

---

# Mechanik

---

Torsten Fließbach

# Mechanik

Lehrbuch zur Theoretischen Physik I

7. Auflage

Torsten Fließbach  
Universität Siegen  
Siegen, Deutschland

ISBN 978-3-642-55431-5  
DOI 10.1007/978-3-642-55432-2

ISBN 978-3-642-55432-2 (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 Spektrum

1. Aufl.: © 1992 im B.I.-Wissenschaftsverlag (Bibliographischen Institut & F.A. Brockhaus AG, Mannheim).

2.-4. Aufl.: © 1996, 1999, 2003 Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg • Berlin

5. Aufl.: © 2006 Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg • Berlin

6. Aufl.: © 2009 Springer, Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg

7. Aufl.: © 2015 Springer-Verlag Berlin Heidelberg

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.

*Planung und Lektorat:* Dr. Vera Spilner, Bianca Alton

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Spektrum ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-spektrum.de](http://www.springer-spektrum.de)

# Vorwort

Das vorliegende Buch ist Teil einer Vorlesungsausarbeitung [1, 2, 3, 4] des Zyklus Theoretische Physik I bis IV. Es gibt den Stoff meiner Vorlesung Theoretische Physik I über die Mechanik Physik wieder. Diese Vorlesung wird in Siegen für die Physikstudenten im 3. Semester angeboten.

Die Darstellung bewegt sich auf dem durchschnittlichen Niveau einer Kursvorlesung in Theoretischer Physik. Der Zugang ist eher intuitiv anstelle von deduktiv; formale Ableitungen und Beweise werden ohne besondere mathematische Akribie durchgeführt.

In enger Anlehnung an den Text, teilweise aber auch zu dessen Fortführung und Ergänzung werden über 80 Übungsaufgaben gestellt. Diese Aufgaben erfüllen ihren Zweck nur dann, wenn sie vom Studenten möglichst eigenständig bearbeitet werden. Diese Arbeit sollte unbedingt vor der Lektüre der Musterlösungen liegen, die im *Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik* [5] angeboten werden. Neben den Lösungen enthält das Arbeitsbuch ein kompaktes Repetitorium des Stoffs der Lehrbücher [1, 2, 3, 4].

Der Umfang des vorliegenden Buchs geht in einigen Teilen etwas über den Stoff hinaus, der während eines Semesters in einem Physikstudium üblicherweise an deutschen Universitäten behandelt wird. Der Stoff ist in Kapitel gegliedert, die im Durchschnitt etwa einer Vorlesungsdoppelstunde entsprechen. Natürlich bauen verschiedene Kapitel aufeinander auf. Es wurde aber versucht, die einzelnen Kapitel so zu gestalten, dass sie jeweils möglichst abgeschlossen sind. Damit wird einerseits eine Auswahl von Kapiteln für einen bestimmten Kurs (etwa in einem Bachelor-Studiengang) erleichtert, in dem der Stoff stärker begrenzt werden soll. Zum anderen kann der Student leichter die Kapitel nachlesen, die für ihn von Interesse sind.

Es gibt viele gute Darstellungen der Mechanik, die sich für ein vertiefendes Studium eignen. Ich gebe hier nur einige wenige Bücher an, die ich selbst bevorzugt zu Rate gezogen habe und die gelegentlich im Text zitiert werden. Als Standardwerk möchte ich zunächst die *Klassische Mechanik* von Goldstein [6] hervorheben. Für die einführenden Kapitel wurde ein ähnlicher Zugang gewählt wie die *Theoretische Mechanik* von Stephani und Kluge [7]. Schließlich sei noch der Band 1 des Lehrgangs von Landau-Lifschitz [8] erwähnt. Für die relativistische Mechanik benutze ich bevorzugt die einleitenden Kapitel von Weinbergs Buch [9] über die Allgemeine Relativitätstheorie.

Gegenüber der sechsten Auflage dieses Buchs wurden einige Fehler beseitigt, an zahlreichen Stellen wurden kleinere Ergänzungen und Verbesserungen vorgenommen.

Bei Peter Leitner und anderen Lesern der früheren Auflagen bedanke ich mich für wertvolle Hinweise. Fehlermeldungen, Bemerkungen und sonstige Hinweise sind jederzeit willkommen, etwa über den Kontaktlink auf meiner Homepage [www2.uni-siegen.de/~flieba/](http://www2.uni-siegen.de/~flieba/). Auf dieser Homepage finden sich auch eventuelle Korrekturlisten.

August 2014

Torsten Fließbach

## Literaturangaben

- [1] T. Fließbach, *Mechanik*, 7. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2014 (dieses Buch)
- [2] T. Fließbach, *Elektrodynamik*, 6. Auflage, Springer Spektrum, Heidelberg 2012
- [3] T. Fließbach, *Quantenmechanik*, 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2008
- [4] T. Fließbach, *Statistische Physik*, 5. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2010
- [5] T. Fließbach und H. Walliser, *Arbeitsbuch zur Theoretischen Physik – Repetitorium und Übungsbuch*, 3. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 2012
- [6] H. Goldstein, *Klassische Mechanik*, 11. Auflage, Aula Verlag, Wiebelsheim 1991
- [7] H. Stephani, G. Kluge, *Theoretische Mechanik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg 1995
- [8] L. D. Landau, E. M. Lifschitz, *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Band I, *Mechanik*, 14. Auflage, Deutsch (Harri), Frankfurt am Main 1997
- [9] S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, John Wiley & Sons, New York 1972

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>I Elementare Newtonsche Mechanik</b>	<b>3</b>
1 Bahnkurve . . . . .	3
2 Newtons Axiome . . . . .	9
3 Erhaltungssätze . . . . .	18
4 System von Massenpunkten . . . . .	25
5 Inertialsysteme . . . . .	31
6 Beschleunigte Bezugssysteme . . . . .	40
<b>II Lagrangeformalismus</b>	<b>49</b>
7 Lagrangegleichungen 1. Art . . . . .	49
8 Anwendungen I . . . . .	56
9 Lagrangegleichungen 2. Art . . . . .	65
10 Anwendungen II . . . . .	76
11 Raum-Zeit-Symmetrien . . . . .	86
<b>III Variationsprinzipien</b>	<b>95</b>
12 Variation ohne Nebenbedingung . . . . .	95
13 Variation mit Nebenbedingung . . . . .	104
14 Hamiltonsches Prinzip . . . . .	115
15 Noethertheorem . . . . .	121
<b>IV Zentralpotenzial</b>	<b>131</b>
16 Zweikörperproblem . . . . .	131
17 Keplerproblem . . . . .	141
18 Streuung . . . . .	151
<b>V Starrer Körper</b>	<b>165</b>
19 Kinematik . . . . .	165
20 Trägheitstensor . . . . .	171

21	Tensoren . . . . .	180
22	Eulersche Gleichungen . . . . .	191
23	Schwerer Kreisel . . . . .	199
<b>VI</b>	<b>Kleine Schwingungen</b>	<b>209</b>
24	Erzwungene Schwingungen . . . . .	209
25	System mit vielen Freiheitsgraden . . . . .	217
26	Anwendungen . . . . .	226
<b>VII</b>	<b>Hamiltonformalismus</b>	<b>235</b>
27	Kanonische Gleichungen . . . . .	235
28	Kanonische Transformationen . . . . .	243
29	Hamilton-Jacobi-Gleichung . . . . .	251
<b>VIII</b>	<b>Kontinuumsmechanik</b>	<b>255</b>
30	Saitenschwingung . . . . .	255
31	Balkenbiegung . . . . .	264
32	Hydrodynamik . . . . .	269
33	Feldtheorien . . . . .	283
<b>IX</b>	<b>Relativistische Mechanik</b>	<b>289</b>
34	Relativitätsprinzip . . . . .	289
35	Längen- und Zeitmessung . . . . .	299
36	Lorentzgruppe . . . . .	312
37	Lorentztensoren . . . . .	318
38	Bewegungsgleichung . . . . .	325
39	Anwendungen . . . . .	335
40	Lagrangefunktion . . . . .	346
	<b>Register</b>	<b>353</b>

# Einleitung

Die Mechanik untersucht die Gesetzmäßigkeiten, nach denen die Bewegung materieller Körper verläuft. Unter Bewegung versteht man die Änderung des Ortes als Funktion der Zeit. Die Bewegung erfolgt unter dem Einfluss von Kräften, die in der Mechanik als bekannt vorausgesetzt werden.

Im vorigen Jahrhundert war die Meinung verbreitet, dass physikalische Vorgänge erst dann verstanden sind, wenn sie mechanisch erklärt werden können (mechanistisches Weltbild). So kann etwa die Wärme auf die ungeordnete Bewegung der Atome zurückgeführt werden. Heute wissen wir, dass diese Reduktion für viele Phänomene (Elektromagnetismus, Quanteneffekte) nicht möglich ist.

Der größte Teil dieses Buches beschäftigt sich mit zu Massenpunkten idealisierten Körpern und mit Systemen von Massenpunkten. Teil I stellt die Mechanik solcher Systeme auf der Basis von Newtons Axiomen dar; dabei werden die grundlegenden Konzepte wie Massenpunkt, Bahnkurve, Bezugs- und Koordinatensystem, Ort und Zeit, Impuls, Drehimpuls, kinetische und potenzielle Energie eingeführt und diskutiert. Eine zentrale Stellung nimmt die Formulierung der Mechanik im Rahmen des Lagrangeformalismus (Teil II) ein. Der relativ ausführliche Teil III über Variationsprinzipien führt schließlich zu einer allgemeinen Darstellung des Zusammenhangs zwischen Symmetrien und Erhaltungsgrößen des Systems (Noethertheorem). Die anschließenden Teile IV – VI untersuchen die wichtigsten Anwendungsbereiche, und zwar die Bewegung im Zentralpotenzial, die Dynamik eines starren Körpers und harmonische Schwingungen.

Der alternative Hamiltonsche Formalismus (Teil VII) spielt für Anwendungen eine untergeordnete Rolle. Er wird aber bei der Einführung der Quantenmechanik benötigt; außerdem ist er der Ausgangspunkt für die Diskussion der Beziehungen zwischen Mechanik und Quantenmechanik. Neben den erwähnten Anwendungen umfasst die Mechanik die großen Gebiete der Elastomechanik (etwa Saitenschwingung, Balkenbiegung) und der Hydrodynamik. Diese Gebiete enthalten genügend Stoff für eigene Vorlesungen; in Teil VIII werden nur die einfachsten Grundgleichungen vorgestellt. Als weiterführende Ergänzung stellt Kapitel 33 einen Zusammenhang her zwischen dem Lagrangeformalismus der Punktmechanik und dem in anderen Feldtheorien.

Der letzte Teil IX gibt eine (gemessen am Gesamtumfang) relativ ausführliche Einführung in die Spezielle Relativitätstheorie. In der resultierenden relativistischen Mechanik werden unter anderem die Erzeugung schwerer Teilchen und das Zwillingsparadoxon diskutiert.