

Reiner M. Dreizler Cora S. Lüdde

---

# Theoretische Physik 1

Theoretische Mechanik

Mit 207 Abbildungen und einer CD-ROM



Springer

Professor Dr. Reiner M. Dreizler  
Cora S. Lüdde  
Goethe-Universität  
Institut für Theoretische Physik  
Robert-Mayer Strasse 8-10  
60054 Frankfurt/Main, Deutschland  
e-mail: dreizler@th.physik.uni-frankfurt.de  
cluedde@th.physik.uni-frankfurt.de

ISBN 3-540-44366-5 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

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.

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-Verlag Berlin Heidelberg New York  
ein Unternehmen der BertelsmannSpringer Science+Business Media GmbH

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003  
Printed in Germany

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.

Satz durch die Autoren unter Verwendung eines Springer  $\text{\LaTeX}$  Makropakets  
Datenkonvertierung: Fa. Le-TeX, Leipzig  
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN: 10883353 56/3141/ba - 5 4 3 2 1 0

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Ein erster Überblick</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Kinematik</b> .....	13
2.1	Eindimensionale Bewegungsprobleme .....	14
2.1.1	Drei Bewegungsbeispiele .....	14
2.1.2	Geschwindigkeit .....	19
2.1.3	Beschleunigung .....	22
2.1.4	Erste Bemerkungen zur Berechnung von Bewegungsabläufen .....	25
2.2	Allgemeine Bewegungsprobleme .....	27
2.2.1	Zweidimensionale Bewegungsformen .....	29
2.2.2	Dreidimensionale Bewegungsformen .....	36
2.2.3	Ein Beispiel zur Lösung von zweidimensionalen Bewegungsproblemen .....	39
2.3	Vektorielle Beschreibung von Bewegungen .....	41
2.3.1	Grundbegriffe .....	42
2.3.2	Vektorielle Fassung von Bewegungen .....	44
2.3.3	Der Flächensatz .....	48
2.4	Krummlinige Koordinaten .....	54
2.4.1	Koordinaten in der Ebene .....	54
2.4.2	Räumliche Koordinaten .....	60
<b>3</b>	<b>Dynamik I: Axiome und Erhaltungssätze</b> .....	67
3.1	Die Axiome der Mechanik .....	67
3.1.1	Der Kraftbegriff .....	67
3.1.2	Träge und schwere Massen .....	69
3.1.3	Die Axiome .....	72
3.1.4	Zum ersten Axiom, Inertialsysteme .....	72
3.1.5	Zum zweiten Axiom, Impuls .....	75
3.1.6	Zum dritten Axiom, Wechselwirkungen .....	77
3.2	Die Erhaltungssätze der Mechanik .....	83
3.2.1	Der Impulssatz und der Impulserhaltungssatz .....	84
3.2.2	Der Drehimpulssatz und der Drehimpulserhaltungssatz ..	91

3.2.3	Die Energie und der Energieerhaltungssatz für einen Massenpunkt . . . . .	102
3.2.4	Der Energieerhaltungssatz für Systeme von Massenpunkten . . . . .	122
3.2.5	Anwendung: Stoßprobleme . . . . .	131
<b>4</b>	<b>Dynamik II: Bewegungsprobleme . . . . .</b>	<b>139</b>
4.1	Das Keplerproblem . . . . .	139
4.1.1	Vorbemerkungen . . . . .	140
4.1.2	Planetenbewegung . . . . .	141
4.1.3	Kometen und Meteoriten . . . . .	155
4.2	Oszillatorprobleme . . . . .	160
4.2.1	Das mathematische Pendel . . . . .	162
4.2.2	Der gedämpfte harmonische Oszillator . . . . .	169
4.2.3	Erzwungene Schwingungen: Harmonische Kraft . . . . .	173
4.2.4	Erzwungene Schwingungen: Allgemeine Anregungen . . . . .	180
<b>5</b>	<b>Allgemeine Formulierungen der Punktmechanik . . . . .</b>	<b>185</b>
5.1	Die Lagrangegleichungen erster Art (Lagrange I) . . . . .	186
5.1.1	Beispiele für Bewegungen unter Zwangsbedingungen . . . . .	186
5.1.2	Lagrange I für einen Massenpunkt . . . . .	192
5.2	D'Alembert's Prinzip . . . . .	204
5.2.1	Formulierung für einen Massenpunkt . . . . .	205
5.2.2	Formulierung und Anwendung für Systeme von Massenpunkten . . . . .	209
5.3	Die Lagrangegleichungen zweiter Art (Lagrange II) . . . . .	214
5.3.1	Lagrange II für einen Massenpunkt . . . . .	215
5.3.2	Lagrange II und Erhaltungssätze für einen Massenpunkt . . . . .	232
5.3.3	Lagrange II für ein System von Massenpunkten . . . . .	241
5.4	Die Hamiltonsche Formulierung der Mechanik . . . . .	246
5.4.1	Hamilton's Prinzip . . . . .	247
5.4.2	Hamilton's Bewegungsgleichungen . . . . .	255
5.4.3	Ein Blick in den Phasenraum . . . . .	262
<b>6</b>	<b>Praktische Anwendungen der Lagrangegleichungen . . . . .</b>	<b>271</b>
6.1	Gekoppelte harmonische Oszillatoren . . . . .	271
6.1.1	Das einfachste gekoppelte Schwingungssystem . . . . .	272
6.1.2	Schwebungen . . . . .	276
6.1.3	Die lineare Oszillatorkette . . . . .	278
6.1.4	Die Differentialgleichung einer schwingenden Saite . . . . .	290
6.2	Rotierende Koordinatensysteme . . . . .	294
6.2.1	Einfache Betrachtung von Scheinkräften . . . . .	295
6.2.2	Allgemeine Diskussion von Scheinkräften . . . . .	297
6.2.3	Scheinkräfte auf der rotierenden Erde . . . . .	305

6.3	Die Bewegung starrer Körper .....	314
6.3.1	Vorbereitung .....	315
6.3.2	Die kinetische Energie eines starren Körpers .....	317
6.3.3	Die Struktur der Trägheitsmatrix .....	322
6.3.4	Der Drehimpuls des starren Körpers .....	332
6.3.5	Die Eulerwinkel .....	335
6.3.6	Die Bewegungsgleichungen für die Rotation .....	338
6.3.7	Drehbewegung starrer Körper .....	341
<b>Literaturverzeichnis</b> .....		<b>353</b>
<b>Anhang</b> .....		<b>357</b>
A	Lebensdaten .....	358
B	Das griechische Alphabet .....	363
C	Nomenklatur .....	364
D	Physikalische Größen .....	365
E	Einige Konstante und astronomische Daten .....	369
F	Formelsammlung .....	372
F.1	Ebene Polarkoordinaten .....	372
F.2	Zylinderkoordinaten .....	373
F.3	Kugelkoordinaten .....	373
F.4	Additionstheoreme / Moivreformel .....	374
F.5	Hyperbelfunktionen .....	374
F.6	Reihenentwicklungen .....	375
F.7	Näherungsformeln ( $\delta$ klein) .....	375
<b>Sachverzeichnis</b> .....		<b>377</b>