

Springer-Lehrbuch

Grundkurs Theoretische Physik

Band 1

[Klassische Mechanik](#)

8. Auflage

ISBN: 3-540-34832-8

Band 2

[Analytische Mechanik](#)

7. Auflage

ISBN: 3-540-30660-9

Band 3

[Elektrodynamik](#)

7. Auflage

ISBN: 3-540-20509-8

Band 4

[Spezielle Relativitätstheorie,
Thermodynamik](#)

6. Auflage

ISBN: 3-540-24119-1

Band 5/1

[Quantenmechanik –
Grundlagen](#)

6. Auflage

ISBN: 3-540-40071-0

Band 5/2

[Quantenmechanik –
Methoden
und Anwendungen](#)

6. Auflage

ISBN: 3-540-26035-8

Band 6

[Statistische Physik](#)

5. Auflage

ISBN: 3-540-20505-5

Band 7

[Viel-Teilchen-Theorie](#)

6. Auflage

ISBN: 3-540-24117-5

Wolfgang Nolting

Grundkurs Theoretische Physik 1

Klassische Mechanik

8. Auflage

Mit 203 Abbildungen
und 97 Aufgaben mit vollständigen Lösungen

 Springer

Professor Wolfgang Nolting
Humboldt-Universität zu Berlin
Institut für Physik
Newtonstraße 15
12489 Berlin
Deutschland
nolting@physik.hu-berlin.de

Umschlagabbildung: siehe Seite 92

Die 5. Auflage des Buches erschien im Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN-10 3-540-34832-8 Springer Berlin Heidelberg New York
ISBN-13 978-3-540-34832-0 Springer Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-540-21474-7 7. Auflage Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media
springer.de

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002, 2005, 2006

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.

Innentypografie: deblik, Berlin
Satz und Umbruch: LE-TeX Jelonek, Schmidt & Vöckler GbR, Leipzig
Einbandgestaltung: WMXdesign GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier 56/3100/YL

Allgemeines Vorwort

Die sieben Bände der Reihe „*Grundkurs Theoretische Physik*“ sind als direkte Begleiter zum Hochschulstudium Physik gedacht. Sie sollen in kompakter Form das wichtigste theoretisch-physikalische Rüstzeug vermitteln, auf dem aufgebaut werden kann, um anspruchsvollere Themen und Probleme im fortgeschrittenen Studium und in der physikalischen Forschung bewältigen zu können.

Die Konzeption ist so angelegt, dass der erste Teil des Kurses,

Klassische Mechanik (Band 1)

Analytische Mechanik (Band 2)

Elektrodynamik (Band 3)

Spezielle Relativitätstheorie, Thermodynamik (Band 4),

als Theorieteil eines „*Integrierten Kurses*“ aus Experimentalphysik und Theoretischer Physik, wie er inzwischen an zahlreichen deutschen Universitäten vom ersten Semester an angeboten wird, zu verstehen ist. Die Darstellung ist deshalb bewusst ausführlich, manchmal sicher auf Kosten einer gewissen Eleganz, und in sich abgeschlossen gehalten, sodass der Kurs auch zum Selbststudium ohne Sekundärliteratur geeignet ist. Es wird nichts vorausgesetzt, was nicht an früherer Stelle der Reihe behandelt worden ist. Dies gilt insbesondere auch für die benötigte Mathematik, die vollständig so weit entwickelt wird, dass mit ihr theoretisch-physikalische Probleme bereits vom Studienbeginn an gelöst werden können. Dabei werden die mathematischen Einschübe immer dann eingefügt, wenn sie für das weitere Vorgehen im Programm der Theoretischen Physik unverzichtbar werden. Es versteht sich von selbst, dass in einem solchen Konzept nicht alle mathematischen Theorien mit absoluter Strenge bewiesen und abgeleitet werden können. Da muss bisweilen ein Verweis auf entsprechende mathematische Vorlesungen und vertiefende Lehrbuchliteratur erlaubt sein. Ich habe mich aber trotzdem um eine halbwegs abgerundete Darstellung bemüht, sodass die mathematischen Techniken nicht nur angewendet werden können, sondern dem Leser zumindest auch plausibel erscheinen.

Die mathematischen Einschübe werden natürlich vor allem in den ersten Bänden der Reihe notwendig, die den Stoff bis zum Physik-Vordiplom beinhalten. Im zweiten Teil des Kurses, der sich mit den modernen Disziplinen der Theoretischen Physik befasst,

Quantenmechanik: Grundlagen (Band 5/1)

Quantenmechanik: Methoden und Anwendungen (Band 5/2)

Statistische Physik (Band 6)

Viel-Teilchen-Theorie (Band 7),

sind sie weitgehend überflüssig geworden, insbesondere auch deswegen, weil im Physik-Studium inzwischen die Mathematik-Ausbildung Anschluss gefunden hat. Der frühe Beginn der Theorie-Ausbildung bereits im ersten Semester gestattet es,

die *Grundlagen der Quantenmechanik* schon vor dem Vordiplom zu behandeln. Der Stoff der letzten drei Bände kann natürlich nicht mehr Bestandteil eines „*Integrierten Kurses*“ sein, sondern wird wohl überall in reinen Theorie-Vorlesungen vermittelt. Das gilt insbesondere für die „*Viel-Teilchen-Theorie*“, die bisweilen auch unter anderen Bezeichnungen wie „*Höhere Quantenmechanik*“ etwa im achten Fachsemester angeboten wird. Hier werden neue, über den Stoff des Grundstudiums hinausgehende Methoden und Konzepte diskutiert, die insbesondere für korrelierte Systeme aus vielen Teilchen entwickelt wurden und für den erfolgreichen Übergang zu wissenschaftlichem Arbeiten (Diplom, Promotion) und für das Lesen von Forschungsliteratur inzwischen unentbehrlich geworden sind.

In allen Bänden der Reihe „*Grundkurs Theoretische Physik*“ sollen zahlreiche Übungsaufgaben dazu dienen, den erlernten Stoff durch konkrete Anwendungen zu vertiefen und richtig einzusetzen. Eigenständige Versuche, abstrakte Konzepte der Theoretischen Physik zur Lösung realer Probleme aufzubereiten, sind absolut unverzichtbar für den Lernenden. Ausführliche Lösungsanleitungen helfen bei größeren Schwierigkeiten und testen eigene Versuche, sollten aber nicht dazu verleiten, „*aus Bequemlichkeit*“ eigene Anstrengungen zu unterlassen. Nach jedem größeren Kapitel sind Kontrollfragen angefügt, die dem Selbsttest dienen und für Prüfungsvorbereitungen nützlich sein können.

Ich möchte nicht vergessen, an dieser Stelle allen denen zu danken, die in irgendeiner Weise zum Gelingen dieser Buchreihe beigetragen haben. Die einzelnen Bände sind letztlich auf der Grundlage von Vorlesungen entstanden, die ich an den Universitäten in Münster, Würzburg, Osnabrück, Valladolid (Spanien), Warangal (Indien) sowie in Berlin gehalten habe. Das Interesse und die konstruktive Kritik der Studenten bedeuteten für mich entscheidende Motivation, die Mühe der Erstellung eines doch recht umfangreichen Manuskripts als sinnvoll anzusehen. In der Folgezeit habe ich von zahlreichen Kollegen wertvolle Verbesserungsvorschläge erhalten, die dazu geführt haben, das Konzept und die Ausführung der Reihe weiter auszubauen und aufzuwerten.

Die ersten Auflagen dieser Buchreihe sind im Verlag Zimmermann-Neufang entstanden. Ich kann mich an eine sehr faire und stets erfreuliche Zusammenarbeit erinnern. Danach erschien die Reihe bei Vieweg. Die Übernahme der Reihe durch den Springer-Verlag im Januar 2001 hat dann zu weiteren professionellen Verbesserungen im Erscheinungsbild des „*Grundkurs Theoretische Physik*“ geführt. Herrn Dr. Kölsch und seinem Team bin ich schon jetzt für viele Vorschläge und Anregungen sehr dankbar. Meine Manuskripte scheinen in guten Händen zu liegen.

Berlin, im April 2001

Wolfgang Nolting

Vorwort zu Band 1

Der vorliegende erste Band des „*Grundkurs Theoretische Physik*“ befasst sich mit der *Klassischen Mechanik*. Gegenstand derselben ist die

Analyse der Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich materielle Körper unter dem Einfluss von Kräften im Raum und in der Zeit bewegen.

Diese Formulierung enthält bereits einige Grundbegriffe, deren strenge Definitionen durchaus nicht-trivial sind und deshalb sorgfältig erarbeitet werden müssen. Bei einigen von diesen Grundbegriffen werden wir uns sogar damit abzufinden haben, sie zunächst als mehr oder weniger plausible Grunderfahrungstatsachen ohne exakte physikalische Definitionen hinnehmen zu müssen. Unter einem *materiellen Körper* wollen wir einen zeitlich und räumlich lokalisierbaren Gegenstand verstehen, der mit (*träger*) *Masse* behaftet ist. Der Massenbegriff wird zu diskutieren sein. Dies gilt auch für den Begriff der *Kraft*. Kräfte sorgen für Änderungen des Bewegungszustands des betrachteten Körpers. Der Raum, der unserer Anschauung entspricht, ist der dreidimensionale euklidische Raum. Er ist nach allen Seiten unbegrenzt, homogen und isotrop, d. h. Translationen und Rotationen unserer Welt in diesem Raum haben auf diese keine Auswirkungen. Auch die *Zeit* ist eine Grunderfahrungstatsache, von der wir wissen, dass sie existiert und unwiderruflich vergeht. Sie ist ebenfalls homogen, d. h., kein Zeitpunkt ist gegenüber dem anderen in irgendeiner Weise a priori ausgezeichnet.

Zur Beschreibung der Naturvorgänge benötigt der Physiker als „*Sprache*“ die Mathematik. Das Dilemma besteht nun aber darin, dass *Theoretische Mechanik* in angemessener Weise nur dann vermittelt werden kann, wenn das entsprechende mathematische Rüstzeug zur Verfügung steht. Bei einem Theorieangebot vom ersten Semester an, wie beim Theorieteil eines „*Integrierten Kurses*“ aus Experimentalphysik und Theoretischer Physik, ist diese Voraussetzung beim Studienanfänger jedoch nicht gegeben. Der vorliegende erste Band des Grundkurses beginnt deshalb mit einer komprimierten mathematischen Einführung, die in knapper Form all das präsentieren soll, was für die Entwicklung der Klassischen Theoretischen Mechanik unbedingt vonnöten ist. Es versteht sich von selbst, dass dann nicht alle mathematischen Theorien mit absoluter Strenge und Exaktheit abgeleitet werden können. Ich habe mich aber trotzdem um eine halbwegs abgerundete Darstellung bemüht, wobei jedoch immer nur so viel Mathematik gebracht wird, wie notwendig ist, um in der Entwicklung der Theoretischen Physik voranzukommen. Sobald letztere auf neue „*mathematische Barrieren*“ stößt, wird wieder ein entsprechender mathematischer Einschub präsentiert. Mathematische Abhandlungen werden also erst an den Stellen in den Text eingeschoben, an denen sie direkt benötigt werden. Besonders wichtig sind in diesem Zusammenhang die zahlreichen Übungsaufgaben, die zum Selbsttest unbedingt bearbeitet werden sollten.

Die Idee zu diesem „*Grundkurs Theoretische Physik*“ ist im Zusammenhang mit Vorlesungen zu einem „*Integrierten Kurs*“ entstanden, die ich vor etwa fünfzehn

Jahren an der Universität Münster gehalten habe. Das animierende Interesse der Studenten an meinem Vorlesungsskript hatte mich damals dazu verleitet, besondere Mühe in die Darstellung zu investieren. Der erste Band zur *Klassischen Mechanik* ist zunächst beim Verlag Zimmermann-Neufang erschienen und in den folgenden fünf Auflagen stets durch Korrekturen, die ich vor allem aufmerksamen Lesern zu verdanken habe, verbessert worden. Dieser Band, wie auch die anderen Bände der Reihe, ist als direkter Begleiter des Grundstudiums Physik gedacht, also für den Studenten und weniger für den Dozenten geschrieben. Um ein Selbststudium ohne aufwendige Sekundärliteratur zu ermöglichen, wird bisweilen bewusst auf Eleganz verzichtet, um stattdessen das Wesentliche detailliert zu präsentieren und zu üben. Dem Springer-Verlag bin ich für das Akzeptieren dieses Konzepts und für die stets erfreuliche und professionelle Zusammenarbeit sehr dankbar.

Berlin, im August 2004

Wolfgang Nolting

Vorwort zur 8. Auflage von Band 1

Am Konzept des „*Grundkurs Theoretische Physik*“ und damit auch an dem des ersten Bandes der Reihe hat sich mit der vorliegenden 8. Auflage nichts geändert. Er ist nach wie vor auf ein Physik-Studienprogramm zugeschnitten, das bereits im ersten Semester mit der Theoretischen Physik (Mechanik) beginnt, so wie es die meisten neuen Bachelor/Master-Studienordnungen an deutschen Hochschulen vorsehen. Techniken und Konzepte werden weiterhin so detailliert vermittelt, dass im Prinzip ein Selbststudium ohne aufwendige Sekundärliteratur möglich ist. Insbesondere in diesem ersten Band des Grundkurses spielen die zahlreichen Übungsaufgaben eine wichtige Rolle, da nur so die kompakte Vermittlung der für die Theoretische Physik notwendigen Mathematik erfolgreich sein kann. Der Leser sollte auf jeden Fall versuchen, die Aufgaben zunächst selbständig zu lösen und die im Anhang dargestellten Musterlösungen nur zur Kontrolle zu verwenden. Die jetzt vorliegende 8. Auflage besitzt gegenüber den früheren Auflagen ein stark erweitertes Aufgabenangebot.

Mir haben auch in der jüngsten Vergangenheit wieder zahlreiche Studierende und Dozenten durch Vorschläge zur Verbesserung einzelner Passagen und durch das Aufspüren von Druckfehlern sehr geholfen. Dafür möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken. Ein besonderer Dank gebührt den jetzigen und ehemaligen Mitgliedern meines Lehrstuhls an der Humboldt-Universität zu Berlin, die sich durch konstruktive Kritik und tatkräftige Hilfe bei redaktionellen und organisatorischen Problemen eingebracht haben. Die Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag, insbesondere mit Herrn Dr. T. Schneider, war stets produktiv, verständnisvoll und deshalb angenehm.

Berlin, im August 2006

Wolfgang Nolting

Inhaltsverzeichnis

1	Mathematische Vorbereitungen	
1.1	Vektoren.....	3
1.1.1	Elementare Rechenregeln	5
1.1.2	Skalarprodukt	9
1.1.3	Vektorprodukt	12
1.1.4	„Höhere“ Vektorprodukte	16
1.1.5	Basisvektoren	19
1.1.6	Komponentendarstellungen	22
1.1.7	Aufgaben.....	26
1.2	Vektorwertige Funktionen	31
1.2.1	Parametrisierung von Raumkurven	31
1.2.2	Differentiation vektorwertiger Funktionen.....	33
1.2.3	Bogenlänge	35
1.2.4	Begleitendes Dreibein	38
1.2.5	Aufgaben.....	44
1.3	Felder	47
1.3.1	Klassifikation der Felder	47
1.3.2	Partielle Ableitungen.....	50
1.3.3	Gradient.....	54
1.3.4	Divergenz und Rotation.....	57
1.3.5	Aufgaben.....	60
1.4	Matrizen und Determinanten.....	63
1.4.1	Matrizen	63
1.4.2	Rechenregeln für Matrizen	65
1.4.3	Koordinatentransformationen (Drehungen).....	67
1.4.4	Determinanten	72
1.4.5	Rechenregeln für Determinanten	75
1.4.6	Spezielle Anwendungen.....	77
1.4.7	Aufgaben.....	84
1.5	Koordinatensysteme	87
1.5.1	Wechsel der Variablen, Funktionaldeterminante.....	87
1.5.2	Krummlinige Koordinaten	93
1.5.3	Zylinderkoordinaten.....	97
1.5.4	Kugelkoordinaten.....	99
1.5.5	Aufgaben.....	102
1.6	Kontrollfragen	104

2	Mechanik des freien Massenpunktes	
2.1	Kinematik	109
2.1.1	Geschwindigkeit und Beschleunigung	109
2.1.2	Einfache Beispiele	115
2.1.3	Aufgaben	118
2.2	Grundgesetze der Dynamik.....	120
2.2.1	Newton'sche Axiome.....	121
2.2.2	Kräfte	125
2.2.3	Inertialsysteme, Galilei-Transformation	128
2.2.4	Rotierende Bezugssysteme, Scheinkräfte	130
2.2.5	Beliebig beschleunigte Bezugssysteme.....	131
2.2.6	Aufgaben	134
2.3	Einfache Probleme der Dynamik	135
2.3.1	Bewegung im homogenen Schwerfeld	136
2.3.2	Lineare Differentialgleichungen	139
2.3.3	Bewegung im homogenen Schwerfeld mit Reibung	141
2.3.4	Fadenpendel	145
2.3.5	Komplexe Zahlen.....	148
2.3.6	Linearer harmonischer Oszillator	154
2.3.7	Freier gedämpfter linearer Oszillator	157
2.3.8	Gedämpfter linearer Oszillator unter dem Einfluss einer äußeren Kraft	162
2.3.9	Beliebige eindimensionale, ortsabhängige Kraft	166
2.3.10	Aufgaben	171
2.4	Fundamentale Begriffe und Sätze	178
2.4.1	Arbeit, Leistung, Energie.....	179
2.4.2	Potential	183
2.4.3	Drehimpuls, Drehmoment.....	186
2.4.4	Zentralkräfte	187
2.4.5	Integration der Bewegungsgleichungen	190
2.4.6	Aufgaben	193
2.5	Planetenbewegung.....	200
2.5.1	Aufgaben	206
2.6	Kontrollfragen	208
3	Mechanik der Mehrteilchensysteme	
3.1	Erhaltungssätze.....	214
3.1.1	Impulssatz (Schwerpunktsatz)	214
3.1.2	Drehimpulssatz.....	215

3.1.3	Energiesatz	217
3.1.4	Virialsatz	219
3.2	Zwei-Teilchen-Systeme	220
3.2.1	Relativbewegung	220
3.2.2	Zweikörperstoß	223
3.2.3	Elastischer Stoß.....	226
3.2.4	Inelastischer Stoß	229
3.2.5	Planetenbewegung als Zweikörperproblem	230
3.2.6	Gekoppelte Schwingungen	232
3.3	Aufgaben	235
3.4	Kontrollfragen	239
4	Der starre Körper	
4.1	Modell des starren Körpers.....	243
4.2	Mehrfachintegrale.....	246
4.3	Rotation um eine Achse	250
4.3.1	Energiesatz	250
4.3.2	Drehimpulssatz.....	253
4.3.3	Physikalisches Pendel	254
4.3.4	Steiner'scher Satz.....	256
4.3.5	Rollbewegung	257
4.3.6	Analogie zwischen Translations- und Rotationsbewegung	259
4.4	Trägheitstensor	260
4.4.1	Kinematik des starren Körpers	260
4.4.2	Kinetische Energie des starren Körpers.....	261
4.4.3	Eigenschaften des Trägheitstensors	263
4.4.4	Drehimpuls des starren Körpers	268
4.5	Kreiseltheorie	271
4.5.1	Euler'sche Gleichungen	271
4.5.2	Euler'sche Winkel.....	272
4.5.3	Rotationen um freie Achsen	274
4.5.4	Kräftefreier symmetrischer Kreisel	276
4.6	Aufgaben	280
4.7	Kontrollfragen	282
	Lösungen der Übungsaufgaben	285
	Sachverzeichnis	409