

S. Brandt H. D. Dahmen

MECHANIK

Eine Einführung in Experiment
und Theorie

Dritte, völlig neubearbeitete Auflage
mit 270 Abbildungen, 10 Tabellen, 52 Experimenten
und 145 Aufgaben mit Hinweisen und Lösungen



Springer

Professor Dr. Siegmund Brandt
Professor Dr. Hans Dieter Dahmen
Fachbereich Physik, Universität Gesamthochschule Siegen,
D-57068 Siegen

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Brandt, Siegmund: Mechanik: Eine Einführung in Experiment und Theorie;
mit 10 Tabellen, 52 Experimenten, 145 Aufgaben mit Hinweisen und Lösungen
S. Brandt; H. D. Dahmen. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Budapest;
Hong Kong; London; Mailand; Paris; Tokyo: Springer, 1996 (Springer Lehrbuch)
ISBN 3-540-59319-5
NE: Dahmen, Hans Dieter

Die zweite Auflage erschien unter
Physik – Eine Einführung in Experiment und Theorie, Bd.1 – Mechanik

ISBN 3-540-59319-5 3. Aufl. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-540-13806-4 2. Aufl. Springer-Verlag 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-Verlag Berlin Heidelberg 1977, 1984, 1996
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: Reproduktionsfertige Vorlage vom Autor mit Springer \TeX -Makros
SPIN: 10089438 56/3144 - 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

Inhaltsverzeichnis

1	Kinematik	1
1.1	Massenpunkt. Vektoren von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung	1
1.2	Anwendungen	4
1.2.1	Gleichförmig geradlinige Bewegung	4
1.2.2	Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	4
1.2.3	Gleichförmige Kreisbewegung	6
1.2.4	Superposition von Bewegungen	8
1.3	Einheitert von Länge und Zeit. Dimensionen. Einheitensysteme	9
1.4	Aufgaben	11
2	Dynamik eines einzelnen Massenpunktes	13
2.1	Schwere Masse. Dichte	13
2.2	Kraft	15
2.2.1	Kraft als Vektorgröße	15
2.2.2	Beispiele von Kräften, Gewicht, Reibungskraft, Federkraft. Reduzierung der Reibung durch Luftkissen	17
2.3	Erstes Newtonsches Gesetz	20
2.4	Zweites Newtonsches Gesetz. Träge Masse	21
2.5	Drittes Newtonsches Gesetz	27
2.6	Anwendungen: Federpendel. Mathematisches Pendel. Fall und Wurf	27
2.6.1	Federpendel (eindimensionaler harmonischer Oszillator)	28
2.6.2	Mathematisches Pendel	33
2.6.3	Fall und Wurf	36
2.6.4	Wurf mit Reibung	38
2.7	Impuls	41
2.8	Arbeit	42

2.9	Kraftfelder. Feldstärke. Gravitationsgesetz	44
2.10	Potential. Potentielle Energie	51
2.11	Konservatives Kraftfeld als Gradient des Potentialfeldes ...	53
2.12	Kinetische Energie	54
2.13	Energieerhaltungssatz für konservative Kraftfelder	55
2.14	Einheiten der Energie. Leistung und Wirkung	57
2.15	Drehimpuls und Drehmoment	58
2.16	Bewegung im Zentralfeld	59
2.17	Bewegung im zentralen Gravitationsfeld	59
2.18	Beschreibung der Planetenbewegung im Impulsraum	66
2.19	Aufgaben	69
3	Dynamik mehrerer Massenpunkte	73
3.1	Impuls eines Systems zweier Massenpunkte. Schwerpunkt. Impulserhaltungssatz	73
3.2	Verallgemeinerung auf mehrere Massenpunkte. Schwerpunktsystem	76
3.3	Energieerhaltungssatz	79
3.4	Drehimpuls. Drehimpulserhaltungssatz	84
3.5	Zweikörperproblem	87
3.5.1	Schwerpunkt- und Relativkoordinaten	87
3.5.2	Planetenbewegung	88
3.5.3	Elastischer Stoß	89
3.6	Mehrkörperproblem	92
3.6.1	Numerische Lösung	92
3.6.2	Beispiele zum Dreikörperproblem	94
3.7	Aufgaben	96
4	Starrer Körper. Feste Achsen	99
4.1	Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit	99
4.2	Impuls. Zentripetalkraft	101
4.3	Drehimpuls und Trägheitsmoment. Bewegungsgleichung ..	102
4.4	Bewegung im Schwerfeld. Physikalisches Pendel	106
4.5	Steinerscher Satz	109
4.6	Rotationsenergie. Energieerhaltung	111
4.7	Aufgaben	112
5	Inertialsysteme	117
5.1	Translationen	117
5.2	Rotation des Koordinatensystems	121
5.3	Galilei-Transformationen	123
5.4	Aufgaben	127

6 Nichtinertialsysteme	131
6.1 Beschleunigtes Bezugssystem	131
6.2 Zeitabhängige Rotation	133
6.3 Gleichförmig rotierendes Bezugssystem. Zentrifugalkraft. Corioliskraft	135
6.4 Aufgaben	143
7 Starrer Körper. Bewegliche Achsen	148
7.1 Die Freiheitsgrade des starren Körpers	148
7.2 Eulersches Theorem. Zeitableitung beliebiger Vektoren	151
7.3 Drehimpuls und Trägheitsmoment des starren Körpers bei Rotation um einen festen Punkt	152
7.4 Trägheitstensoren verschiedener Körper. Hauptträgheitsachsen	157
7.5 Drehimpuls und Trägheitsmoment um feste Achsen	161
7.6 Trägheitsellipsoid	162
7.7 Steinerscher Satz	164
7.8 Bewegungsgleichungen des starren Körpers. Drehimpulserhaltungssatz. Eulersche Gleichungen	165
7.9 Kinetische Energie des starren Körpers. Translationsenergie. Rotationsenergie. Energieerhaltungssatz	168
7.10 Kräftefreier Kugelkreisel	171
7.11 Kräftefreie Rotation um eine Hauptträgheitsachse	172
7.12 Kräftefreie Rotation um eine beliebige Achse. Poinsotsche Konstruktion	178
7.13 Symmetrischer Kreisel	180
7.14 Kreisel unter der Einwirkung von Kräften. Larmor-Präzession	184
7.15 Aufgaben	186
8 Schwingungen	189
8.1 Vorbemerkungen	189
8.2 Ungedämpfte Schwingung. Komplexe Schreibweise	190
8.3 Phasenebene	192
8.4 Gedämpfte Schwingung	194
8.5 Erzwungene Schwingung	201
8.5.1 Erregter Oszillator. Schwingungsgleichung	201
8.5.2 Lösung der Schwingungsgleichung	204
8.5.3 Stationäre Schwingung	206
8.5.4 Energie- und Leistungsbilanz. Resonanz	209
8.5.5 Einschwingvorgang	215
8.5.6 Grenzfall verschwindender Dämpfung. Schwebung	217
8.5.7 Resonanzkatastrophe	219

8.6	Gekoppelte Oszillatoren	220
8.7	Aufgaben	232
9	Nichtlineare Dynamik. Deterministisches Chaos	233
9.1	Duffing-Oszillator	233
9.2	Lineare Bewegungsgleichung. Stabilität. Fixpunkte	239
9.3	Nichtlineare Bewegungsgleichung. Linearisierung	249
9.4	Grenzmengen. Attraktoren. Poincaré-Darstellung	254
9.5	Stabile und seltsame Attraktoren. Deterministisches Chaos	258
9.6	Feigenbaum-Diagramm	260
9.7	Hysterese	263
9.8	Aufgaben	268
10	Wellen auf ein- und zweidimensionalen Trägern	270
10.1	Longitudinale Wellen	270
10.2	Transversale Wellen	273
10.3	Allgemeine Lösung der Wellengleichung	276
10.4	Harmonische Wellen	277
10.5	Superpositionsprinzip	280
10.6	Energiedichte und Energiestromdichte	281
10.7	Reflexion	284
10.8	Stehende Wellen	291
10.9	Laufende Welle auf eingespannter Saite	296
10.10	Membranschwingungen	299
10.11	Aufgaben	303
11	Elastizität	307
11.1	Elastische Körper	307
11.2	Dehnung	310
11.3	Dehnung und Querkontraktion	312
11.4	Spannungs- und Verzerrungstensor für den längsverzerrten Quader	314
11.5	Lokaler Verzerrungstensor	320
11.6	Lokaler Spannungstensor	326
11.7	Kraftdichte	330
11.8	Lokales Hookesches Gesetz	332
11.9	Scherung	333
11.10	Torsion	337
11.11	Biegung	341
11.12	Aufgaben	345

12 Wellen in elastischen Medien	349
12.1 Eulersche Bewegungsgleichung elastischer Medien	349
12.2 Zerlegung in Quell- und Wirbelfeld	350
12.3 Das Quellfeld. Longitudinalwellen im unendlich ausgedehnten Medium	352
12.4 Das Wirbelfeld. Transversalwellen im unendlich ausgedehnten Medium	355
12.5 Verzerrungs- und Spannungstensoren von Transversal- und Longitudinalwellen	357
12.6 Reflexion und Brechung der Transversal- und Longitudinalwelle an der Oberfläche eines Mediums	359
12.7 Transversal- und Longitudinalwellen in einer Materialplatte	364
12.8 Aufgaben	367
13 Hydrodynamik	372
13.1 Deformation eines Flüssigkeitselementes	372
13.2 Rotations- und Verzerrungsgeschwindigkeitstensor	374
13.3 Kontinuitätsgleichung	378
13.4 Konservative äußere und innere Kräfte	379
13.5 Ideale Flüssigkeiten. Eulersche Bewegungsgleichung	382
13.6 Hydrostatik	383
13.7 Gleichförmig rotierende, inkompressible, ideale Flüssigkeit im Schwerfeld	386
13.8 Stationäre Strömung einer inkompressiblen Flüssigkeit. Bernoulli-Gleichung	390
13.9 Energiesatz für die nichtstationäre Strömung der idealen Flüssigkeit	393
13.10 Spannungstensor der Reibung einer zähen Flüssigkeit. Stokessches Reibungsgesetz	396
13.11 Navier-Stokes-Gleichung. Ähnlichkeitsgesetze	400
13.12 Strömung durch Röhren. Hagen-Poiseuille-Gesetz	402
13.13 Reibungswiderstand einer Kugel in einer zähen Flüssigkeit. Stokessches Reibungsgesetz ...	405
13.14 Aufgaben	406
Anhang	
A Vektoren	408
A.1 Begriff des Vektors	408
A.2 Vektoralgebra in koordinatenfreier Schreibweise	409
A.2.1 Multiplikation eines Vektors mit einer Zahl	409
A.2.2 Addition und Subtraktion von Vektoren	409

A.2.3	Skalarprodukt	410
A.2.4	Vektorprodukt	412
A.2.5	Spatprodukt	413
A.2.6	Entwicklungssatz	414
A.3	Vektoralgebra in Koordinatenschreibweise	416
A.3.1	Einheitsvektor. Kartesisches Koordinatensystem. Vektorkomponenten	416
A.3.2	Rechenregeln	419
A.4	Differentiation eines Vektors nach einem Parameter	422
A.4.1	Vektor als Funktion eines Parameters. Ortsvektor ..	422
A.4.2	Ableitungen	423
A.5	Nichtkartesische Koordinatensysteme	424
A.5.1	Kugelkoordinaten	425
A.5.2	Zylinderkoordinaten	427
A.5.3	Ebene Polarkoordinaten	428
A.6	Aufgaben	431
B	Tensoren	433
B.1	Basistensoren	433
B.2	Allgemeine Tensoren. Rechenregeln	433
B.3	Darstellung durch Links- und Rechtsvektoren	436
B.4	Produkt von Tensor und Vektor	436
B.5	Produkt zweier Tensoren	438
B.6	Vektorprodukt in Tensorschreibweise	439
B.7	Matrizenrechnung	440
B.8	Determinante	442
B.9	Matrixinversion	444
B.10	Zerlegung in symmetrische und antisymmetrische Tensoren	445
B.11	Abbildungen durch einfache Tensoren	446
B.12	Rotation	452
B.13	Infinitesimale Rotation	457
B.14	Basiswechsel	458
B.15	Hauptachsentransformation	461
B.16	Aufgaben	466
C	Vektoranalysis	468
C.1	Skalarfelder und Vektorfelder	468
C.2	Partielle Ableitungen. Richtungsableitung. Gradient	470
C.3	Nabla-Operator in Kugel- und Zylinderkoordinaten	477
C.4	Divergenz	478
C.5	Rotation	481
C.6	Laplace-Operator	484
C.7	Totale Zeitableitung	485

C.8	Einfache Rechenregeln für den Nabla-Operator	486
C.9	Linienintegral	487
C.10	Wegunabhängiges Linienintegral. Potentialfunktion eines Vektorfeldes	491
C.11	Oberflächenintegral	492
C.12	Volumenintegral	499
C.13	Integralsatz von Stokes	502
C.14	Integralsatz von Gauß	506
C.15	Aufgaben	508
D	Taylor-Reihen	511
E	Komplexe Zahlen	514
F	Die wichtigsten SI-Einheiten der Mechanik	520
	Hinweise und Lösungen zu den Aufgaben	522
	Sachverzeichnis	545