
Physik

Paul A. Tipler · Gene Mosca
Peter Kersten · Jenny Wagner
(Hrsg.)

Physik

für Studierende der Naturwissenschaften
und Technik

8., korrigierte und erweiterte Auflage

Paul A. Tipler

Gene Mosca

Hrsg.

Peter Kersten
Hochschule Hamm-Lippstadt
Hamm, Deutschland

Jenny Wagner
Institut für Theoretische Astrophysik
Heidelberg, Deutschland

ISBN 978-3-662-58280-0

ISBN 978-3-662-58281-7 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-662-58281-7>

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

Springer Spektrum

Aus dem Amerikanischen übersetzt von Michael Basler, Renate Dohmen, Carsten Heinisch, Anna Schleitner und Michael Zillgitt unter Berücksichtigung der von Dietrich Pelte herausgegebenen Voraufgabe von 2004. Übersetzung und Adaption der amerikanischen Ausgabe: *Physics for Scientists and Engineers. With Modern Physics. Sixth Edition.* By Paul A. Tipler and Gene Mosca. First published in the United States by W.H. Freeman and Company, New York. Copyright (c) 2008 by W.H. Freeman and Company. All rights reserved. Alle Rechte vorbehalten.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 1994, 2004, 2009, 2015, 2019

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

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

Vorwort des Verlags

Ob Sie nun als Studierender am ersten Übungsblatt der Physikvorlesung sitzen oder als Lehrender Inspiration für Ihre Vorlesung suchen – ich freue mich, dass Sie sich für das Lehrbuch *Physik für Studierende der Naturwissenschaften und Technik* von Tipler/Mosca entschieden haben.

Alles in einem Buch – das *Tipler*-Versprechen

Der *Tipler* bietet Ihnen alle wesentlichen physikalischen Inhalte, die in den ersten Semestern im Rahmen eines Bachelorstudiums in den Natur- und Ingenieurwissenschaften verlangt werden. Neben den anschaulichen und leicht nachvollziehbaren Erklärungen bekommen Sie mit zahlreichen Rechenbeispielen, Tipps und Methoden einen Werkzeugkasten an die Hand, der Ihnen bei Vorlesungen, Übungen und Klausuren das Leben leichter macht. Am Ende jedes Kapitels finden Sie zudem zur Übung weitere Aufgaben in den verschiedensten Schwierigkeitsgraden. Diese Aufgaben und die ausführlichen Lösungen dazu erhalten Sie zusätzlich im passenden Arbeitsbuch www.springer.com/de/book/9783662589182.

Der *Tipler* holt Studierende bei den Abiturkenntnissen ab. Dabei ist das Buch insbesondere auch für diejenigen Leserinnen und Leser geeignet, die in der Schule Physik nur als Grundkurs hatten oder sogar so früh wie möglich abgewählt haben – und nun rasch Grundlagen und physikalische Zusammenhänge aufholen müssen.

Mit klug gewählten Erklärungen, ausführlichen Begleittexten und Beispielen möchte der *Tipler* allen Lesern helfen, den Einstieg in die nützliche und gar nicht mal so schwere Welt der Physik zu schaffen. Da Physik auch ein bisschen Mathematik braucht, gibt es im Anhang einen Crashkurs zur Wiederholung und zum Nachschlagen der benötigten mathematischen Grundlagen.

Abschnitte, die über den üblichen Umfang eines Studiums der Physik als Nebenfach hinausgehen, sind mit einem Stern (*) gekennzeichnet.

Was ist neu in der 8. Auflage?

Neben zahlreichen Verbesserungen und Vereinheitlichungen in den didaktischen Elementen sowie den obligatorischen Fehlerkorrekturen finden Sie in der 8. Auflage eine anwendungsbezogene Einführung in das Programm MATLAB® und zwar anhand von konkreten Aufgabenstellungen und Beispielen. In diesen lernt der Leser Schritt für Schritt relevante Grundbefehle kennen – vom Addieren von Vektoren bis zum Erstellen von 3-D-Plots.

Für den Blick über den physikalischen Tellerrand hinaus freuen wir uns sehr, dass wir weitere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Universitäten, Hochschulen und Instituten in Deutschland, Österreich und der Schweiz dazu gewinnen konnten, ihre Forschung und die Anwendung der Physik „im Kontext“ kurz vorzustellen.

Nobody is perfect – das gilt auch für den *Tipler*!

Alle Hinweise zu Fehlern und Korrekturen nehmen wir mit Dank entgegen und sammeln diese in einer Errataliste auf der Produktseite des Tipler unter www.springer.com/978-3-662-58280-0. Sollten Sie inhaltliche oder drucktechnische Fehler im Buch finden, die dort nicht aufgeführt sind, lassen Sie uns es gerne wissen.

***Tipler* – das T steht für Teamwork**

Kein Buch ist eine Ein-Mann/Frau-Show, erst recht nicht dieses. Daher möchte ich mich an dieser Stelle explizit und implizit herzlich bei den vielen Personen bedanken, die bei der Planung und Erstellung der 8. Auflage des *Tipler* geholfen haben.

Besonderer Dank geht selbstverständlich an Peter Kersten, der mit Begeisterung und Ausdauer diese Auflage möglich gemacht hat und das Buch im „*Tipler*-Spirit“ fortführt.

Großen Dank an Alexander Knochel für sein Engagement bei der Erstellung des begleitenden Arbeitsbuches und die damit einhergehenden wertvollen Rückmeldungen zum Lehrbuch.

Ebenso herzlichen Dank an Christian Lüttmann, der im Rahmen seines Praktikums zahlreiche neue, interessante Themen und Autoren für die „Im Kontext“-Beiträge gesucht (und gefunden) hat.

Danke auch an alle „Im Kontext“-Autoren, die das Buch mit ihren Berichten aus Forschung und Alltag bereichert haben und damit zeigen, wozu Physik alles gut sein kann.

Zuletzt großen Dank auch an alle Leserinnen und Leser, die uns im Laufe der letzten Jahre direkt oder durch Rezension Rückmeldung gegeben, Wünsche mitgeteilt und auf Fehler, Unzulänglichkeiten und Verbesserungen hingewiesen haben.

Ich wünsche Ihnen viel Freude beim Lesen, Lernen und Verstehen!

Margit Maly, Lektorin Physik & Astronomie, Springer Spektrum

Vorwort zur 8. deutschsprachigen Auflage

Als Grundlagenfach und Querschnittsdisziplin hat die Physik einen festen Platz innerhalb der ersten Semester in vielen Studiengängen der Ingenieur- und Naturwissenschaften. Seit vielen Jahren begleitet der Lehrbuchklassiker *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure* von Paul A. Tipler und Gene Mosca die Studierenden auf ihrem Weg von der Schulphysik bis zu den Inhalten der Bachelorstudiengänge der Physik und der Ingenieurwissenschaften.

Zu den didaktischen Elementen gehören eine klare mathematische Sprache und viele aufschlussreiche Abbildungen. Die umfangreichen Beispiel- und Übungsaufgaben enthalten physikalische Modelle und Formeln sowie ausführliche Schritt-für-Schritt-Lösungen. Die blau hinterlegten *Beispielaufgaben* beziehen sich dabei auf die im Text behandelten Themen und dienen der Vertiefung. Die grün hinterlegten *Übungsaufgaben* sind zur selbstständigen Bearbeitung konzipiert. Hierunter finden sich auch Fragestellungen aus dem Bereich Alltag & Technik sowie Themen zum Verständnis von grundlegenden Begriffen und Gesetzmäßigkeiten. Die Lösungen der in die Beispiel- und Übungsaufgaben integrierten Zusatzaufgaben finden sich jeweils am Ende der Kapitel.

Erstmals mit dieser Auflage werden ausgewählte Beispiel- und Übungsaufgaben zusätzlich mithilfe der Software MATLAB[®] gelöst. Diese Software ist in der Forschung, der Wissenschaft und in der technischen Entwicklung weit verbreitet und steht Studierenden häufig als kostenlose Campuslizenz zur Verfügung. Die Auswahl der Beispiel- und Übungsaufgaben orientiert sich hierbei an der Zielsetzung für den Einsatz der Software. Hierzu gehören besonders das schnelle Überprüfen eigener Ergebnisse, das Auswerten von Praktikumsversuchen und das Visualisieren von Zusammenhängen mithilfe von Diagrammen. Schwierige oder leicht misszuverstehende Begriffe werden als *Tipps* aufgegriffen und erklärt. Die Lösungen für die im Text unter der Bezeichnung *Kurz nachgefragt* eingebauten Verständnisfragen finden sich am Ende der Kapitel, ebenso wie viele weiterführende *Aufgaben*, die nach Schwierigkeitsgrad sortiert sind.

Unter der Bezeichnung *Im Kontext* präsentieren sich neue, spannende Beiträge, die aktuelle Fragestellungen aus Forschung und Entwicklung aufgreifen und beschreiben. An dieser Stelle noch einmal herzlichen Dank an unsere Koautorinnen und Koautoren für die interessanten Einblicke in ihre Forschungsbereiche.

Bei unseren Leserinnen und Lesern möchte ich mich ganz herzlich für die vielen Rückmeldungen und hilfreichen Vorschläge bedanken, von denen die meisten in der aktuellen Auflage aufgegriffen und umgesetzt werden konnten. In diesem Sinne freue ich mich auf eine weitere aktive Unterstützung und viele Zuschriften.

Frau Margit Maly danke ich für die Übernahme des Lektorats, die hervorragende Unterstützung während der Konzeptionierung und der Erstellung des Manuskripts sowie die vielen motivierenden Gespräche zur Gestaltung des Buchs. Frau Stefanie Adam danke ich für die hervorragende Unterstützung bezüglich des Projektmanagements, der Gestaltung des Layouts und der Organisation.

Bei The MathWorks[®], Inc., möchte ich mich für die Unterstützung im Rahmen des Autorenprogramms bedanken.

Mein besonderer Dank geht an meine Familie, die mich zum Start des Buchprojekts ermutigt und in den verschiedenen Phasen proaktiv unterstützt hat.

Allen Studierenden, Leserinnen und Lesern viel Freude mit dem Buch und viel Spaß beim Ausprobieren der Software!

Peter Kersten

Danksagungen

Wir haben uns bei vielen Dozenten, Studenten, Kollegen und Freunden zu bedanken, die zu den jeweiligen Auflagen beigetragen haben.

Anthony J. Buffa, emeritierter Professor an der California Polytechnic State University, überprüfte und redigierte die Aufgaben am Ende der einzelnen Kapitel. Außerdem verfasste er hierzu etliche neue Aufgaben. Laura Runkle verdanken wir die Schlaglichter, die in vielen Kapiteln der Zusammenfassung vorangestellt sind. Richard Mickey erweiterte den Anhang „Mathematische Grundlagen“ zu einem eigenen Kapitel. David Mills, emeritierter Professor am College of the Redwoods in Kalifornien, überarbeitete sehr gründlich das Arbeitsbuch mit den Lösungen aller Aufgaben am Ende der einzelnen Kapitel.

Die nachfolgend genannten Professoren ließen uns beim Erstellen sowie bei der Prüfung auf Fehlerfreiheit des Texts und der Aufgaben ihre unschätzbare Hilfe zuteil werden:

Thomas Foster Southern Illinois University
Karamjeet Arya San Jose State University
Mirley Bala Texas A&M University, Corpus Christi
Michael Crivello San Diego Mesa College
Carlos Delgado Community College of Southern Nevada
David Faust Mt. Hood Community College
Robin Jordan Florida Atlantic University
Jerome Licini Lehigh University
Dan Lucas University of Wisconsin
Laura McCullough University of Wisconsin, Stout
Jeannette Myers Francis Marion University
Marian Peters Appalachian State University
Todd K. Pedlar Luther College
Paul Quinn Kutztown University
Peter Sheldon Randolph-Macon Woman's College
Michael G. Strauss University of Oklahoma
Brad Trees Ohio Wesleyan University
George Zober Youth Senior High School
Patricia Zober Ringgold High School

Viele Dozenten und Studenten haben umfangreiche und hilfreiche Kritiken zu einem oder mehreren Kapiteln geliefert. Für diese wichtigen Beiträge zur Qualität der vorliegenden Auflage danken wir:

Ahmad H. Abdelhadi James Madison University
Edward Adelson Ohio State University
Royal Albridge Vanderbilt University
J. Robert Anderson University of Maryland, College Park
Toby S. Anderson Tennessee State University
Wickram Ariyasinghe Baylor University
Yildirim Aktas University of North Carolina, Charlotte
Eric Ayars California State University
James Battat Harvard University
Eugene W. Beier University of Pennsylvania
Peter Beyersdorf San Jose State University
Richard Bone Florida International University
Juliet W. Brosing Pacific University

Ronald Brown California Polytechnic State University
Richard L. Cardenas St. Mary's University
Troy Carter University of California, Los Angeles
Alice D. Churukian Concordia College
N. John DiNardo Drexel University
Jianjun Dong Auburn University
Fivos R. Drymiotis Clemson University
Mark A. Edwards Hofstra University
James Evans Broken Arrow Senior High
Nicola Fameli University of British Columbia
N. G. Fazleev University of Texas at Arlington
Thomas Furtak Colorado School of Mines
Richard Gelderman Western Kentucky University
Yuri Gershtein Florida State University
Paolo Gondolo University of Utah
Benjamin Grinstein University of California, San Diego
Parameswar Hari University of Tulsa
Joseph Harrison University of Alabama, Birmingham
Patrick C. Hecking Thiel College
Kristi R. G. Hendrickson University of Puget Sound
Linnea Hess Olympic College
Mark Hollabaugh Normandale Community College
Daniel Holland Illinois State University
Richard D. Holland II Southern Illinois University
Eric Hudson Massachusetts Institute of Technology
David C. Ingram Ohio University
Colin Inglefield Weber State University
Nathan Israeloff Northeastern University
Donald J. Jacobs California State University, Northridge
Erik L. Jensen Chemeketa Community College
Colin P. Jessop University of Notre Dame
Ed Kearns Boston University
Alice K. Kolakowska Mississippi State University
Douglas Kurtze Saint Joseph's University
Eric T. Lane University of Tennessee at Chattanooga
Christie L. Larochelle Franklin & Marshall College
Mary Lu Larsen Towson University
Clifford L. Laurence Colorado Technical University
Bruce W. Liby Manhattan College
Ramon E. Lopez Florida Institute of Technology
Ntungwa Maasha Coastal Georgia Community College and University Center
Jane H. MacGibbon University of North Florida
A. James Mallmann Milwaukee School of Engineering
Rahul Mehta University of Central Arkansas
R. A. McCorkle University of Rhode Island
Linda McDonald North Park University
Kenneth McLaughlin Loras College
Eric R. Murray Georgia Institute of Technology
Jeffrey S. Olafsen University of Kansas
Richard P. Olenick University of Dallas
Halina Opyrchal New Jersey Institute of Technology
Russell L. Palma Minnesota State University, Mankato
Todd K. Pedlar Luther College
Daniel Phillips Ohio University
Edward Pollack University of Connecticut
Michael Politano Marquette University
Robert L. Pompei SUNY Binghamton
Damon A. Resnick Montana State University
Richard Robinett Pennsylvania State University

John Rollino Rutgers University
Daniel V. Schroeder Weber State University
Douglas Sherman San Jose State University
Christopher Sirola Marquette University
Larry K. Smith Snow College
George Smoot University of California at Berkeley
Zbigniew M. Stadnik University of Ottawa
Kenny Stephens Hardin-Simmons University
Daniel Stump Michigan State University
Jorge Talamantes California State University, Bakersfield
Charles G. Torre Utah State University
Brad Trees Ohio Wesleyan University
John K. Vassiliou Villanova University
Theodore D. Violet Western State College
Hai-Sheng Wu Minnesota State University, Mankato
Anthony C. Zable Portland Community College
Ulrich Zurcher Cleveland State University

Auch zahlreiche kritische Anmerkungen zu früheren Auflagen dieses Buchs waren äußerst hilfreich. Hierfür danken wir:

Edward Adelson The Ohio State University
Michael Arnett Kirkwood Community College
Todd Averett The College of William and Mary
Yildirim M. Aktas University of North Carolina at Charlotte
Karamjeet Arya San Jose State University
Alison Baski Virginia Commonwealth University
William Bassichis Texas A&M University
Joel C. Berlinghieri The Citadel
Gary Stephen Blanpied University of South Carolina
Frank Blatt Michigan State University
Ronald Brown California Polytechnic State University
Anthony J. Buffa California Polytechnic State University
John E. Byrne Gonzaga University
Wayne Carr Stevens Institute of Technology
George Cassidy University of Utah
Lay Nam Chang Virginia Polytechnic Institute
I. V. Chivets Trinity College, University of Dublin
Harry T. Chu University of Akron
Alan Cresswell Shippensburg University
Robert Coakley University of Southern Maine
Robert Coleman Emory University
Brent A. Corbin UCLA
Andrew Cornelius University of Nevada at Las Vegas
Mark W. Coffey Colorado School of Mines
Peter P. Crooker University of Hawaii
Jeff Culbert London, Ontario
Paul Debevec University of Illinois
Ricardo S. Decca Indiana University, Purdue University
Robert W. Detenbeck University of Vermont
N. John DiNardo Drexel University
Bruce Doak Arizona State University
Michael Dubson University of Colorado at Boulder
John Elliott University of Manchester, England
William Ellis University of Technology, Sydney
Colonel Rolf Enger U.S. Air Force Academy
John W. Farley University of Nevada at Las Vegas
David Faust Mount Hood Community College
Mirela S. Fetea University of Richmond
David Flammer Colorado School of Mines

Philip Fraundorf University of Missouri, Saint Louis
Tom Furtak Colorado School of Mines
James Garland in Pension
James Garner University of North Florida
Ian Gatland Georgia Institute of Technology
Ron Gautreau New Jersey Institute of Technology
David Gavenda University of Texas at Austin
Patrick C. Gibbons Washington University
David Gordon Wilson Massachusetts Institute of Technology
Christopher Gould University of Southern California
Newton Greenberg SUNY Binghamton
John B. Gruber San Jose State University
Huidong Guo Columbia University
Phuoc Ha Creighton University
Richard Haracz Drexel University
Clint Harper Moorpark College
Michael Harris University of Washington
Randy Harris University of California at Davis
Tina Harriott Mount Saint Vincent, Canada
Dieter Hartmann Clemson University
Theresa Peggy Hartsell Clark College
Kristi R. G. Hendrickson University of Puget Sound
Michael Hildreth University of Notre Dame
Robert Hollebeek University of Pennsylvania
David Ingram Ohio University
Shawn Jackson The University of Tulsa
Madya Jalil University of Malaya
Monwhea Jeng University of California, Santa Barbara
James W. Johnson Tallahassee Community College
Edwin R. Jones University of South Carolina
Ilon Joseph Columbia University
David Kaplan University of California, Santa Barbara
William C. Kerr Wake Forest University
John Kidder Dartmouth College
Roger King City College of San Francisco
James J. Kolata University of Notre Dame
Boris Korsunsky Northfield Mt. Hermon School
Thomas O. Krause Towson University
Eric Lane University of Tennessee, Chattanooga
Andrew Lang University of Missouri
David Lange University of California, Santa Barbara
Donald C. Larson Drexel University
Paul L. Lee California State University, Northridge
Peter M. Levy New York University
Jerome Licini Lehigh University
Isaac Leichter Jerusalem College of Technology
William Lichten Yale University
Robert Lieberman Cornell University
Fred Lipschultz University of Connecticut
Graeme Luke Columbia University
Dan MacIsaac Northern Arizona University
Robert R. Marchini The University of Memphis
Peter E. C. Markowitz Florida International University
Daniel Marlow Princeton University
Fernando Medina Florida Atlantic University
Howard McAllister University of Hawaii
John A. McClelland University of Richmond
Edward McCliment University of Iowa
Laura McCullough University of Wisconsin at Stout

M. Howard Miles Washington State University
Matthew Moelter University of Puget Sound
Eugene Mosca U.S. Naval Academy
Carl Mungan U.S. Naval Academy
Taha Mzoughi Mississippi State University
Charles Niederriter Gustavus Adolphus College
John W. Norbury University of Wisconsin at Milwaukee
Aileen O'Donoghue St. Lawrence University
Jack Ord University of Waterloo
Jeffrey S. Olafsen University of Kansas
Melvyn Jay Oremland Pace University
Richard Packard University of California
Antonio Pagnamenta University of Illinois at Chicago
George W. Parker North Carolina State University
John Parsons Columbia University
Dinko Pocanic University of Virginia
Edward Pollack University of Connecticut
Robert Pompei The State University of New York at Binghamton
Bernard G. Pope Michigan State University
John M. Pratte Clayton College and State University
Brooke Pridmore Clayton State College
Yong-Zhong Qian University of Minnesota
David Roberts Brandeis University
Lyle D. Roelofs Haverford College
R. J. Rollefson Wesleyan University
Larry Rowan University of North Carolina at Chapel Hill
Ajit S. Rupaal Western Washington University
Todd G. Ruskell Colorado School of Mines
Lewis H. Ryder University of Kent, Canterbury
Andrew Scherbakov Georgia Institute of Technology
Bruce A. Schumm University of California, Santa Cruz
Cindy Schwarz Vassar College
Mesgun Sebhatu Winthrop University
Bernd Schuttler University of Georgia
Murray Scureman Amdahl Corporation
Marllin L. Simon Auburn University
Scott Sinawi Columbia University
Dave Smith University of the Virgin Islands
Wesley H. Smith University of Wisconsin
Kevoek Spartalian University of Vermont
Zbigniew M. Stadnik University of Ottawa
G. R. Stewart University of Florida
Michael G. Strauss University of Oklahoma
Kaare Stegavik University of Trondheim, Norwegen
Jay D. Strieb Villanova University
Dan Styer Oberlin College
Chun Fu Su Mississippi State University
Jeffrey Sundquist Palm Beach Community College, South
Cyrus Taylor Case Western Reserve University
Martin Tiersten City College of New York
Chin-Che Tin Auburn University
Oscar Vilches University of Washington
D J Wagner Grove City College
George Watson University of Delaware
Fred Watts College of Charleston
David Winter John A. Underwood Austin Community College
John Weinstein University of Mississippi
Stephen Weppner Eckerd College
Suzanne E. Willis Northern Illinois University

Kurzhalt

Teil I	Physikalische Größen und Messungen	
1	Physikalische Größen und Messungen	3
Teil II	Mechanik	
2	Mechanik von Massepunkten	29
3	Die Newton'schen Axiome	83
4	Weitere Anwendungen der Newton'schen Axiome	117
5	Energie und Arbeit	167
6	Der Impuls	219
7	Teilchensysteme	253
8	Drehbewegungen	291
9	Mechanik deformierbarer Körper	359
10	Fluide	381
Teil III	Schwingungen und Wellen	
11	Schwingungen	423
12	Wellen	467
Teil IV	Thermodynamik	
13	Temperatur und der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik	539
14	Die kinetische Gastheorie	555
15	Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	579
16	Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	613
17	Wärmeübertragung	645
Teil V	Elektrizität und Magnetismus	
18	Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen	665
19	Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen	703
20	Das elektrische Potenzial	741
21	Die Kapazität	779
22	Elektrischer Strom – Gleichstromkreise	817
23	Das Magnetfeld	865
24	Quellen des Magnetfelds	893
25	Die magnetische Induktion	933
26	Wechselstromkreise	967
27	Die Maxwell'schen Gleichungen – Elektromagnetische Wellen	1001
Teil VI	Optik	
28	Eigenschaften des Lichts	1027
29	Geometrische Optik	1059
30	Interferenz und Beugung	1103

Inhaltsverzeichnis

Teil I Physikalische Größen und Messungen

1	Physikalische Größen und Messungen	3
1.1	Vom Wesen der Physik	4
1.2	Maßeinheiten	5
1.3	Dimensionen physikalischer Größen	9
1.4	Signifikante Stellen und Größenordnungen	10
1.5	Messgenauigkeit und Messfehler	14
	Zusammenfassung	24
	Aufgaben	25

Teil II Mechanik

2	Mechanik von Massepunkten	29
2.1	Verschiebung	30
2.2	Geschwindigkeit	32
2.3	Beschleunigung	43
2.4	Gleichförmig beschleunigte Bewegung in einer Dimension	50
2.5	Gleichförmig beschleunigte Bewegung in mehreren Dimensionen ..	60
	Zusammenfassung	74
	Aufgaben	76
3	Die Newton'schen Axiome	83
3.1	Das erste Newton'sche Axiom: Das Trägheitsgesetz	84
3.2	Kraft und Masse	85
3.3	Das zweite Newton'sche Axiom	88
3.4	Gravitationskraft und Gewicht	91
3.5	Kräfte diagramme und ihre Anwendung	93
3.6	Das dritte Newton'sche Axiom	100
3.7	Kräfte bei der Kreisbewegung	102
	Zusammenfassung	109
	Aufgaben	111

4	Weitere Anwendungen der Newton'schen Axiome	117
4.1	Reibung	118
4.2	Widerstandskräfte	131
4.3	Trägheits- oder Scheinkräfte	134
4.4	Die Gravitationskraft und die Kepler'schen Gesetze	139
4.5	Das Gravitationsfeld	148
	Zusammenfassung	158
	Aufgaben	160
5	Energie und Arbeit	167
5.1	Arbeit	168
5.2	Leistung	175
5.3	Kinetische Energie	176
5.4	Potenzielle Energie	182
5.5	Energieerhaltung	190
	Zusammenfassung	208
	Aufgaben	210
6	Der Impuls	219
6.1	Impulserhaltung	220
6.2	Stoßarten	226
6.3	Kraftstoß und zeitliches Mittel der Kraft	226
6.4	Inelastische Stöße	233
6.5	Elastische Stöße	238
	Zusammenfassung	245
	Aufgaben	247
7	Teilchensysteme	253
7.1	Mehrkörperprobleme	254
7.2	Der Massenmittelpunkt	257
7.3	Massenmittelpunktsbewegung und Impulserhaltung	262
7.4	Massenmittelpunktsarbeit und Energieerhaltung	266
7.5	*Stöße im Schwerpunktsystem	273
7.6	Systeme mit veränderlicher Masse und Strahlantrieb	275
	Zusammenfassung	283
	Aufgaben	285

8	Drehbewegungen	291
	8.1 Kinematik der Drehbewegung: Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung	292
	8.2 Die kinetische Energie der Drehbewegung	295
	8.3 Berechnung von Trägheitsmomenten	297
	8.4 Das Drehmoment	306
	8.5 Gleichgewicht und Stabilität	318
	8.6 Der Drehimpuls	322
	8.7 Die Drehimpulserhaltung	327
	8.8 Rollende Körper	336
	8.9 Der Kreisel	342
	Zusammenfassung	350
	Aufgaben	352
9	Mechanik deformierbarer Körper	359
	9.1 Spannung und Dehnung	360
	9.2 Kompression	362
	9.3 Scherung	364
	9.4 Zusammenhang zwischen E , K , G und μ	365
	9.5 Elastische Energie und Hysterese	366
	9.6 Biegung	367
	Zusammenfassung	375
	Aufgaben	377
10	Fluide	381
	10.1 Dichte	382
	10.2 Druck in einem Fluid	384
	10.3 Auftrieb und archimedisches Prinzip	392
	10.4 Molekulare Phänomene	397
	10.5 Bewegte Fluide ohne Reibung	398
	10.6 Bewegte Fluide mit Reibung	404
	10.7 *Turbulenz	409
	Zusammenfassung	413
	Aufgaben	416
Teil III Schwingungen und Wellen		
11	Schwingungen	423
	11.1 Harmonische Schwingungen	424
	11.2 Energie des harmonischen Oszillators	431
	11.3 Beispiele für schwingende Systeme	434
	11.4 Gedämpfte Schwingungen	445
	11.5 Erzwungene Schwingungen und Resonanz	452
	Zusammenfassung	459
	Aufgaben	461

12	Wellen	467
	12.1 Einfache Wellenbewegungen	468
	12.2 Periodische Wellen, harmonische Wellen	475
	12.3 Energietransport und Intensität	480
	12.4 Der Doppler-Effekt	485
	12.5 Wellenausbreitung an Hindernissen	492
	12.6 Überlagerung von Wellen	500
	12.7 Stehende Wellen	508
	12.8 *Harmonische Zerlegung und Wellenpakete	516
	Zusammenfassung	525
	Aufgaben	529
 Teil IV Thermodynamik		
13	Temperatur und der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik	539
	13.1 Temperatur und der Nullte Hauptsatz	540
	13.2 Temperaturmessgeräte und Temperaturskalen	540
	13.3 Thermische Ausdehnung	545
	Zusammenfassung	552
	Aufgaben	553
14	Die kinetische Gastheorie	555
	14.1 Die Zustandsgleichung für das ideale Gas	556
	14.2 Druck und Teilchengeschwindigkeit	561
	14.3 Der Gleichverteilungssatz	567
	14.4 Die mittlere freie Weglänge	568
	14.5 *Die Van-der-Waals-Gleichung und Flüssigkeits-Dampf-Isothermen ..	568
	Zusammenfassung	574
	Aufgaben	575
15	Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	579
	15.1 Wärmekapazität und spezifische Wärmekapazität	580
	15.2 Phasenübergänge und latente Wärme	583
	15.3 Phasendiagramme	585
	15.4 Joules Experiment und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik ...	586
	15.5 Die innere Energie eines idealen Gases	589
	15.6 Volumenarbeit und das p - V -Diagramm eines Gases	590
	15.7 Wärmekapazitäten von Festkörpern	594
	15.8 Wärmekapazitäten von Gasen	595
	15.9 Die reversible adiabatische Expansion eines Gases	601
	Zusammenfassung	607
	Aufgaben	609

16	Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik	613
	16.1 Wärmekraftmaschinen und der Zweite Hauptsatz	614
	16.2 Kältemaschinen und der Zweite Hauptsatz	619
	16.3 Der Carnot'sche Kreisprozess	621
	16.4 *Wärmepumpen	626
	16.5 Irreversibilität, Unordnung und Entropie	627
	16.6 Entropie und die Verfügbarkeit der Energie	633
	16.7 Entropie und Wahrscheinlichkeit	634
	16.8 *Der Dritte Hauptsatz	635
	Zusammenfassung	638
	Aufgaben	640
17	Wärmeübertragung	645
	17.1 Wärmeübertragungsarten	646
	17.2 Wärmeleitung	646
	17.3 Konvektion	652
	17.4 Wärmestrahlung	652
	Zusammenfassung	658
	Aufgaben	660
 Teil V Elektrizität und Magnetismus		
18	Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen	665
	18.1 Die elektrische Ladung	666
	18.2 Leiter und Nichtleiter	668
	18.3 Das Coulomb'sche Gesetz	670
	18.4 Das elektrische Feld	676
	18.5 Elektrische Feldlinien	684
	18.6 Wirkung von elektrischen Feldern auf Ladungen	689
	Zusammenfassung	696
	Aufgaben	698
19	Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen	703
	19.1 Das Konzept der Ladungsdichte	704
	19.2 Berechnung von E mit dem Coulomb'schen Gesetz	704
	19.3 Das Gauß'sche Gesetz	715
	19.4 Berechnung von E mit dem Gauß'schen Gesetz	720
	19.5 Diskontinuität von E_n	727
	19.6 Ladung und Feld auf Leiteroberflächen	727
	19.7 *Die Äquivalenz des Gauß'schen und des Coulomb'schen Gesetzes	730
	Zusammenfassung	734
	Aufgaben	735

20	Das elektrische Potenzial	741
	20.1 Die Potentialdifferenz	742
	20.2 Das Potenzial eines Punktladungssystems	744
	20.3 Die Berechnung des elektrischen Felds aus dem Potenzial	751
	20.4 Die Berechnung des elektrischen Potentials ϕ kontinuierlicher Ladungsverteilungen	753
	20.5 Äquipotenzialflächen	761
	20.6 Die elektrische Energie	767
	Zusammenfassung	772
	Aufgaben	774
21	Die Kapazität	779
	21.1 Die Kapazität	780
	21.2 Speicherung elektrischer Energie	784
	21.3 Kondensatoren, Batterien und elektrische Stromkreise	787
	21.4 Dielektrika	796
	21.5 Molekulare Betrachtung von Dielektrika	803
	Zusammenfassung	809
	Aufgaben	811
22	Elektrischer Strom – Gleichstromkreise	817
	22.1 Elektrischer Strom und die Bewegung von Ladungsträgern	818
	22.2 Widerstand und Ohm'sches Gesetz	822
	22.3 Energetische Betrachtung elektrischer Stromkreise	826
	22.4 Zusammenschaltung von Widerständen	830
	22.5 Die Kirchhoff'schen Regeln	837
	22.6 RC-Stromkreise	847
	Zusammenfassung	855
	Aufgaben	857
23	Das Magnetfeld	865
	23.1 Die magnetische Kraft	866
	23.2 Die Bewegung einer Punktladung in einem Magnetfeld	871
	23.3 Das auf Leiterschleifen und Magnete ausgeübte Drehmoment	879
	23.4 *Der Hall-Effekt	883
	Zusammenfassung	888
	Aufgaben	890

24	Quellen des Magnetfelds	893
	24.1 Das Magnetfeld bewegter Punktladungen	894
	24.2 Das Magnetfeld von Strömen: Das Biot-Savart'sche Gesetz	895
	24.3 Der Gauß'sche Satz für Magnetfelder	910
	24.4 Das Ampère'sche Gesetz	911
	24.5 Magnetismus in Materie	916
	Zusammenfassung	926
	Aufgaben	928
25	Die magnetische Induktion	933
	25.1 Der magnetische Fluss	934
	25.2 Induktionsspannung und Faraday'sches Gesetz	935
	25.3 Die Lenz'sche Regel	939
	25.4 Induktion durch Bewegung	943
	25.5 Wirbelströme	947
	25.6 Induktivität	948
	25.7 Die Energie des Magnetfelds	950
	25.8 <i>RL</i> -Stromkreise	952
	Zusammenfassung	959
	Aufgaben	961
26	Wechselstromkreise	967
	26.1 Wechselspannung an einem Ohm'schen Widerstand	968
	26.2 Wechselstromkreise	970
	26.3 Der Transformator	974
	26.4 <i>LC</i> - und <i>RLC</i> -Stromkreise ohne Wechselspannungsquelle	976
	26.5 *Zeigerdiagramme	981
	26.6 *Erzwungene Schwingungen in <i>RLC</i> -Stromkreisen	982
	Zusammenfassung	992
	Aufgaben	994
27	Die Maxwell'schen Gleichungen – Elektromagnetische Wellen	1001
	27.1 Der Maxwell'sche Verschiebungsstrom	1002
	27.2 Die Maxwell'schen Gleichungen	1005
	27.3 Die Wellengleichung für elektromagnetische Wellen	1005
	27.4 Elektromagnetische Strahlung	1010
	Zusammenfassung	1019
	Aufgaben	1021

Teil VI Optik

28	Eigenschaften des Lichts	1027
28.1	Die Lichtgeschwindigkeit	1028
28.2	Die Ausbreitung des Lichts	1031
28.3	Reflexion und Brechung	1031
28.4	*Herleitung des Reflexions- und des Brechungsgesetzes	1041
28.5	Polarisation	1043
28.6	Lichtspektren	1050
	Zusammenfassung	1054
	Aufgaben	1056
29	Geometrische Optik	1059
29.1	Spiegel	1060
29.2	Linse	1070
29.3	Abbildungsfehler	1083
29.4	Optische Instrumente	1084
	Zusammenfassung	1095
	Aufgaben	1098
30	Interferenz und Beugung	1103
30.1	Phasendifferenz und Kohärenz	1104
30.2	Interferenz an dünnen Schichten	1105
30.3	Interferenzmuster beim Doppelspalt	1107
30.4	Beugungsgitter	1111
30.5	Fraunhofer'sche und Fresnel'sche Beugung	1113
30.6	Beugungsmuster beim Einzelspalt	1114
30.7	*Vektoraddition harmonischer Wellen	1117
30.8	Beugung und Auflösung	1123
	Zusammenfassung	1129
	Aufgaben	1131

Teil VII Einsteins Relativitätstheorien

31	Die Relativitätstheorien	1137
31.1	Das Newton'sche Relativitätsprinzip	1138
31.2	Die Einstein'schen Postulate	1139
31.3	Die Lorentz-Transformation	1140
31.4	Uhrensynchronisation und Gleichzeitigkeit	1146
31.5	Die Geschwindigkeitstransformation	1153
31.6	*Der relativistische Impuls	1156
31.7	*Die relativistische Energie	1157

31.8	*Minkowski-Diagramme	1163
31.9	*Die allgemeine Relativitätstheorie	1164
	Zusammenfassung	1170
	Aufgaben	1172
Teil VIII Quantenmechanik		
32	Einführung in die Quantenphysik	1179
32.1	Wellen und Teilchen	1180
32.2	Licht als Teilchen: Photonen	1180
32.3	Teilchen als Materiewellen	1185
32.4	Die Schrödinger-Gleichung	1188
32.5	Der Welle-Teilchen-Dualismus	1190
32.6	*Erwartungswerte und klassischer Grenzfall	1191
	Zusammenfassung	1197
	Aufgaben	1199
33	Anwendungen der Schrödinger-Gleichung	1201
33.1	Ein Teilchen im Kasten mit unendlich hohem Potenzial	1202
33.2	Ein Teilchen im Kasten mit endlich hohem Potenzial	1205
33.3	Der harmonische Oszillator	1206
33.4	Reflexion und Transmission von Elektronenwellen an Potenzialbarrieren	1209
33.5	*Die Schrödinger-Gleichung in drei Dimensionen	1214
33.6	Die Schrödinger-Gleichung für zwei identische Teilchen	1217
	Zusammenfassung	1222
	Aufgaben	1224
Teil IX Atome und Moleküle		
34	Atome	1229
34.1	Das Atom und die Atomspektren	1230
34.2	Das Bohr'sche Modell des Wasserstoffatoms	1231
34.3	Quantentheorie der Atome	1235
34.4	Quantentheorie des Wasserstoffatoms	1237
34.5	*Spin-Bahn-Kopplung und Feinstruktur	1243
34.6	Das Periodensystem der Elemente	1245
34.7	Spektren im sichtbaren und im Röntgenbereich	1252
34.8	Laser	1256
	Zusammenfassung	1263
	Aufgaben	1266

35	Moleküle	1269
35.1	Die chemische Bindung	1270
35.2	*Mehratomige Moleküle	1276
35.3	*Energieniveaus und Spektren zweiatomiger Moleküle	1278
35.4	*Freiheitsgrade und der Gleichverteilungssatz	1284
	Zusammenfassung	1290
	Aufgaben	1292

Teil X Festkörperphysik

36	Festkörper	1297
36.1	Die Struktur von Festkörpern	1298
36.2	Kristallgitter	1298
36.3	Streuung an periodischen Strukturen	1301
	Zusammenfassung	1305
	Aufgaben	1306
37	Elektrische Eigenschaften von Festkörpern	1307
37.1	Eine mikroskopische Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit ...	1308
37.2	Freie Elektronen im Festkörper	1310
37.3	Die Quantentheorie der elektrischen Leitfähigkeit	1315
37.4	Das Bändermodell der Festkörper	1316
37.5	Halbleiter	1318
37.6	*Halbleiterübergangsschichten und Bauelemente	1320
37.7	*Supraleitung	1324
37.8	*Die Fermi-Dirac-Verteilung	1327
	Zusammenfassung	1331
	Aufgaben	1333

Teil XI Kern- und Teilchenphysik

38	Kernphysik	1339
38.1	Eigenschaften der Kerne	1340
38.2	Radioaktivität	1343
38.3	Kernreaktionen	1348
38.4	Kernspaltung und Kernfusion	1350
38.5	Dosimetrie	1358
	Zusammenfassung	1361
	Aufgaben	1363

39	*Teilchenphysik	1367
	39.1 *Hadronen und Leptonen	1368
	39.2 *Spin und Antiteilchen	1370
	39.3 *Erhaltungssätze	1371
	39.4 *Quarks	1376
	39.5 *Feldquanten	1378
	39.6 *Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung	1379
	39.7 *Das Standardmodell	1379
	39.8 *Moderne Teilchenbeschleuniger und Detektoren	1381
	Zusammenfassung	1391
	Aufgaben	1393
	Teil XII Anhänge	
40	Tabellen	1397
	40.1 Einheiten, Symbole und Umrechnungsfaktoren	1398
	40.2 Wichtige physikalische Größen und Konstanten	1401
	40.3 Die chemischen Elemente	1404
41	Mathematische Grundlagen	1407
	41.1 Signifikante Stellen	1408
	41.2 Gleichungen	1409
	41.3 Direkte und umgekehrte Proportionalität	1410
	41.4 Lineare Gleichungen	1411
	41.5 Quadratische Gleichungen und Zerlegung in Linearfaktoren	1412
	41.6 Potenzen und Logarithmen	1414
	41.7 Geometrie	1416
	41.8 Trigonometrie und Vektoren	1418
	41.9 Die Binomialentwicklung	1424
	41.10 Komplexe Zahlen	1425
	41.11 Differenzialrechnung	1426
	41.12 Integralrechnung	1432
	Stichwortverzeichnis	1435

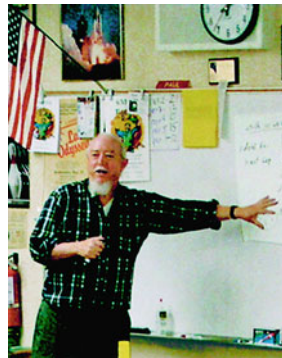
Verzeichnis der Vertiefungen mit MATLAB®

M 1.1 Rechnen in Technik und Wissenschaft	6
M 1.2 Ein- und Ausgabe von physikalischen Größen	15
M 1.3 Mittelwerte berechnen	18
M 1.4 Daten importieren und weiterverarbeiten	20
M 2.1 Funktionen abschnittsweise darstellen	36
M 2.2 Vektorielle Größen visualisieren I	41
M 2.3 Funktionen ableiten	48
M 2.4 Mehrere Diagramme in einem grafischen Fenster anordnen I	54
M 2.5 Mehrere Funktionen in einem Diagramm darstellen I	59
M 2.6 Parametrische Darstellungen in zwei Dimensionen erstellen	66
M 3.1 Vektorielle Größen berechnen I	92
M 4.1 Numerische Integration mit dem Euler-Verfahren	132
M 4.2 Diagramme mit logarithmischen Achsen erstellen	142
M 5.1 Skalarprodukte berechnen	174
M 6.1 Gleichungssysteme lösen I	239
M 7.1 Mehrere Diagramme in einem grafischen Fenster anordnen II	281
M 8.1 Gleichungen nach einer Variablen auflösen	303
M 8.2 Kreuzprodukte berechnen	312
M 9.1 Doppelintegrale berechnen	371
M 10.1 Ergebnisse tabellarisch darstellen	390
M 10.2 Daten exportieren	391
M 11.1 Differenzialgleichungen analytisch lösen	430
M 11.2 Differenzialgleichungen numerisch lösen I	442
M 11.3 Extremwerte berechnen	446
M 11.4 Differenzialgleichungen numerisch lösen II	449
M 12.1 Funktionen darstellen	504
M 12.2 Fourier-Reihen entwickeln	520
M 14.1 Mehrere Funktionen in einem Diagramm darstellen II	566
M 15.1 Integrale numerisch berechnen	598
M 18.1 Vektorielle Größen berechnen II	679
M 18.2 Vektorielle Größen berechnen III	681

M 18.3 Vektorielle Größen visualisieren II	688
M 18.4 Parametrische Darstellungen in drei Dimensionen erstellen I	692
M 19.1 Taylor-Reihen entwickeln	714
M 20.1 Funktionen von zwei Variablen darstellen	749
M 20.2 Gradienten berechnen	752
M 22.1 Gleichungssysteme lösen II	844
M 22.2 Gleichungssysteme lösen III	846
M 22.3 Differenzialgleichungen numerisch lösen III	849
M 23.1 Parametrische Darstellungen in drei Dimensionen erstellen II	873
M 24.1 Vektorielle Größen berechnen IV	907
M 24.2 Vektorielle Größen berechnen V	908
M 26.1 Diagramme mit zwei Ordinatenachsen erstellen	979
M 32.1 Integrale analytisch berechnen	1195
M 34.1 Konturdiagramme erstellen	1241

Die Autoren

Die Autoren



Paul A. Tipler, geboren in Antigo, Wisconsin, promovierte an der University of Illinois über die Struktur von Atomkernen. Seine ersten Lehrerfahrungen sammelte er an der Wesleyan University of Connecticut. Anschließend wurde er Physikprofessor an der Oakland University, wo er maßgeblich an der Weiterentwicklung des Studienlehrplans für Physik beteiligt war. Hier entstanden auch die ersten Ausgaben seiner Lehrbücher. Heute lebt er als Emeritus in Berkeley, Kalifornien, und wirkt weiterhin an den Bearbeitungen dieses Physiklehrbuchs für Naturwissenschaftler und Ingenieure mit. Daneben widmet er sich mehreren Hobbys, darunter Musik (er ist ein ausgezeichnete Jazzpianist), Pokern sowie Wandern und Camping.



Gene Mosca wurde in New York City geboren und wuchs in Shelter Island, New York, auf. Er studierte an der Villanova University, der University of Michigan und der University of Vermont, wo er promovierte. Bis zu seiner Emeritierung lehrte er an der U. S. Naval Academy. Seit der fünften amerikanischen Auflage (der zweiten, die ins Deutsche übersetzt worden war) ist er Mitautor dieses Physiklehrbuchs.

Der Herausgeber



Peter A. Kersten (Hrsg.), geboren in Bochum, studierte Physik an der TU Dortmund und promovierte an der TU Berlin im Fachbereich Elektrotechnik. Nach einem Auslandsaufenthalt an der Technischen Universität Dänemark war er in leitenden Funktionen in verschiedenen Industrieunternehmen tätig. Er ist Autor zahlreicher Patente und Publikationen im Bereich Mechatronik. Seit 2009 ist er als Professor mit dem Lehrgebiet Mechatronik an der Hochschule Hamm-Lippstadt tätig und engagiert sich in den Lehrveranstaltungen im Bereich Physik der verschiedenen MINT-Studiengänge an seiner Hochschule und an internationalen Partnerhochschulen. Neben einem hohen Praxisbezug sind ihm die Freude und das Interesse an physikalischen Fragestellungen wichtig. Diesen Aspekt fördert er auch gerne in populärwissenschaftlichen Vorträgen und Veranstaltungen wie Kinder- und Jugendunis. (Foto: Helen Sobiralski)