

Hilmar Heinemann
Heinz Krämer
Hellmut Zimmer
Rolf Martin

Kleine
Formelsammlung
PHYSIK



8., aktualisierte Auflage

HANSER

Heinemann / Krämer / Zimmer / Martin
Kleine Formelsammlung 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

Hilmar Heinemann
Heinz Krämer
Hellmut Zimmer
Rolf Martin

Kleine Formelsammlung PHYSIK

8., aktualisierte Auflage

HANSER

Bearbeiter:

Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. Rolf Martin, Köngen

Autoren:

Dr. rer. nat. Hilmar Heinemann, Freital

Dr. rer. nat. Heinz Krämer, Dresden (†)

Prof. Dr. rer. nat. Hellmut Zimmer, Dresden (†)



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 in- folgedessen 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 Wieder- gabe 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 Nationalbiblio- grafie; 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 Sys- teme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

Internet: www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Frauke Schafft

Satz: Eberl & Kösel Studio, Kempten

Titelbild: © Prof. Dr. Dr. Rolf Martin

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Druck und Binden: Friedrich Pustet GmbH & Co. KG, Regensburg

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47868-8

E-Book-ISBN: 978-3-446-47874-9

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

Index	199
--------------------	------------

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	Θ
Stoffmenge n, ν	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}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 eindeutigem 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 $\text{Pa} = N/\text{m}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$
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	Φ $\text{Wb} = V \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$	$ML^2T^{-2}I^{-1}$
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	φ $\text{rad} = \text{m}/\text{m}$	$LL^{-1} = 1$
Raumwinkel	Ω $\text{sr} = \text{m}^2/\text{m}^2$	$L^2L^{-2} = 1$

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	Φ	$lm = cd \cdot sr$	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 ² = 98 066,5 Pa	technische Atmosphäre physikalische Atmosphäre
1 atm = 101 325 Pa	
1 bar = 10 ⁵ Pa	
1 dyn = 1 g cm s ⁻² = 10 ⁻⁵ N	
1 erg = 1 dyn cm = 10 ⁻⁷ 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 ⁻¹ = 735,5 W	Pferdestärke

Längen, Geschwindigkeit

1 Å = 10 ⁻¹⁰ m = 100 pm	Ångström
1 f = 10 ⁻¹⁵ 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} m²/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/m²

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	μ
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	$G = 6,67430 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3/(\text{kg} \cdot \text{s}^2)$
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	$g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
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** Δf sind zu berechnen. Die absoluten Fehler von x und y sind Δx und Δy . 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.