

Paul Dobrinski | Gunter Krakau | Anselm Vogel

Physik für Ingenieure

12. Auflage

STUDIUM



**VIEWEG+
TEUBNER**

Paul Dobrinski | Gunter Krakau | Anselm Vogel

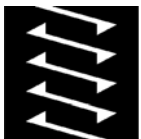
Physik für Ingenieure

Paul Dobrinski | Gunter Krakau | Anselm Vogel

Physik für Ingenieure

12., aktualisierte Auflage

STUDIUM



**VIEWEG+
TEUBNER**

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.

1. Auflage 1970
12., aktualisierte Auflage 2010

Alle Rechte vorbehalten
© Vieweg+Teubner | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2010

Lektorat: Ulrich Sandten | Kerstin Hoffmann

Vieweg+Teubner ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.
www.viewegteubner.de



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

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.

Umschlaggestaltung: KünkelLopka Medienentwicklung, Heidelberg
Druck und buchbinderische Verarbeitung: MercedesDruck, Berlin
Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.
Printed in Germany

ISBN 978-3-8348-0580-5

Vorwort

Als wir 1970 die erste Auflage dieses Physikbuches vorlegten, geschah es in der Überzeugung, dass die Physik als Grundlagenfach für den Ingenieur in der Ausbildung und in der Praxis ständig an Bedeutung gewinnt. Das gilt sicher heute mehr denn je. Besonders die immer wichtiger werdende sog. „Hochtechnologie“ basiert unmittelbar auf gründlicher Beherrschung der Physik.

Die Physik hat für das technische Studium im Wesentlichen zwei Aufgaben zu erfüllen: Einerseits sollen Kenntnisse über physikalische Gesetzmäßigkeiten vermittelt werden, die für das Verständnis und die Beherrschung technischer Probleme notwendig sind; in dieser Beziehung ist die Physik Hilfswissenschaft der Technik. Andererseits ist ein wesentlicher Teil des modernen technischen Denkens „physikalisches Denken“.

Um die erste dieser Aufgaben zu erfüllen, würde es fast genügen, möglichst viele Tatbestände säuberlich geordnet und nummeriert mitzuteilen. Die zweite Aufgabe würde jedoch damit sicher nicht erfüllt. Wir halten sie aber für die weitaus wichtigere und haben uns daher bemüht, die Prinzipien und Methoden des physikalischen Denkens immer herauszustellen: Eindeutige Definitionen der Begriffe; Größen und Einheiten; klare Unterscheidung zwischen Axiom, Erfahrungstatsache und mathematischem Formalismus; Einführung von Modellvorstellungen – d.h. „vereinfachten Bildern der Wirklichkeit“ – deutliches Aufzeigen der Grenzen der jeweiligen Modelle; Verfeinerung der Modelle; soweit möglich, logische Ableitung neuer Tatsachen aus vorher bekannten oder bewiesenen. Dabei haben wir im Zweifelsfall dem physikalischen Verständnis den Vorzug gegeben gegenüber der oft kürzeren und eleganteren mathematisch-formalen Herleitung.

Soweit es diesem physikalischen Verständnis dienlich ist, gehen wir von Versuchsbeschreibungen (insgesamt 147) aus. Alle Gleichungen sind grundsätzlich Größengleichungen d.h., die Formelzeichen darin (so weit wie möglich nach DIN- bzw. IUPAP-Empfehlungen) stehen für Maßzahl mal Einheit.

Am Anfang eines jeden Kapitels wird ein Überblick über seine Bedeutung und seinen Inhalt gegeben.

Durch verschiedene Druckarten wird unterschiedliche Wichtigkeit des Stoffes gekennzeichnet: In normaler Schriftgröße ist der fortlaufende Text gedruckt. Betonungen sind darin durch Sperrung hervorgehoben; wichtige Definitionen, Sätze, Gleichungen und Zusammenfassungen sind durch unterlegte Rasterung gekennzeichnet. Aufgaben, die der Vertiefung und Einübung des neuen Stoffes dienen, sowie Einzelheiten und Besonderheiten, die z.B. der eilige Leser auch zunächst überspringen kann, erscheinen im Kleindruck. Die logische Gliederung durch Überschriften ist halbfett gedruckt. Formelbuchstaben, und nur diese, sind kursiv gedruckt.

Der Stoff selbst wird nicht als sog. „technische Physik“ angeboten, denn dafür haben sich spezielle technische Fächer entwickelt. Wir haben daher bewusst innerhalb der Mechanik die Statik weggelassen, in der Wärmelehre keine „Technische Wärmelehre“ und in der Elektrizitätslehre keine „Elektrotechnik“ gebracht. Zweifellos aber ist es Aufgabe einer „Physik für Ingenieure“, die Verbindung zur Technik immer wieder herzustellen: Durch

stichwortartige Hinweise auf technische Anwendungen, mittels durchgerechneter Beispiele, möglichst aus der technischen Praxis, und mit Hilfe eben solcher Aufgaben verschiedenen Schwierigkeitsgrades, deren Lösungen im Anhang des Buches (nach einer allgemeinen Anleitung zur Aufgabenlösung) angegeben werden. Wir verwenden nur SI-Einheiten.

An mathematischen Kenntnissen setzen wir die Elemente der Infinitesimalrechnung und der Vektoralgebra voraus, wobei die Differentiale als endliche Größen behandelt werden. Dies erleichtert die Benutzung der Infinitesimalrechnung und ist heute allgemein in Physik und Technik üblich. Wir halten uns hierbei hauptsächlich an Brauch, W.; Dreyer, H.J.; Haacke, W.: Mathematik für Ingenieure [1].

Mehrere Gebiete der Physik haben wir unter übergeordneten Begriffen zusammengefasst. So sind alle Schwingungen und Wellen (einschließlich der Materiewellen) in einem Abschnitt enthalten, da sie sich alle mit dem gleichen Formalismus behandeln lassen. Trotzdem kann der Leser z.B. auch nur die mechanischen Schwingungen und Wellen durcharbeiten und die elektromagnetischen jeweils überspringen. Ebenso wird die Festkörperphysik, die an Bedeutung ständig zunimmt, in einem Abschnitt zusammenhängend dargestellt. Zugunsten einer straffen Darstellung wird hier auf die Benützung der Wellenzahl und auf die Potentialdarstellung bei PN-Übergängen und dergleichen verzichtet. Die magnetischen Eigenschaften der Festkörper werden allerdings im Abschnitt „Das magnetische Feld“ mitbehandelt, da sie dort eine wesentliche Rolle spielen. Der letzte Abschnitt schließlich bringt nur die spezielle Relativitätstheorie, unter anderem deshalb, weil es für die allgemeine noch keine technische Anwendung gibt.

Trotz dieser Einschränkungen dürfte der Stoffumfang in vielen Fällen das überschreiten, was während des Ingenieurstudiums an Physik durchgearbeitet wird, insbesondere da vielerorts Stundenkürzungen Mode sind, die dazu führen, dass Ingenieurstudenten nicht mehr so viele physikalische Grundlagen vermittelt werden, wie sie für die moderne Technik heutzutage unbedingt nötig sind. Umso mehr scheint es uns sinnvoll, dass dieses Buch noch jenseits des Studiums als „Handbuch“ des Ingenieurs dienen kann. Die Auswahl, die beim Studium getroffen werden muss, bleibt dem Benutzer überlassen. Um dies zu erleichtern, sind die einzelnen Abschnitte, so weit wie möglich, in sich abgeschlossen. Wir meinen, dass das Buch dem Leser auch neben und insbesondere nach dem Studium nützlich sein soll. Für tiefer gehendes Studium findet sich im Anhang eine Liste weiterführender Literatur; Zahlen in eckigen Klammern im Text verweisen auf die einzelnen Stellen in dieser Liste. Für manche Anregung danken wir Prof. Dr. E. Braun, Braunschweig, Prof. Dr. W. Buckel, Karlsruhe, Prof. Dr. H. K. Hartmann, Gießen, Prof. Dr. A. Scharmann, Gießen, und Prof. Dr. W. Walcher, Marburg. Auch den Damen und Herren des Verlages B. G. Teubner gilt unser Dank.

Immer neue Verbesserungsvorschläge von vielen Seiten und eigene neue Erfahrungen führten seit der 1. Auflage zu weit über 1000 Änderungen.

Für weitere Anregungen sind wir natürlich stets dankbar.

Hannover, Regensburg, München, im Sommer 2009

Die Verfasser

Inhalt

Formelzeichen	11
Einleitung	15
1 Mechanik	
1.1 Kinematik der geradlinigen Bewegung	17
1.1.1 Beschreibung einer Bewegung	17
1.1.2 Gleichförmige Bewegung	23
1.1.3 Ungleichförmige Bewegung	24
1.1.4 Richtung von Bewegungen	29
1.2 Kinematik der Drehbewegung	36
1.2.1 Gleichförmige Kreisbewegung	36
1.2.2 Ungleichförmige Kreisbewegung	40
1.2.3 Vergleich zwischen geradliniger und Kreisbewegung	44
1.2.4 Allgemeine Bewegung eines Massenpunktes	45
1.3 Dynamik der geradlinigen Bewegung	49
1.3.1 Erstes Newtonsches Axiom	49
1.3.2 Zweites Newtonsches Axiom	49
1.3.3 Drittes Newtonsches Axiom	56
1.3.4 Übergeordnete Begriffe	65
1.4 Massenanziehung oder Gravitation	84
1.4.1 Schwere Masse	84
1.4.2 Gravitationsgesetz	85
1.4.3 Schwerefeld oder Gravitationsfeld	87
1.5 Dynamik der Drehbewegungen	91
1.5.1 Massenpunkt	91
1.5.2 Starrer Körper	94
1.5.3 Drehimpuls	104
1.5.4 Planetenbewegung	120
1.6 Mechanik der Flüssigkeiten und Gase	124
1.6.1 Ruhende Flüssigkeiten	124
1.6.2 Ruhende Gase	134
1.6.3 Strömende Flüssigkeiten und Gase	138
2 Wärmelehre	
2.1 Temperatur	162
2.1.1 Größe und Einheiten	162
2.1.2 Temperaturabhängige Erscheinungen – Thermometer	165
2.2 Verhalten der Körper bei Temperaturänderung	166
2.2.1 Feste Körper	166
2.2.2 Flüssigkeiten	168
2.2.3 Gase	169

2.3 Energie und Wärme	176
2.3.1 Kinetische Gastheorie	177
2.3.2 Innere Energie	181
2.4 Erster Hauptsatz der Wärmelehre	189
2.4.1 Geschichtliche Entwicklung	189
2.4.2 Erster Hauptsatz	190
2.4.3 Allgemeine Zustandsänderung idealer Gase	191
2.4.4 Zustandsgleichung realer Gase und Dämpfe	196
2.4.5 Aggregatzustände	200
2.5 Luftfeuchte	208
2.6 Transportvorgänge	210
2.6.1 Konvektion oder Wärmeströmung	211
2.6.2 Wärmeleitung	212
2.6.3 Strahlung	214
2.6.4 Diffusion	217
2.7 Entropie und zweiter Hauptsatz der Wärmelehre	220
2.7.1 Reversible und irreversible Vorgänge, Entropie	220
2.7.2 Zweiter Hauptsatz der Wärmelehre	229
2.7.3 Thermische Maschinen	231

3 Elektrizität und Magnetismus

3.1 Ladung und elektrisches Feld	233
3.1.1 Elektrische Ladung	234
3.1.2 Elektrisches Feld	237
3.1.3 Materie im elektrischen Feld	252
3.2 Elektrischer Strom	261
3.2.1 Grundlegende Versuche	261
3.2.2 Elektrische Leitung in Festkörpern	265
3.2.3 Elektrische Leitung in Flüssigkeiten	275
3.2.4 Galvanische Elemente	278
3.2.5 Thermoelektrische Erscheinungen	281
3.2.6 Elektrische Leitung im Vakuum und in Gasen	283
3.3 Das magnetische Feld	294
3.3.1 Grundlegende Erscheinungen	294
3.3.2 Größen des magnetischen Feldes	297
3.3.3 Kraftwirkung magnetischer Felder	307
3.3.4 Elektromagnetische Induktion	310
3.3.5 Materie im magnetischen Feld	319
3.3.6 Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Feldern, Maxwellsche Gleichungen	332
3.3.7 Vergleich der Größen des Gravitationsfeldes sowie des elektrischen und magnetischen Feldes	336
3.3.8 Anwendungen der elektromagnetischen Induktion	337

4 Strahlenoptik

4.1 Abweichungen von der geradlinigen Lichtausbreitung	352
4.1.1 Reflexion	352
4.1.2 Brechung	356

4.2 Abbildende Systeme	367
4.2.1 Das Auge	367
4.2.2 Optische Instrumente	369
4.3 Lichtgeschwindigkeit	374

5 Schwingungs- und Wellenlehre

5.1 Schwingungen	376
5.1.1 Grundbegriffe	376
5.1.2 Ungedämpfte elastische Sinusschwingungen	379
5.1.3 Quasielastische Schwingungen	383
5.1.4 Gedämpfte Schwingungen	388
5.1.5 Selbsterregte Schwingungen	393
5.1.6 Erzwungene Schwingungen	395
5.1.7 Andere Schwingungsformen	403
5.1.8 Überlagerung von Schwingungen	405
5.1.9 Gekoppelte Schwingungssysteme	410
5.2 Wellen	414
5.2.1 Grundbegriffe	415
5.2.2 Beschreibung einer Sinuswelle	419
5.2.3 Reflexion von eindimensionalen Wellen	425
5.2.4 Überlagerung von eindimensionalen Wellen	427
5.2.5 Dreidimensionale Wellen	432
5.2.6 Anwendungen des Huygens-Fresnelschen Prinzips auf dreidimensionale Wellen	458
5.2.7 Polarisation	487
5.2.8 Absorption von Wellen	493
5.3 Der Dualismus von Wellen und Teilchen	494

6 Atom- und Kernphysik

6.1 Atomhülle	502
6.1.1 Experimentelle Grundlagen	502
6.1.2 Modellvorstellungen	508
6.1.3 Wichtige Anwendungen der Atomphysik	536
6.2 Atomkerne	546
6.2.1 Natürliche Radioaktivität	546
6.2.2 Messverfahren	550
6.2.3 Aufbau und Umwandlung von Kernen	553
6.2.4 Anwendung der Kernenergie	564
6.2.5 Strahlenwirkung	570

7 Festkörperphysik

7.1 Aufbau der Festkörper	574
7.1.1 Amorphe Stoffe	574
7.1.2 Kristalle	575
7.1.3 Bindungsarten	581
7.2 Mechanische Eigenschaften	583
7.3 Energiebändermodell	586

7.4 Elektrische Leitung	588
7.4.1 Metallische Leiter	589
7.4.2 Isolatoren	590
7.4.3 Halbleiter	590
7.4.4 Supraleitung	616
7.4.5 Josephson-Effekte	620
7.4.6 Quanten-Hall-Effekt	620
7.5 Lumineszenz	639
7.5.1 Grundlegende Erscheinungen	639
7.5.2 Deutung der Festkörper-Lumineszenz	642
7.5.3 Anwendungen	649

8 Relativitätstheorie

8.1 Relativität in der Newtonschen Mechanik	652
8.1.1 Zwei Beobachter bewegen sich relativ zueinander geradlinig und gleichförmig. Galileitransformation	652
8.2 Spezielle Relativitätstheorie	654
8.2.1 Lorentztransformation	655
8.2.2 Relativistische Dynamik	662
8.2.3 Relativistische Effekte in der Elektrodynamik	666

Anhang

Anleitung zum Lösen physikalischer Aufgaben	672
Lösungen der Aufgaben	673
Einheiten und Einheitensysteme	687
Tafeln	689
Physikalische Konstanten	692
Verzeichnis weiterführender Literatur	693

Sachverzeichnis	695
------------------------	-----

Periodensystem der Elemente	nach Seite 704
------------------------------------	----------------

Formelzeichen ¹⁾

1 Mechanik

A	Fläche	Q	Volumenstrom
\vec{a}	Beschleunigung	Re	Reynoldssche Zahl
c_A	Auftriebsbeiwert	r	Radius
c_W	Widerstandsbeiwert	\vec{s}	Weg, Länge
D	Federkonstante, Richtgröße	t	Zeit
\bar{D}	Grenzschichtdicke	\vec{u}	Geschwindigkeit
\vec{F}	Kraft	V	Volumen
F_A	Auftriebskraft	\vec{v}	Geschwindigkeit
F_B	Bodendruckkraft	W	Arbeit, Energie
F_D	Aufdruckkraft	W_{kin}	kinetische Energie
F_D	Druckwiderstandskraft	W_{pot}	potentielle Energie
F_G	Gewichtskraft	W_{rot}	Rotationsenergie
F_N	Normalkraft	W_B	Beschleunigungsarbeit
F_R	Reibungskraft	W_H	Hubarbeit
F_{RR}	Rollwiderstand	W_R	Reibungsarbeit
F_S	Seitendruckkraft	W_E	elastische Arbeit
F_W	Strömungswiderstand	x, y, z	Raumkoordinaten
F_t	Tangentialkraft		
F_{zp}	Zentripetalkraft	$\vec{\alpha}$	Winkelbeschleunigung
F_{zf}	Zentrifugalkraft	α	Anstellwinkel
f	Rollreibungslänge	Γ	Zirkulation
\vec{G}	Gravitationsfeldstärke	γ	Gravitationskonstante
g	Fallbeschleunigung	η	dynamische Zähigkeit, Viskosität
h	Höhe	η	Wirkungsgrad
I	Flächenträgheitsmoment	μ	Gleitreibungszahl
J	Massenträgheitsmoment	μ'	Haftreibungszahl
\vec{L}	Drehimpuls	μ_R	Rollreibungszahl
l	Länge	ν	kinematische Zähigkeit
\vec{M}	Drehmoment	ρ	Dichte
m	Masse	σ	Oberflächenenergiedichte
N	Anzahl der Umdrehungen	φ	Fluidität
n	Drehzahl	φ	Winkel
P	Leistung, Energiestrom	χ	Kompressibilität
\vec{p}	Bewegungsgröße, Impuls	ω	Winkelgeschwindigkeit
p	Druck	$\Delta\tau$	Zeitabschnitt

2 Wärmelehre

A_r	Atommassenverhältnis oder relative Atommasse	c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
b	Beweglichkeit	c_v	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen
C	Wärmekapazität	D	Diffusionskoeffizient
c	spezifische Wärmekapazität	f	Zahl der Freiheitsgrade der Energiespeicherung
c_A	molare Wärmekapazität	H	Enthalpie
c_{Ap}	molare Wärmekapazität bei konstantem Druck	h	spezifische Enthalpie
c_{AV}	molare Wärmekapazität bei konstantem Volumen	I	Informationsgehalt

¹⁾ Es werden jeweils nur die Formelzeichen angegeben, die in den betreffenden Abschnitten zusätzlich zu den bereits früher angegebenen auftreten.

I_w	Wärmestrom
k	Boltzmannkonstante
k	Wärmedurchgangskoeffizient
M_r	Molekülmassenverhältnis oder -zahl (nach DIN: relative Molekülmasse)
m_M	Masse eines Moleküls
N	Anzahl der Moleküle oder Atome
N_A	Avogadro-Konstante
n	Teilchendichte
Q	Wärme, Wärmenergie
R	allgemeine Gaskonstante
R_S	spezifische Gaskonstante
R_W	Wärmewiderstand
S	Entropie
s	spezifische Entropie
T	absolute Temperatur
u	atomare Masseneinheit
V_s	spezifisches Volumen
z	Stoßzahl
α	Absorptionsgrad
α	linearer Ausdehnungskoeffizient

α_0	linearer Ausdehnungskoeffizient bei 0 °C
β	Druckkoeffizient
β_0	Druckkoeffizient bei 0 °C
γ	Volumenausdehnungskoeffizient
γ_0	Volumenausdehnungskoeffizient bei 0 °C
ε	Emissionsgrad
ε	Leistungszahl einer Wärmepumpe
ε	Verdichtungsverhältnis
η	Wirkungsgrad
η_{ideal}	idealer Wirkungsgrad
ϑ	Temp. in °C ($\vartheta = (T - 273,15 \text{ K}) \text{ °C/K}$)
κ	Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten, Adiabatenexponent
λ	Wärmeleitfähigkeit
ν	Stoffmenge
σ	Strahlungskonstante
φ	absolute Luftfeuchte
φ	Einspritzverhältnis
φ_{rel}	relative Luftfeuchte
ϱ	Reflexionsgrad

3 Elektrizität und Magnetismus

\bar{A}	elektrochemisches Äquivalent
A_H	Hallkoeffizient
B	Blindleitwert
\vec{B}	magnetische Induktion
C	Kapazität
D	Durchgriff
\vec{D}	elektr. Erregung, Verschiebungsdichte
\vec{E}	elektrische Feldstärke
e_0	Elementarladung
F	Faraday-Konstante
\vec{F}_L	Lorentzkraft
G	Wirkleitwert
\vec{H}	magnetische Erregung
I	elektrischer Strom, Effektivstrom
i	Momentanwert des elektrischen Stroms
\vec{i}	Scheitelwert des elektrischen Stroms
\vec{J}	magnetische Polarisierung
\vec{J}_A	Amperesches magnetisches Moment
\vec{J}_C	Coulombsches magnetisches Moment
L	Induktivität
M	Gegeninduktivität
\vec{M}	Magnetisierung
N	Windungszahl
P	Wirkleistung
P_{mom}	Momentanleistung
P_B	Blindleistung
P_S	Scheinleistung
\vec{p}	elektrisches Dipolmoment
Q	elektrische Ladung
q	Momentanwert der elektrischen Ladung
R	elektrischer Widerstand, Wirkwiderstand
S	Steilheit
\vec{S}	elektrische Stromdichte

U	elektrische Spannung, Effektivspannung
u	Momentanwert der elektrischen Spannung
\hat{u}	Scheitelwert der elektrischen Spannung
\ddot{u}	Übersetzungsverhältnis
v_D	Driftgeschwindigkeit
w	Energiedichte
X	Blindwiderstand
Y	Scheinleitwert
Z	Scheinwiderstand
z	Wertigkeit
z	thermoelektrische Effektivität
α	Temperatur-Koeffizient des elektrischen Widerstandes
α	Thermokraft, Seebeckkoeffizient
ε_r	Dielektrizitätszahl
ε_0	elektr. Feldkonstante, Influenzkonstante
κ	spezifische elektrische Leitfähigkeit
κ	magnetische Suszeptibilität
μ_r	Permeabilitätszahl
μ_0	magnetische Feldkonstante, Induktionskonstante
Π	Peltierkoeffizient
Q	elektrische Raumladungsdichte
Q	spezifischer elektrischer Widerstand
Q	elektrische Flächenladungsdichte
τ	Zeitkonstante
Φ	magnetischer Fluss
φ	Phasenwinkel
φ	Potential
ψ_{el}	elektrischer Erregungsfluss
χ	spezifische magnetische Suszeptibilität

4 Strahlenoptik

a	Objektweite	n_L	Brechzahl gegen Luft
a'	Bildweite	r	Krümmungsradien von Linsen
c	Lichtgeschwindigkeit	u	maximale Unschärfe
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	y	Objektgröße
D	Brechkraft	y'	Bildgröße
d	Linsendicke	α	brechender Winkel
d_B	Blendendurchmesser	β'	Abbildungsmaßstab
e	Hauptebenenabstand zweier Linsen	Γ	Vergrößerung
f	Brennweite	δ	Ablenkungswinkel
f'	bildseitige Brennweite	ε	Winkel gegen Flächennormale
\bar{f}	objektseitige Brennweite	ϱ	Reflexionsfaktor
k	Blendenzahl	σ	Öffnungswinkel
n	Brechzahl	φ	Schwinkel

5 Schwingungs- und Wellenlehre

B_v	Leuchtdichte (visuell)	\hat{s}_s	Amplitude d. schwingungsfähigen Systems
b	Dämpfungskonstante	T	Schwingungsdauer
c	Phasengeschwindigkeit	u_E	Spannung des Erregers
D^*	Winkelrichtgröße	u_S	Spannung im schwingungsfähigen System
d	Gangunterschied	V	Hellempfindlichkeitsgrad
E_V	Beleuchtungsstärke (visuell)	v_{Gr}	Gruppengeschwindigkeit
F_E	Kraft des Erregers	\hat{v}	Geschwindigkeitsamplitude
F_e	elastische Kraft	w	Energiedichte
F_t	Trägheitskraft	\bar{w}	zeitlicher Mittelwert der Energiedichte
f	Frequenz	x	Weg der Welle
f_G	Grenzfrequenz	Y	Amplitude allgemein
g	Gitterkonstante	Z	Wellenwiderstand
h	Plancksche Konstante	α	Konstante des Wienschen Verschiebungsgesetzes
I_e	Strahlstärke (energetisch)	α	Extinktionskoeffizient
I_v	Lichtstärke (visuell)	δ	Abklingkonstante
K	Kopplungsgrad	ε	Auslenkungswinkel bei Drehschwingungen
k	Kreiswellenzahl	$\hat{\varepsilon}$	Amplitude von ε
L	Schallpegel	Λ	logarithmisches Dekrement
L_A, L_B, L_C	bewerteter Schallpegel	λ	Wellenlänge
L_S	Lautstärkepegel	Φ_v	Lichtstrom (visuell)
\hat{p}	Schalldruckamplitude	φ_0	Nullphasenwinkel
\hat{p}_0	Bezugsschalldruckamplitude	Ω	Raumwinkel
p_A	Strahlungsdruck bei Absorption	ω	Kreisfrequenz
p_R	Strahlungsdruck bei Reflexion	ω_0	Eigenkreisfrequenz des ungedämpften Systems
Q	Gütefaktor eines Resonators	ω_d	Eigenkreisfrequenz des gedämpften Systems
\bar{S}	Intensität, Schallintensität, Energiestromdichte	ω_r	Resonanzkreisfrequenz
s	Ausschlag		
\hat{s}	Amplitude		
s_s	Ausschlag d. schwingungsfähigen Systems		

6 Atom- und Kernphysik

A	Aktivität	D	Tunnelwahrscheinlichkeit
B	Übergangswahrscheinlichkeiten	D	Strahlungsdosis
B_{12}	Übergangswahrscheinlichkeiten	D_q	Äquivalentdosis
B_{21}	Übergangswahrscheinlichkeiten	\bar{D}	Dosisleistung
a	große Halbachse	$d_{1/2}$	Halbwertsdicke
b	kleine Halbachse	h	Plancksches Wirkungsquantum

\hbar	$= h/2\pi$
J	Ionendosis
j	Ionendosisleistung
k	Multiplikationsfaktor
l	Nebenquantenzahl
L_{ges}	Gesamtdrehimpuls
m	magnetische Quantenzahl
m_{H}	Masse des Wasserstoffatoms
m_e	Masse des Elektrons
m_n	Masse des Neutrons
m_p	Masse des Protons
m_s	Orientierungsquantenzahl
N	Anzahl der Atome
n	Hauptquantenzahl
q	Bewertungsfaktor
R_f	Rydbergfrequenz
R_{fH}	Rydbergfrequenz d. Wasserstoffs
R_{kH}	Rydbergkreiswellenzahl d. Wasserstoffs

R_{WH}	Rydbergenergie des Wasserstoffs
$R_{W\infty}$	Rydbergfrequenz des Wasserstoffs mit $m_p/m_e \approx \infty$
r_n	Radius der n -ten Bahn
r_1	Bohrscher Radius
s	Spinquantenzahl
$T_{1/2}$	Halbwertszeit
v_n	Geschwindigkeit auf der n -ten Bahn
W_a	Ablöse-, Austrittsarbeit
W_1	Ionisierungsenergie
W_K	Kernbindungsenergie
W_n	Energie des Elektrons auf der n -ten Bahn
Z	Kernladungszahl, Ordnungszahl
λ	Zerfallskonstante
μ	Flächendichte
σ	Wirkungsquerschnitt
Ψ	Wellenfunktion
ψ	zeitunabhängige Wellenfunktion

7 Festkörperphysik

A	Stromverteilung in Basisschaltung
B	Stromverstärkung in Emitterschaltung
B	Bruchdehnung
b_+	Löcher-Beweglichkeit
b_-	Elektronen-Beweglichkeit
E	Elastizitätsmodul
G	Schubmodul
H_k	kritische magnetische Erregung
I_B	Basis-Strom
I_C	Cooperpaar-Strom
I_C	Kollektor-Strom
I_D	Drain-Strom
I_C	Diffusions-Strom
I_{DSS}	Drain-Sättigungsstrom
I_E	Emitter-Strom
I_F	Feld-Strom
I_{sp}	Sperr-Strom
I_{CB0}	Kollektorsperrstrom in Basisschaltung
I_{CE0}	Kollektorsperrstrom in Emitterschaltung
I_{thr}	Schwellenstrom
$K_{\text{J-90}}$	Josephson-Konstante
N_C/N_C	Quantenausbeute
n_A	Akzeptorendichte
n_C	Cooperpaardichte
n_D	Donatorendichte
n_i	Eigenleitungsdichte
n_-	Elektronendichte
n_+	Löcherdichte
P_L	Lichtleistung
R_{B2}	} Teilwiderstände beim
R_{B1}	
R_{BE}	Unijunction-Transistor
R_{BE}	Basis-Emitter-Widerstand
R_{EB}	Emitter-Basis-Widerstand
R_{eH}	obere Streckgrenze
R_{eL}	untere Streckgrenze

R_{eS}	Streckgrenzenspannung
R_{H}	„Hall-Widerstand“
R_K	von-Klitzing-Konstante
R_m	Zugfestigkeit
R_R	Zerreißspannung
S	Steilheit
T_S	Sprungtemperatur
U_{BE}	Basis-Emitter-Spannung
U_{BB}	Basis-Basis-Spannung
U_{CB}	Kollektor-Basis-Spannung
U_{CE}	Kollektor-Emitter-Spannung
U_D	Diffusionsspannung
U_{DS}	Drain-Source-Spannung
U_{EB1}	Emitter-Basis 1-Spannung
U_{GS}	Gate-Source-Spannung
U_{H}	Hallspannung
U_Z	Zenerspannung
W_A	Energieniveau von Akzeptoren
W_B	Energieniveau von Aktivatorzentren
W_D	Energieniveau von Donatoren
W_F	Fermi-niveau
W_L	tiefste Energie des Leitungsbandes
W_{Li}	Lichtsumme
W_V	höchste Energie des Valenzbandes
ΔW_0	Randabstand
α	Scherwinkel
ε	Dehnung
μ	Poissonsche Zahl
σ	Spannung
ϑ_K	Klärtemperatur
ϑ_S	Schmelztemperatur
Φ_0	Flussquant
Φ_{SQ}	SQUID-Fluss

8 Relativitätstheorie

k	Kontraktionsfaktor
-----	--------------------

m_0	Ruhemasse
-------	-----------

Einleitung

Was ist Physik?

Was ist Physik? Diese Frage ist leichter gestellt als beantwortet. Wir beginnen daher zunächst mit einfachen Eingrenzungen, über welche Übereinstimmung herrscht.

Allgemeine Zustimmung findet sicher die Aussage, die Physik sei die Naturwissenschaft, in welcher versucht wird, möglichst viele Gesetzmäßigkeiten welche in der Welt der Körper herrschen, zu ergründen und zu verstehen. Hierauf beruht ja auch der Name; im Griechischen heißt Körper „physis“. Gemeint sind hierbei natürlich unbelebte materielle Körper. Diese erste Beschreibung der Physik ist sicher richtig. Trotzdem ist sie heute nicht mehr hinreichend, denn viele der physikalischen Gesetzmäßigkeiten und der Denkmethode finden inzwischen auch vielfältige Anwendungen in der belebten Natur, also der Biologie, und sogar in so komplexen Systemen, wie sie beispielsweise beim Zusammenleben vieler Menschen existieren, also in der Soziologie. Dies beruht auf der Erfahrung, dass sich erstaunlich viele vermeintlich völlig verschiedene Erscheinungen in den verschiedensten Gebieten mit gleichen Methoden beschreiben lassen.

Das ist offenbar ein entscheidender Gesichtspunkt: Die großen Erfolge der Physik, welche sie auch für viele andere Bereiche, nicht zuletzt auch für die Ingenieurwissenschaften, attraktiv macht, beruhen unter anderem darauf, dass sich die ungeheure Vielfalt der Natur mit verhältnismäßig wenigen Grundprinzipien beschreiben lässt.

Diese Methoden haben sich im Lauf der Jahrhunderte entwickelt. Der Anstoß dazu kam hierbei immer aus zwei Richtungen: Die eine ist das uralte Ringen der Menschen um Erkenntnis, die Frage nach dem Wesen der Welt und dem Standort der Menschen in ihr, also die Philosophie. Die andere Richtung, aus der von Anfang an immer wieder wichtige Anstöße kamen, ist die Technik, also das Bestreben, mit Hilfe der erkannten Naturgesetze die Welt in für uns nützlicher und angenehmer Weise zu verändern. Es ist selbstverständlich, dass Technik ohne ein gründliches Verstehen physikalischer Erkenntnisse nicht möglich ist.

Wie aber gewinnt man diese Erkenntnis? Hier gilt es nun, mit einer naiven Vorstellung aufzuräumen. Nach einer weit verbreiteten Meinung stellen die Physiker mit ihren geschickten Experimenten Fragen an die Natur, worauf diese dann die in ihr herrschenden Gesetze preisgibt. Man stellt sich die Physiker also etwa wie Forschungsreisende vor, die beispielsweise eine noch unbekannte, aber schon existierende Insel entdecken.

So einfach ist die Sache aber nicht, auch wenn man beim flüchtigen Lesen vieler Lehrbücher, auch des vorliegenden, in denen die physikalischen Gesetze so schön systematisch aufbereitet sind, diesen Eindruck gewinnen könnte. Es beginnt nämlich bereits bei der Tatsache, dass wir als Menschen zur Beschreibung der Natur immer wieder die dazu nötigen Begriffe erfinden mussten. Dies sei an einem simplen Beispiel erläutert, dem Begriff der Geschwindigkeit. Nirgends in der Natur konnten wir diesen Begriff entdecken. Wir mussten ihn erst durch eine willkürliche – hinzugefügt sei: und zweckmäßige – Definition erfinden, um mit ihm in vernünftiger Weise Bewegungsabläufe von Körpern beschreiben zu können. Die Geschwindigkeit ist bekanntlich definiert als Quotient aus einem Weg und der dafür benötigten Zeit. Genauso gut – vielleicht nicht so praktisch – hät-