
Physik für Ingenieure

Ekbert Hering · Rolf Martin ·
Martin Stohrer

Physik für Ingenieure

12. Auflage

 Springer Vieweg

Ekbert Hering
Hochschule für angewandte
Wissenschaften Aalen
Aalen, Deutschland

Martin Stohrer †

Rolf Martin
Köngen, Deutschland

Unter Mitarbeit von: Prof. Dr. Hanno Käß, Hochschule Esslingen Prof. Dr. G. Kurz, Hochschule Esslingen Dr. rer. nat. Wolfgang Schulz, Zweckverband Landeswasserversorgung Stuttgart

ISBN 978-3-662-49354-0
DOI 10.1007/978-3-662-49355-7

ISBN 978-3-662-49355-7 (eBook)

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 1985, 1988, 1990, 1992, 1995, 1997, 1999, 2002, 2004, 2007, 2012, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Germany

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Zum Geleit

Physikalische Grundlagen sind für den Ingenieur unerlässlich, weil sie sowohl prinzipielle Grenzen aufzeigen als auch eine klare Orientierung im schneller werdenden technischen Wandel bieten. Quantentheorie und Festkörperphysik sind derzeit die Schrittmacher des technischen Fortschritts; deshalb wird ihnen in diesem Buch der gebührende Platz eingeräumt. Mein Wunsch ist, dass die Erkenntnisse aus der physikalischen Grundlagenforschung einen erkennbaren praktischen Nutzen zeigen. So wie der Quanten-Hall-Effekt nicht nur die physikalischen Grundlagen gefördert hat, sondern auch in der Präzisionsmesstechnik als Widerstandsnormale von Bedeutung ist, sollte die Verbindung zwischen physikalischen Grundlagen und ingenieurmäßiger Umsetzung enger und effektiver werden.

Möge dieses Buch einen Beitrag dazu leisten.

*Prof. Dr. Klaus von Klitzing
Nobelpreisträger der Physik 1985*

Vorwort zur zwölften, aktualisierten Auflage

Mit der vergangenen 11. Auflage wurden bereits umfangreiche Aktualisierungen und Verbesserungen vorgenommen. Diese wurden von unserer Leserschaft sehr begrüßt. Sie haben uns auch ermuntert, die Struktur des Werkes beizubehalten, die Zusammenhänge in Übersichten zu verdichten, Vergleiche und praxisrelevante Zahlenwerte und Informationen in Tabellenform zusammenzustellen, viele praktische Beispiele aus dem Ingenieuralltag vorzustellen und die physikalischen Zusammenhänge kompakt und klar strukturiert darzustellen. Vor allem aber die Übungsaufgaben und die ausführliche Darlegung der Lösungswege fanden überall großes Lob. Auf Anregung unserer Leserschaft haben wir für die am häufigsten gelesenen oder heruntergeladenen Kapitel zusätzliche Übungsaufgaben erstellt und deren Lösungen beschrieben. Dies betrifft die Kapitel Mechanik, Thermodynamik, Elektrizitätslehre und Magnetismus, Schwingungen und Wellen sowie Optik und Akustik. Auf den Innenseiten des Werkes wurden die Werte der physikalischen Naturkonstanten, die häufig gebrauchte Umrechnung von Energiemaßen und Energieäquivalenten sowie alte oder außerhalb des SI ver-

wendete Maßeinheiten aufgeführt. Dadurch kann die Leserschaft schnell auf diese häufig benötigten Informationen zugreifen.

Ein Markenzeichen des Werkes ist auch, dass wir die aktuellen DIN-Normen benennen und uns auch strikt daran halten. Damit geben wir unseren Lesern für den praktischen Einsatz wichtige aktuelle und verlässliche Hinweise. Auch in der 12. Auflage haben wir deshalb die neuesten Normen eingepflegt und die international neu festgelegten Zahlenwerte für Konstanten aktualisiert sowie die Liste der Nobelpreisträger ergänzt. Viele Bilder wurden durch aktuellere ersetzt und Formulierungen komplexer Zusammenhänge noch treffender vorgenommen. Um Physikvorlesungen in der Struktur dieses Buches schnell vorbereiten und darbieten zu können, hat Herr *Prof. Dr. Axel Löffler* zusätzlich Folien in Power-Point erstellt. Diese sind für Dozenten gedacht und können passwortgeschützt von dieser Seite heruntergeladen werden: <http://www.springer.com/de/book/9783662493540>

Unser Mitherausgeber und Koautor *Prof. Dr. Martin Stohrer* lebt leider nicht mehr. Er war für uns ein langjähriger, liebenswerter Freund und für unsere Leserschaft ein exzellenter Fachmann auf dem Gebiet der Akustik und der Wärme- und Stoffübertragung sowie ein maßgebender und engagierter Verfechter der erfolgreichen Struktur dieses Werkes. Weil dieses Werk mit der Bezeichnung „HMS“ (Hering, Martin, Stohrer) seit vielen Jahren ein Markenzeichen ist, haben wir den Titel beibehalten. Gleichwohl haben wir mit *Prof. Dr. Hanno Käß* von der Hochschule Esslingen einen jungen, engagierten Physiker mit praktischer Erfahrung in der Industrie und Lehrerefahrung an Hochschulen gewinnen können. Er wird mit seiner aktuellen Erfahrung in Lehre, Forschung und Transfer das Werk qualitativ voll weiterentwickeln. Darauf freuen wir uns sehr.

Dank sagen möchten wir vor allem Herrn *Dr. Hubertus von Riedesel* und Frau *Eva Hestermann-Beyerle* vom Springer Verlag. Sie geben uns mit jeder Auflage aufs Neue die Chance, das erfolgreiche Standardwerk den neuen Bedürfnissen der Leserschaft anzupassen. Mit ihrer professionellen und freundlichen Betreuung haben sie uns immer motiviert, mit großem Energieeinsatz an diesem Werk zu arbeiten. Die außerordentlich positive Resonanz von Studierenden, Kollegen aus den Hochschulen und Persönlichkeiten aus der Industrie und der Wissenschaft sowie die vielen ermunternden Zuschriften und Verbesserungsvorschläge haben dieses Werk zusätzlich aktualisiert. In alter Verbundenheit möchten wir die Kollegen aus der Universität München erwähnen: *Prof. Dr. J. de Boer*, *Prof. Dr. K.E.G. Löbner* und *Prof. Dr. K.-H. Speidel* sowie die Kollegen *Prof. Dr. J. Massig* und *Prof. Dr. D. Weber* von der Hochschule Aalen. Stellvertretend für die vielen Persönlichkeiten, die uns beim Gelingen dieses aktuellen Werkes unterstützt haben, möchten wir nennen: Herrn *Dr. Norbert Südland* von der Universität Ulm für die Durchrechnung vieler Übungsaufgaben und die wertvollen Hinweise, *Prof. Dr. U. Weiss* von der Universität Stuttgart, *Prof. Dr. G. Prillinger* und Frau *Prof. Dr. R. Hiesgen* von der Hochschule Esslingen, Herrn *Dr. R. Behr* von der Physikalisch Technischen Bundesanstalt sowie Herrn *Dr. H. D. Rüter* von der Universität Hamburg, der uns bei der Darstellung der Quantenmechanik sehr geholfen hat. Ausgezeichnete Unterstützung erhielten wir wieder von Fachleuten aus der Industrie, denen wir allen ganz herzlich danken möchten.

Wir wünschen unseren Leserinnen und Lesern beim Arbeiten mit diesem Werk gute Erkenntnisse in der faszinierenden Welt der Physik und viel Freude beim Lernen. Sehr gerne nehmen wir konstruktive Hinweise aus dem sachkundigen Leserkreis auf und freuen uns auf Ihre Hinweise.

Aalen, Esslingen
Frühjahr 2017

Eckbert Hering
Rolf Martin

Vorwort zur ersten Auflage

Das vorliegende Lehrbuch gibt eine Einführung in die physikalischen Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Es ist das Anliegen des Buches, eine Brücke zu schlagen zwischen grundlegenden physikalischen Effekten und den Anwendungsfeldern der Ingenieurpraxis. Es ist deshalb selbstverständlich, dass ausschließlich SI-Maßeinheiten verwendet werden und in den entsprechenden Abschnitten auf DIN- bzw. ISO-Normen hingewiesen wird. Bei der Stoffauswahl sind besonders die modernen Teilgebiete berücksichtigt, wie beispielsweise Festkörperphysik (einschließlich Halbleiterphysik und Optoelektronik), technische Akustik, Lasertechnik, Holografie, Klimatechnik und Wärmeübertragung sowie in der Atom- und Kernphysik der quantisierte Hall-Effekt. Ein Sonderabschnitt Strahlenschutz informiert über die Strahlenbelastung aus Kernkraftwerken, über die physikalische und biologische Wirksamkeit radioaktiver Stoffe, die Strahlenmesstechnik sowie über die neuen gesetzlichen Vorschriften zum Strahlenschutz.

Zum mathematischen Verständnis sind die Verfahren der Differenzial-, Integral- und Vektorrechnung notwendig; allerdings sind die entsprechenden Herleitungen so ausführlich, dass auch der Leser mit geringen Vorkenntnissen zu folgen vermag. Das Buch ist so konzipiert, dass es sich nicht nur an Studenten wendet, sondern auch praktizierenden Ingenieuren die physikalischen Grundlagen zur Einarbeitung in neue Fachgebiete und zur Weiterbildung liefert. Somit ist es auch eine Basis für eine flexible berufliche Entwicklung.

Im ersten Abschnitt sind die Methode physikalischen Erkennens und der Aufbau der Physik erläutert. Die Physik soll in ihren Zusammenhängen begriffen und nicht als bloße Aneinanderreihung spezieller physikalischer Gesetze missdeutet werden. Der Stoff ist in die Abschnitte Mechanik, Thermodynamik, Elektrizität und Magnetismus, Schwingungen und Wellen, Optik, Akustik, Atom- und Kernphysik, Festkörperphysik sowie Relativitätstheorie eingeteilt. Jedem Abschnitt ist ein Strukturbild vorangestellt, das die jeweiligen Teilbereiche und ihre gesetzmäßigen Zusammenhänge aufzeigt. Damit soll das Denken in Zusammenhängen gefördert und den Details ihr Platz im Gesamtgefüge zugewiesen werden. Übergreifende Darstellungen (z. B. beim Feldbegriff in der Mechanik, Thermodynamik und Elektrizitätslehre) sollen dem Leser darüber hinaus das universelle Denkkonzept der Physik vor Augen führen. Komplizierte Zusammenhänge sind in zweifarbigen Skizzen oder durch Rechnerausdrucke veranschaulicht; zahlreiche Bilder aus der Technik vermitteln einen aktuellen Praxisbezug.

Um zu zeigen, wie sich die physikalische Erkenntnis durch die Genialität einzelner Physiker sprunghaft entwickelt hat, sind in den entsprechenden Abschnitten die Meilensteine der Physik und ihre Wegbereiter genannt und im Anhang die Physik-Nobelpreisträger aufgeführt.

Zur Vertiefung des Verständnisses enthalten viele Unterabschnitte aus der Ingenieurpraxis stammende Berechnungsbeispiele. Aufgaben (mit Lösungen im Anhang) ermöglichen es dem Leser, selbst den Stoff zu üben und sein physikalisches Wissen zu vertiefen. Um alternative Fragestellungen zu untersuchen und physikalische Sachverhalte grafisch zu veranschaulichen, wurden programmierbare Rechner verwendet. Den Firmen Casio und Sharp, insbesondere den Herren *Newerkla* und *Wachter*, möchten wir für die Bereitstellung programmierbarer Taschenrechner danken.

Wir danken unseren akademischen Lehrern und Vorbildern, die uns zur physikalischen Erkenntnis geführt haben, vor allem den Professoren *U. Dehlinger*, *H. Haken*, *M. Pilkuhn*, *A. Seeger* und *C.F. von Weizsäcker*. Für konstruktive Kritik bedanken wir uns bei unseren Kollegen *H. Bauer*, *M. Käß*, *P. Kleinheins*, *G. Kneer*, *J. Linser* und *R. Schempp*. Frau *G. Folz* und den Herren *K. Schmid* und *A. Plath* danken wir für ihre tatkräftige Mithilfe. Der Unterstützung vieler Firmen ist es zu verdanken, dass aktuelles Anschauungsmaterial bereitgestellt werden konnte. Hierbei sind besonders folgende Firmenmitarbeiter zu erwähnen: *B. Imb* (BBC), *P. Gradischnig* (BMW), *D. Stöckel* und *P. Tautzenberger* (Rau), *M. Mayer* (Osram), *F. Schreiber* (Siemens), *H. Garrels* (Varta) und *H. Schweikart* (Voith). Ganz besonderer Dank gebührt dem VDI-Verlag, speziell Herrn Dipl.-Ing. *H. Kurt*, der das Lektorieren übernahm und für die reibungslose Abwicklung in erfreulicher Atmosphäre sorgte. Dabei wurde er in den Abschnitten 2, 3 und 6 von Professor *F. Hell* in besonders sachkundiger Weise unterstützt. Zuletzt möchten wir unseren Familien für ihre Geduld, ihre moralische Unterstützung und ihr großes Verständnis danken.

Wir hoffen, dass dieses Buch den Ingenieurstudenten eine gute Hilfe beim Erarbeiten physikalischer Zusammenhänge und den Ingenieuren in der Praxis ein brauchbares Nachschlagewerk ist. Gern nehmen wir Kritik und Verbesserungsvorschläge entgegen.

Aalen, Esslingen und Stuttgart,
Januar 1988

Ekkert Hering
Rolf Martin
Martin Stohrer

Verwendete physikalische Symbole

(Symbole, die in nachfolgenden Abschnitten die gleiche Bedeutung haben, sind nur einmal angegeben.)

2. Mechanik

A	Fläche
a	Beschleunigung
c	Lichtgeschwindigkeit; Schallgeschwindigkeit
c_A	Auftriebsbeiwert
c_D	Druckwiderstandsbeiwert
c_M	Momentenbeiwert
c_W	Widerstandsbeiwert
d	Abstand; Dickenänderung
E	Energie; Elastizitätsmodul
e	Einheitsvektor
F	Kraft
Fr	Froudezahl
G	Schubmodul, Gravitationskonstante
g	Gravitationsfeldstärke
g	Fallbeschleunigung
H	Fallhöhe; Förderhöhe
h	Höhe
I	Flächenträgheitsmoment
J	Massenträgheitsmoment
j	Transportflussdichte; Massenstromdichte
K	Kompressionsmodul
k	Federsteifigkeit; Rauigkeit
k_t	Drehfedersteifigkeit
L	Drehimpuls
l	Länge
M	Drehmoment
Ma	Mach'sche Zahl
m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
n	Drehzahl

P	Leistung
p	Impuls
p	Druck; Anteil
Q	Förderstrom (Pumpen); Volumenstrom (Turbinen)
R	Gaskonstante; Krümmungsradius
r	Ortsvektor
Re	Reynoldszahl
s	Ortskoordinate
s	Weg; Bogenlänge
T	Kelvin-Temperatur; Periodendauer
t	Zeit
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
v	Geschwindigkeit
W	Arbeit
w	spezifische (massebezogene) Arbeit
α	Durchflusszahl; Kontraktionszahl; Winkelbeschleunigung
β	Winkel
Γ	Zirkulation
γ	Schiebung; Scherwinkel; Raumausdehnungskoeffizient
Δ	Differenz
ε	Neigungswinkel; Dehnung; Expansionszahl; Gleitzahl
η	dynamische Viskosität; Wirkungsgrad
ϑ	Celsius-Temperatur
κ	Kompressibilität
λ	Rohrreibungszahl
μ	Reibungszahl; Ausflusszahl; Poissonzahl
ν	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
σ	Spannung; Normalspannung
τ	Schubspannung
Φ	Transportgröße
φ	Drehwinkel; Potenzialfunktion; Geschwindigkeitsziffer; Fluidität
φ_G	Gravitationspotenzial
ω	Winkelgeschwindigkeit

3. Thermodynamik

a	Temperaturleitfähigkeit
C, C_m, c	Wärmekapazität, molare bzw. spezifische Wärmekapazität
C_{mp}, c_p	isobare molare bzw. isobare spezifische Wärmekapazität
C_{mV}, c_V	isochore molare bzw. isochore spezifische Wärmekapazität
C_{12}	Strahlungsaustauschkoeffizient
c	Schallgeschwindigkeit
E_A	Aktivierungsenergie

\bar{E}_{kin}	mittlere kinetische Energie eines Moleküls
F, F_m, f	freie Energie, freie molare bzw. freie spezifische Energie
f	Anzahl der Freiheitsgrade; Wärmequellendichte
G, G_m, g	freie Enthalpie, freie molare bzw. freie spezifische Enthalpie
g_i	statistisches Gewicht des Zustandes i
H, H_m, h	Enthalpie, molare bzw. spezifische Enthalpie
j_q	Wärmestromdichte
k	Boltzmann-Konstante; Wärmedurchgangskoeffizient
M	Molmasse
M_e	spezifische Ausstrahlung
m_M	Masse eines Moleküls
N	Teilchenanzahl eines Systems
n	Polytropenexponent, Teilchenzahldichte
N_A	Avogadro-Konstante
P_i	Wahrscheinlichkeit der Besetzung des Zustands i
p	Druck
Q, Q_m, q	Wärme, molare bzw. spezifische Wärme
\dot{Q}	Wärmestrom
R_i, R_m	individuelle bzw. allgemeine (molare) Gaskonstante
S, S_m, s	Entropie, molare bzw. spezifische Entropie
T	thermodynamische Temperatur
U, U_m, u	innere Energie, molare bzw. spezifische innere Energie
V, V_m, v	Volumen, molares bzw. spezifisches Volumen
v_m, \bar{v}, v_w	mittlere, durchschnittliche bzw. wahrscheinlichste Geschwindigkeit von Gasmolekülen
W	thermodynamische Wahrscheinlichkeit
x	Feuchtegrad
Z	Realgasfaktor
α	Längenausdehnungskoeffizient; Absorptionsgrad
α^*	Wärmeübergangskoeffizient
γ	Raumausdehnungskoeffizient
ε	Emissionsgrad; Kompressionsverhältnis
$\varepsilon_K, \varepsilon_W$	Leistungszahl einer Kältemaschine bzw. einer Wärmepumpe
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad
κ	Isentropen-(Adiabaten-)Exponent
λ	Wärmeleitfähigkeit
ν	Stoffmenge (Teilchenmenge)
ϱ	Dichte; Reflexionsgrad
τ	Transmissionsgrad
Φ_e	Strahlungsleistung
φ	relative Luftfeuchte
φ_a	absolute Luftfeuchte
φ_{12}	Einstrahlzahl

4. Elektrizität und Magnetismus

A_r	relative Atommasse
\ddot{A}	elektrochemisches Äquivalent
A_H	Hall-Koeffizient
\mathbf{B}	magnetische Induktion, Flussdichte
B	Blindleitwert, Suszeptanz
B_R	Remanenzinduktion
B_S	Sättigungsinduktion
C	Kapazität
\mathbf{D}	elektrische Verschiebungsdichte
\mathbf{E}	elektrische Feldstärke
E_H	Hall-Feldstärke
e	Elementarladung
\mathbf{F}_L	Lorentz-Kraft
F	Faraday-Konstante
f	Spulenformfaktor
G	Leitwert, Konduktanz
\mathbf{H}	magnetische Feldstärke
H_C	Koerzitivfeldstärke
I, i	elektrische Stromstärke
\hat{i}	Amplitude der elektrischen Stromstärke
I, i_{eff}	Effektivwert der Wechselstromstärke
\mathbf{J}	magnetische Polarisierung
j	elektrische Stromdichte
L	Induktivität
\mathbf{M}	Magnetisierung
m	Ampere'sches magnetisches Moment
m_C	Coulomb'sches magnetisches Moment
N	Windungszahl
\mathbf{P}	elektrische Polarisierung
P, p	Leistung
p	elektrisches Dipolmoment
Q	elektrische Ladung; Blindleistung
R	elektrischer Widerstand
R_m	magnetischer Widerstand
S	Scheinleistung
T_C	Curie-Temperatur
T_N	Néel-Temperatur
U, u	elektrische Spannung
\hat{u}	Amplitude der elektrischen Spannung
U, u_{eff}	Effektivwert der elektrischen Spannung
U_H	Hall-Spannung
u_{ind}	induzierte Spannung
W_A	Austrittsarbeit
W_{el}	elektrische Arbeit und Feldenergie
w_{el}	elektrische Energiedichte
W_{magn}	magnetische Arbeit und Feldenergie

w_{magn}	magnetische Energiedichte
X	Blindwiderstand, Reaktanz
Z	Scheinwiderstand, Impedanz
z	Wertigkeit
α	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes
γ	Spannungsfaktor
ε	Permittivität
ε_0	elektrische Feldkonstante
ε_r	Permittivitätszahl
κ	elektrische Leitfähigkeit, Konduktivität
μ	Permeabilität
μ_0	magnetische Feldkonstante
μ_r	Permeabilitätszahl
ϱ	spezifischer elektrischer Widerstand, Resistivität
Q	Raumladungsdichte
σ	Streifaktor; elektrische Flächenladungsdichte
τ	Zeitkonstante
φ	elektrisches Potenzial; Verlustwinkel
χ_e	elektrische Suszeptibilität
χ_m	magnetische Suszeptibilität
Θ	elektrische Durchflutung
Φ	magnetischer Fluss
ψ	elektrischer Fluss

5. Schwingungen und Wellen

c	Phasengeschwindigkeit
c_{gr}	Gruppengeschwindigkeit
d	Dämpfungskoeffizient
f	Frequenz
f_0, f_d	Eigenfrequenz der freien ungedämpften bzw. gedämpften Schwingung
f_{Res}	Resonanzfrequenz
f_S	Schwebungsfrequenz
j	$\sqrt{-1}$
k	Federsteifigkeit; Wellenzahl
k_t	Drehfedersteifigkeit
Q	Güte
I, S	Intensität
T	Periodendauer
T_0, T_d	Periodendauer der freien ungedämpften bzw. gedämpften Schwingung
T_S	Periodendauer der Schwebung
w	Energiedichte
y	Auslenkung
\hat{y}	Amplitude

β	Auslenkungswinkel
$\hat{\beta}$	Amplitude des Auslenkungswinkels
γ	Phasenverschiebung zwischen Erreger und Schwinger
Δ	Gangunterschied
δ	Abklingkoeffizient
η	Kreisfrequenzverhältnis
ϑ	Dämpfungsgrad
Λ	logarithmisches Dekrement
λ	Wellenlänge
φ	Phasenwinkel
φ_0	Nullphasenwinkel
$\Delta\varphi$	Phasenverschiebung zwischen zwei Schwingungen
ω	Kreisfrequenz
ω_0, ω_d	Kreisfrequenz der freien ungedämpften bzw. gedämpften Schwingung
Ω	Erregerkreisfrequenz
ω_{Res}	Resonanzkreisfrequenz

6. Optik

A_N	numerische Apertur
a, a'	Gegenstands- bzw. Bildweite
A, B	Einstein-Koeffizienten
b	Spaltbreite
D'	Brechkraft
$D_{\text{AP}}, D_{\text{EP}}$	Durchmesser von Austritts- bzw. Eintrittspupille
E_e	Bestrahlungsstärke
E_v	Beleuchtungsstärke
E_{ph}	Energie eines Photons
e	Abstand zweier Linsen
f, f'	gegenstandsseitige bzw. bildseitige Brennweite
g	Gitterkonstante
H_e	Bestrahlung
H_v	Beleuchtung
h	Planck'sche Konstante
I	Intensität
I_e	Strahlstärke
I_v	Lichtstärke
K_m	fotometrisches Strahlungsäquivalent
k	Blendenzahl
l	Kohärenzlänge
L_e	Strahldichte
L_v	Leuchtdichte
M_e	spezifische Ausstrahlung
M_v	spezifische Lichtausstrahlung
m	Ordnungszahl bei Interferenzen
N_i	Besetzungszahl des Niveaus i

n	Brechungsindex
p	Gitterstrichzahl
Q_e	Strahlungsenergie
Q_v	Lichtmenge
r	Krümmungsradius
s, s'	gegenstandsseitige bzw. bildseitige Schnittweite
u'	Durchmesser des Unschärfekreises
V	Hellempfindlichkeitsgrad
y, y'	Gegenstands- bzw. Bildgröße
Z	Dämmerungszahl
z, z'	Abstand vom Gegenstand bzw. Bild zum jeweiligen Brennpunkt
α	brechender Winkel eines Prismas
β'	Abbildungsmaßstab
Γ'	Vergrößerung
δ	Ablenkungswinkel
ε	Einfallswinkel
ε_r	Reflexionswinkel
ε'	Brechungswinkel
ε_p	Polarisationswinkel
Θ	Glanzwinkel
σ	Winkel zwischen Strahl und optischer Achse
τ	Lebensdauer
Φ_e	Strahlungsleistung
Φ_v	Lichtstrom
φ	Zentriwinkel
Ω	Raumwinkel

7. Akustik

A	äquivalente Schallabsorptionsfläche
B	Biegesteifigkeit
d	Absorberdicke
f_G	Grenzfrequenz der Spuranpassung
G_{pU}	Übertragungsmaß elektroakustischer Wandler
I	Schallintensität
L	Schallpegel
L_S	Lautstärke
L_n	Norm-Trittschallpegel
m''	flächenbezogene Masse
P	Schalleistung
p	Schalldruck
R	Schalldämm-Maß
r	Reflexionsfaktor
S	Lautheit; Fläche
T	Nachhallzeit
v	Schallschnelle

w	Schallenergiedichte
y	Elongation
Z	Schallkennimpedanz
α	Schallausbreitungs-Dämpfungskoeffizient
α_s	Schallabsorptionsgrad
δ	Einfallswinkel
Δ	Bewertungsfaktor
ϱ_s	Schallreflexionsgrad
τ_s	Schalltransmissionsgrad

8. Atom- und Kernphysik

A	Nukleonenzahl; Aktivität
A_S	spezifische Aktivität
a_0	Bohr'scher Radius des Wasserstoffatoms im Grundzustand
B	Baryonenzahl
D, \dot{D}	Energiedosis, Energiedosisleistung
D_q, \dot{D}_q	Äquivalentdosis, Äquivalentdosisleistung
d	Flächenmasse
E	Energie-Eigenwert
E_B	Bindungsenergie
E_S	Schwellenenergie
F, F	Gesamtdrehimpuls des Atoms einschließlich Kerndrehimpuls, zugehörige Quantenzahl
g	Faktor nach Landé
H	Hamilton-Funktion
\hat{H}	Hamilton-Operator
h	Planck'sches Wirkungsquantum ($\hbar = h/(2\pi)$)
I, I	Kerndrehimpuls, zugehörige Quantenzahl
J, J	Gesamtdrehimpuls der Elektronenhülle, zugehörige Quantenzahl
j, j	Gesamtdrehimpuls eines Elektrons, zugehörige Quantenzahl
L, L	Gesamtbahndrehimpuls der Elektronenhülle, zugehörige Quantenzahl
L	Leptonenzahl
l, l	Bahndrehimpuls eines Elektrons, zugehörige Quantenzahl
m_1	magnetische Quantenzahl des Drehimpulses
m_s	magnetische Quantenzahl des Spins
m_j	magnetische Quantenzahl des Gesamtdrehimpulses
m_0	Ruhemasse
N	Neutronenzahl
n	Hauptquantenzahl
Q	Kern-Quadrupolmoment
R	Reichweite
R_H	Rydberg-Konstante
S	Gesamtspinmoment

s, s	Elektronenspin, zugehörige Quantenzahl (Spinquantenzahl)
$t_{1/2}$	Halbwertszeit
u	atomare Masseneinheit
x	Schichtdicke
Z	Kernladungszahl (Ordnungszahl, Protonenzahl)
α	Feinstrukturkonstante
γ	gyromagnetisches Verhältnis
λ	Zerfallskonstante; Wellenlänge
$\boldsymbol{\mu}, \mu$	magnetisches Moment
μ	Absorptionskoeffizient
μ_K	Kern-Magneton
μ_B	Bohr'sches Magneton
ν	Frequenz
Π	Paritätsquantenzahl
Σ	makroskopischer Wirkungsquerschnitt
σ	Wirkungsquerschnitt
Φ	Flussdichte
Ψ	zeitabhängige Wellenfunktion
ψ	Wellenfunktion

9. Festkörperphysik

A	Fläche; Transistor-Stromverstärkung in Basisschaltung
a	Gitterkonstante
B	Transistor-Stromverstärkung in Emitterschaltung
B_c	kritische magnetische Flussdichte
c_{gr}	Gruppengeschwindigkeit
c_{ph}	Phasengeschwindigkeit
$D(E)$	Zustandsdichte
D^*	Detektivität
E_B	Bindungsenergie
E_e	Bestrahlungsstärke
E_F	Fermi-Energie
E_g	Breite der verbotenen Zone
$f(E)$	Fermi-Dirac-Verteilungsfunktion
I_B, I_C, I_E	Basis-, Kollektor- bzw. Emitterstrom
I_F	Flussstrom
I_{ph}	Fotostrom
I_S	Sperrsättigungsstrom
I_{th}	Schwellstrom
j_c	kritische Stromdichte
k	Wellenzahl
k_F	Fermi-Vektor
L	Kristall-Länge; Lorenz'sche Zahl
l	mittlere freie Weglänge

M	Molmasse; Multiplikationsfaktor
N_L, N_v	effektive Zustandsdichte im Leitungsband bzw. im Valenzband
n	Elektronenkonzentration
n_A, n_D	Akzeptoren- bzw. Donatorenkonzentration
n_i	Eigenleitungs-dichte
n_{ph}	Phononendichte
\bar{n}	Brechungsindex
p	Löcherkonzentration
S	Empfindlichkeit
T_c	kritische Temperatur
T_D	Debye-Temperatur
T_E	Einstein-Temperatur
T_F	Fermi-Temperatur
T_0	charakteristische Temperatur
U_d	Diffusionsspannung
U_F	Flussspannung
U_K	Kontaktspannung
U_L	Leerlaufspannung
U_{th}	Thermospannung
$V(\lambda)$	Hellempfindlichkeitsgrad
v_d	Driftgeschwindigkeit
v_F	Fermi-Geschwindigkeit
α	Absorptionskoeffizient; Madelung-Konstante; thermischer Ausdehnungskoeffizient
$\bar{\epsilon}$	mittlere Energie eines Atoms
η	Quantenausbeute
μ, μ_n, μ_p	Beweglichkeit, Elektronen- bzw. Löcherbeweglichkeit
Φ_0	magnetisches Flussquantum

10. Spezielle Relativitätstheorie

l, l'	Länge im System S bzw. S'
m, m_0	bewegte Masse bzw. Ruhemasse
t, t'	Zeit im System S bzw. S'
u	Geschwindigkeit
v	Systemgeschwindigkeit
γ	relativistischer Faktor

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Physikalischer Erkenntnisprozess	1
1.2	Bereiche der physikalischen Erkenntnis	3
1.3	Physikalische Größen	6
1.3.1	Definition und Maßeinheit	6
1.3.2	Messgenauigkeit	7
1.3.3	Fehlerfortpflanzung	13
1.3.4	Kurvenanpassung	13
1.3.5	Ausgleichsgeradenkonstruktion	15
1.3.6	Korrelationsanalyse	16
1.3.7	Zur Übung	17
2	Mechanik	19
2.1	Einführung	19
2.2	Kinematik des Punktes	20
2.2.1	Eindimensionale Kinematik	21
2.2.2	Dreidimensionale Kinematik	26
2.2.3	Kreisbewegungen	29
2.2.4	Zur Übung	32
2.3	Grundgesetze der klassischen Mechanik	32
2.3.1	Konzept der klassischen Dynamik	32
2.3.2	Newton'sche Axiome	33
2.3.3	Masse	34
2.3.4	Kraft	34
2.3.5	Zur Übung	38
2.4	Dynamik in bewegten Bezugssystemen	38
2.4.1	Relativ zueinander geradlinig bewegte Bezugssysteme	38
2.4.2	Gleichförmig rotierende Bezugssysteme	40
2.4.3	Zur Übung	44
2.5	Impuls	44
2.5.1	Impuls eines materiellen Punktes	44
2.5.2	Impuls eines Systems materieller Punkte	45
2.5.3	Raketengleichung	47
2.5.4	Zur Übung	49
2.6	Arbeit und Energie	50

2.6.1	Arbeit	50
2.6.2	Leistung, Wirkungsgrad	52
2.6.3	Energie	54
2.6.4	Energieerhaltungssatz	54
2.6.5	Zur Übung	55
2.7	Stoßprozesse	55
2.7.1	Übersicht und Grundbegriffe	55
2.7.2	Gerader, zentraler, elastischer Stoß	56
2.7.3	Gerader, zentraler, unelastischer Stoß	58
2.7.4	Schiefe, zentrale Stöße	60
2.7.5	Zur Übung	61
2.8	Drehbewegungen	61
2.8.1	Drehmoment	61
2.8.2	Newton'sches Aktionsgesetz der Drehbewegung	62
2.8.3	Arbeit, Leistung und Energie bei der Drehbewegung	63
2.8.4	Drehbewegungen von Systemen materieller Punkte	64
2.8.5	Analogie Translation und Rotation	65
2.8.6	Zur Übung	66
2.9	Mechanik starrer Körper	67
2.9.1	Freiheitsgrade und Kinematik	67
2.9.2	Kräfte am starren Körper	68
2.9.3	Schwerpunkt und potenzielle Energie eines starren Körpers	71
2.9.4	Kinetische Energie eines starren Körpers	72
2.9.5	Massenträgheitsmomente starrer Körper	74
2.9.6	Kreisel	80
2.9.7	Zur Übung	85
2.10	Gravitation	85
2.10.1	Beobachtungen	85
2.10.2	Newton'sches Gravitationsgesetz	87
2.10.3	Hubarbeit und potenzielle Energie	89
2.10.4	Satellitenbahnen	91
2.10.5	Zur Übung	92
2.11	Mechanik deformierbarer fester Körper – Elastomechanik	92
2.11.1	Elastische Verformung	93
2.11.2	Plastische Verformung	100
2.11.3	Härte fester Körper	102
2.11.4	Zur Übung	103
2.12	Mechanik der Flüssigkeiten und Gase-, Hydro- und Aeromechanik	105
2.12.1	Ruhende Flüssigkeiten (Hydrostatik) und ruhende Gase (Aerostatik)	105
2.12.2	Fluide – strömende Flüssigkeiten (Hydrodynamik) und Gase (Aerodynamik)	117
3	Thermodynamik	153
3.1	Grundlagen	153
3.1.1	Einführung	153
3.1.2	Thermodynamische Grundbegriffe	155

3.1.3	Temperatur	156
3.1.4	Thermische Ausdehnung	158
3.1.5	Allgemeine Zustandsgleichung idealer Gase	162
3.1.6	Zur Übung	164
3.2	Kinetische Gastheorie	164
3.2.1	Gasdruck	164
3.2.2	Thermische Energie und Temperatur	166
3.2.3	Geschwindigkeitsverteilung der Gasmoleküle	168
3.2.4	Zur Übung	170
3.3	Hauptsätze der Thermodynamik	170
3.3.1	Wärme	170
3.3.2	Zur Übung	172
3.3.3	Erster Hauptsatz der Thermodynamik	173
3.3.4	Berechnung der Wärmekapazitäten	176
3.3.5	Spezielle Zustandsänderungen idealer Gase	179
3.3.6	Kreisprozesse	186
3.3.7	Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	195
3.3.8	Thermodynamische Potenziale	203
3.3.9	Dritter Hauptsatz der Thermodynamik	204
3.4	Zustandsänderungen realer Gase	205
3.4.1	Van-der-Waals'sche Zustandsgleichung	205
3.4.2	Gasverflüssigung (Joule-Thomson-Effekt)	208
3.4.3	Phasenumwandlungen	209
3.4.4	Dämpfe und Luftfeuchtigkeit	216
3.5	Wärmeübertragung	219
3.5.1	Wärmeleitung	220
3.5.2	Konvektion	225
3.5.3	Wärmestrahlung	230
3.5.4	Wärmedurchgang	234
3.5.5	Zur Übung	236
4	Elektrizität und Magnetismus	237
4.1	Physikalische Gesetze und Definitionen	238
4.1.1	Ladung	239
4.1.2	Stromstärke	240
4.1.3	Spannung	241
4.1.4	Widerstand und Leitwert	242
4.1.5	Ohm'sches Gesetz	245
4.1.6	Kirchhoff'sche Regeln im verzweigten Stromkreis	246
4.1.7	Schaltung von Widerständen	248
4.1.8	Messbereichserweiterung	251
4.1.9	Ausgewählte Messanordnungen	252
4.1.10	Klemmenspannung und innerer Widerstand	254
4.1.11	Schaltung von Spannungsquellen	255
4.1.12	Elektrische Leistung und elektrische Arbeit	257
4.1.13	Zur Übung	259
4.2	Ladungstransport in Flüssigkeiten und Gasen	259
4.2.1	Ladungstransport in Flüssigkeiten	259

4.2.2	Ladungstransport im Vakuum und in Gasen	274
4.2.3	Plasmaströme	281
4.2.4	Zur Übung	282
4.3	Elektrisches Feld	282
4.3.1	Allgemeiner Feldbegriff	282
4.3.2	Beschreibung des elektrischen Feldes	282
4.3.3	Elektrische Feldstärke und Kraft	283
4.3.4	Elektrische Feldstärke und elektrostatisches Potenzial	286
4.3.5	Bewegung geladener Teilchen im elektrischen Feld	290
4.3.6	Leiter im elektrischen Feld	295
4.3.7	Nichtleiter im elektrischen Feld, elektrische Polarisation und Permittivitätszahl	303
4.3.8	Energieinhalt des elektrischen Feldes	312
4.3.9	Zur Übung	313
4.4	Magnetisches Feld	314
4.4.1	Beschreibung des magnetischen Feldes	314
4.4.2	Magnetische Feldstärke und Durchflutungsgesetz .	315
4.4.3	Magnetische Flussdichte und Kraftwirkungen im Magnetfeld	320
4.4.4	Materie im Magnetfeld	330
4.4.5	Zur Übung	343
4.5	Instationäre Felder	344
4.5.1	Elektromagnetische Induktion	344
4.5.2	Periodische Felder (Wechselstromkreis)	350
4.5.3	Ein- und Ausschaltvorgänge in Stromkreisen	363
4.5.4	Messgeräte	367
4.5.5	Zusammenhang elektrischer und magnetischer Größen – Maxwell'sche Gleichungen	371
4.5.6	Zur Übung	374
5	Schwingungen und Wellen	377
5.1	Schwingungen	377
5.1.1	Physikalische Grundlagen schwingungsfähiger Systeme	377
5.1.2	Freie Schwingung	381
5.1.3	Erzwungene Schwingung	400
5.1.4	Überlagerung von Schwingungen	405
5.1.5	Schwingungen mit mehreren Freiheitsgraden (gekoppeltes Schwingungssystem)	414
5.1.6	Nichtlineare Schwinger	417
5.1.7	Parametrisch erregte Schwingungen	418
5.1.8	Zur Übung	418
5.2	Wellen	419
5.2.1	Physikalische Grundlagen der Wellenausbreitung .	419
5.2.2	Harmonische Wellen	422
5.2.3	Zur Übung	426
5.2.4	Doppler-Effekt	427
5.2.5	Zur Übung	430

5.2.6	Interferenz	430
5.2.7	Zur Übung	439
6	Optik	441
6.1	Einführung	441
6.2	Geometrische Optik	442
6.2.1	Lichtstrahlen	442
6.2.2	Reflexion des Lichtes	443
6.2.3	Brechung des Lichtes	449
6.2.4	Abbildung durch Linsen	459
6.2.5	Blenden im Strahlengang	471
6.2.6	Zur Übung	471
6.2.7	Abbildungsfehler	472
6.2.8	Optische Instrumente	472
6.3	Radio- und Fotometrie	481
6.3.1	Einführung	481
6.3.2	Strahlungsphysikalische Größen	482
6.3.3	Zur Übung	488
6.3.4	Lichttechnische Größen	489
6.3.5	Zur Übung	491
6.3.6	Farbmetrik	491
6.3.7	Zur Übung	495
6.4	Wellenoptik	495
6.4.1	Interferenz und Beugung	495
6.4.2	Polarisation des Lichtes	521
6.5	Quantenoptik	530
6.5.1	Lichtquanten	530
6.5.2	Dualismus Teilchen–Welle	534
6.5.3	Wärmestrahlung	535
6.5.4	Laser	537
6.5.5	Materiewellen	541
6.6	Abbildung mikroskopischer Objekte	544
6.6.1	Beugungsbegrenzte Abbildung	544
6.6.2	Überwindung der Beugungsbegrenzung	546
7	Akustik	553
7.1	Einführung	553
7.2	Schallwellen	554
7.2.1	Schallausbreitung	554
7.2.2	Schallwandler	559
7.2.3	Schallwellen an Grenzflächen	563
7.2.4	zur Übung	568
7.3	Schallempfindung	569
7.3.1	Physiologische Akustik	569
7.3.2	Musikalische Akustik	572
7.3.3	Zur Übung	575
7.4	Technische Akustik	576
7.4.1	Raumakustik	576
7.4.2	Luftschalldämmung	578
7.4.3	Körperschalldämmung	579

7.4.4	Strömungsgeräusche	582
7.4.5	Ultraschall	584
7.4.6	Schalleinsatz	584
7.4.7	Zur Übung	586
8	Atom- und Kernphysik	589
8.1	Bohr'sches Atommodell	590
8.1.1	Optisches Spektrum des Wasserstoffatoms	590
8.1.2	Bohr'sche Postulate	593
8.1.3	Quantenbedingungen nach Bohr/Sommerfeld	593
8.2	Quantentheorie	595
8.2.1	Hamilton-Operator	597
8.2.2	Schrödinger-Gleichung	599
8.2.3	Unschärferelation	603
8.2.4	Quantenmechanik des Wasserstoffatoms	606
8.2.5	Quanten-Hall-Effekt	609
8.2.6	Tunneleffekt	614
8.3	Bahn- und Spinmagnetismus	617
8.3.1	Zeeman- und Stark-Effekt	619
8.3.2	Elektronen- und Kernspinresonanz	619
8.4	Systematik des Atombaus	621
8.4.1	Periodensystem der Elemente	621
8.4.2	Aufbau der Elektronenhülle	622
8.5	Röntgenstrahlung	623
8.5.1	Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung	623
8.5.2	Absorption von Röntgenstrahlung, Computertomografie	624
8.6	Molekülspektren	627
8.6.1	Potenzialkurve	627
8.6.2	Rotations-Schwingungs-Spektrum	628
8.6.3	Raman-Effekt	631
8.7	Aufbau der Atomkerne	632
8.7.1	Größe und Ladungsverteilung	632
8.7.2	Kernmodelle	635
8.8	Kernumwandlung	642
8.8.1	Radioaktiver Zerfall	642
8.8.2	Kernreaktionen	653
8.8.3	Kernspaltung und Kernreaktoren	658
8.8.4	Kernfusion	663
8.9	Elementarteilchen	670
8.9.1	Einteilung	671
8.9.2	Erhaltungssätze	675
8.9.3	Fundamentale Wechselwirkungen	676
8.10	Strahlenschutz	678
8.10.1	Wechselwirkung der Strahlung mit Materie	679
8.10.2	Dosisgrößen	687
8.10.3	Biologische Wirkung der Strahlung	689
8.10.4	Dosismessung	692

8.10.5	Strahlenschutzmaßnahmen	696
8.10.6	Zur Übung	700
9	Festkörperphysik	703
9.1	Struktur fester Körper	703
9.1.1	Kristallbindungsarten	703
9.1.2	Kristalline Strukturen	706
9.1.3	Gitterfehler	709
9.1.4	Amorphe Werkstoffe	712
9.1.5	Makromolekulare Festkörper	713
9.1.6	Ausgewählte Werkstoffe	717
9.1.7	Flüssigkristalle	722
9.2	Elektronen in Festkörpern	725
9.2.1	Energiebänder-Modell	725
9.2.2	Metalle	728
9.2.3	Halbleiter	734
9.2.4	Supraleitung	745
9.2.5	Zur Übung	749
9.3	Thermodynamik fester Körper	750
9.3.1	Gitterschwingungen	750
9.3.2	Effekte im Zusammenhang mit Wärmefluss und elektrischem Strom	757
9.3.3	Piezoelektrizität	759
9.3.4	Zur Übung	761
9.4	Optoelektronische Halbleiter-Bauelemente	762
9.4.1	Strahlungsquellen	762
9.4.2	Empfänger	766
10	Spezielle Relativitätstheorie	775
10.1	Relativität des Bezugssystems	775
10.2	Lorentz-Transformation	777
10.3	Relativistische Effekte	780
10.3.1	Längenkontraktion	780
10.3.2	Zeitdilatation	780
10.3.3	Relativistische Addition der Geschwindigkeiten	782
10.4	Relativistische Dynamik	783
10.5	Spezielle Relativitätstheorie in der Elektrodynamik	786
10.5.1	Elektrodynamische Kraft	786
10.5.2	Doppler-Effekt des Lichtes	787
10.5.3	Zur Übung	788
11	Anhang	789
11.1	Lösungen der Übungsaufgaben	789
11.1.1	Einführung	789
11.1.2	Mechanik	792
11.1.3	Thermodynamik	813
11.1.4	Elektrizität und Magnetismus	824
11.1.5	Schwingungen und Wellen	831
11.1.6	Optik	840

11.1.7 Akustik	864
11.1.8 Atom- und Kernphysik	869
11.1.9 Festkörperphysik	870
11.1.10 Spezielle Relativitätstheorie	875
11.2 Nobelpreisträger der Physik	878
Sachwortverzeichnis	887