwindigkeit 23
- Winkel-Zeit-Funktionen 23
- Wirkungsgrad, thermischer 104
- Wurf, schräger 22
- Wurf, senkrechter 21

## Z

- Zahlenwert 2
- Zeigerdiagramme 134 ff.
- Zeitdilatation 55
- Zentralkraft 40
- Zentrifugalkraft 52
- Zerfall, radioaktiver 195
- Zerfallsgesetz 195
- Zustandsänderungen 102
- Zustandsänderungen des idealen Gases 100
- Zustandsgleichung, kalorische 101
- Zustandsgleichung, thermische 100
- Zwangskraft 30
- Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik 105
- Zylinderkondensator 123