

S. Brandt H. D. Dahmen

Physik

Eine Einführung in Experiment und Theorie

Band 1 Mechanik

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 162 Abbildungen

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York Tokyo 1984

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	
1.1 Stellung der Physik innerhalb der Naturwissenschaften	1
1.2 Strukturierung der Physik	3
1.3 Gliederung und Stoffauswahl	5
2. Vektoren und Tensoren	
2.1 Begriff des Vektors	9
2.2 Vektoralgebra in koordinatenfreier Schreibweise	10
2.2.1 Multiplikation eines Vektors mit einer Zahl	10
2.2.2 Addition und Subtraktion von Vektoren	11
2.2.3 Skalarprodukt	12
2.2.4 Vektorprodukt	14
2.2.5 Spatprodukt	15
2.2.6 Entwicklungssatz	16
2.3 Vektoralgebra in Koordinatenschreibweise	17
2.3.1 Einheitsvektor. Kartesisches Koordinatensystem. Vektorkomponenten	17
2.3.2 Rechenregeln	20
2.4 Differentiation eines Vektors nach einem Parameter	26
2.4.1 Vektor als Funktion eines Parameters. Ortsvektor	26
2.4.2 Ableitungen	27
2.5 Nicht-kartesische Koordinatensysteme	28
2.5.1 Kugelkoordinaten	28
2.5.2 Zylinderkoordinaten	31
2.5.3 Ebene Polarkoordinaten	33
*2.6 Tensoren	35
2.6.1 Basistensoren	36
2.6.2 Allgemeine Tensoren. Rechenregeln	36
2.6.3 Multiplikation von Tensoren mit Vektoren bzw. Tensoren	38

2.6.4 Matrizenrechnung	42
2.7 Aufgaben	45
3. Kinematik	
3.1 Massenpunkt. Vektoren von Ort, Geschwindigkeit und Beschleunigung	46
3.2 Anwendungen	49
3.2.1 Gleichförmig geradlinige Bewegung	49
3.2.2 Gleichmäßig beschleunigte Bewegung	50
3.2.3 Gleichförmige Kreisbewegung	52
3.3 Einheiten von Länge und Zeit. Dimensionen. Einheitensysteme ..	54
4. Dynamik eines einzelnen Massenpunktes	
4.1 Schwere Masse. Dichte	57
4.2 Kraft	59
4.2.1 Kraft als Vektorgröße	59
4.2.2 Beispiele von Kräften. Gewicht, Reibungskraft, Federkraft. Reduzierung der Reibung durch Luftkissen ..	60
Gewicht	60
Federkraft. Hookesches Gesetz	61
Gleichgewicht	61
Reibungskraft	63
Methoden zur Verminderung der Reibung. Luftkissen- fahrbahn	63
4.3 Erstes Newtonsches Gesetz	65
4.4 Zweites Newtonsches Gesetz. Träge Masse	66
4.5 Drittes Newtonsches Gesetz	71
4.6 Anwendungen: Federpendel. Mathematisches Pendel. Fall und Wurf	72
4.6.1 Federpendel	72
4.6.2 Mathematisches Pendel	78
* 4.6.3 Mathematisches Pendel bei großen Winkeln	81
* 4.6.4 Phasenraumdarstellung der Bewegung des mathematischen Pendels	83
4.6.5 Fall und Wurf	84
* 4.6.6 Wurf mit Reibung	86
4.7 Impuls	89
4.8 Arbeit. Energie. Potential	90

4.8.1	Definition der Arbeit	90
4.8.2	Verschiedene Schreibweisen des Linienintegrals	92
4.8.3	Kraftfelder. Feldstärke	95
	Vektorfeld. Feldstärke. Homogenes Schwerefeld	95
	Newtonsches Gravitationsgesetz	95
	Coulombsches Gesetz	99
	Konservative Kraftfelder	100
4.8.4	Potential. Potentielle Energie	101
4.8.5	Konservatives Kraftfeld als Gradient des Potentialfeldes	104
4.8.6	Kinetische Energie	105
4.8.7	Energieerhaltungssatz für konservative Kraftfelder ...	106
4.8.8	Einheiten der Energie. Leistung und Wirkung	107
* 4.9	Anwendungen: Berechnung eindimensionaler Bewegungen aus dem Energiesatz	108
4.9.1	Berechnung des senkrechten Wurfs aus dem Energiesatz .	108
4.9.2	Der eindimensionale harmonische Oszillator	111
4.10	Drehimpuls und Drehmoment	112
4.11	Anwendungen: Bewegung im Zentralfeld. Planetenbewegung	113
4.11.1	Bewegung eines Massenpunktes im Zentralfeld	113
4.11.2	Bewegung im zentralen Gravitationsfeld	114
* 4.11.3	Beschreibung der Planetenbewegung im Impulsraum	120
4.12	Aufgaben	123
5.	Dynamik mehrerer Massenpunkte	
5.1	Impuls eines Systems zweier Massenpunkte. Schwerpunkt.	
	Impulserhaltungssatz	125
5.2	Verallgemeinerung auf mehrere Massenpunkte	128
5.3	Energieerhaltungssatz	131
5.4	Drehimpuls eines Systems mehrerer Massenpunkte	137
5.4.1	Drehimpulserhaltung	138
5.4.2	Drehimpuls und Drehmoment bezogen auf den Schwerpunkt	139
5.5	Anwendungen	145
5.5.1	2-Körper-Problem. Schwerpunkt- und Relativ- Koordinaten	145
5.5.2	Planetenbewegung	147
* 5.5.3	Drehimpuls im Zweikörpersystem	149

5.5.4	Elastischer Stoß	153
	Elastischer Stoß im Schwerpunktsystem	153
	Elastischer Stoß im Laborsystem	154
	Elastischer Stoß im Reflexionssystem	156
* 5.5.5	N-Körper-Problem. Numerische Lösung	158
* 5.5.6	Qualitative Diskussion des 3-Körper-Problems	160
5.6	Aufgabe	162
6.	Starrer Körper. Feste Achsen	
6.1	Definition. Zusammenhang zwischen Geschwindigkeit und Winkelgeschwindigkeit	163
6.2	Impuls	165
6.3	Drehimpuls und Trägheitsmoment um eine starre Achse. Bewegungsgleichung	167
6.4	Bewegung um eine raumfeste Achse im homogenen Schwerefeld. Physikalisches Pendel	170
6.5	Steinerscher Satz	173
6.6	Rotationsenergie. Energieerhaltung	174
6.7	Aufgabe	176
7.	Transformationen und Bezugssysteme	
7.1	Transformationen zwischen Inertialsystemen	177
7.1.1	Translationen	177
7.1.2	Zeitunabhängige Rotationen	180
7.1.3	Zeitabhängige Rotationen	185
7.1.4	Spiegelungen	188
7.1.5	Galilei-Transformationen	189
7.2	Klassifikation physikalischer Größen unter Rotationen	191
7.2.1	Skalare	191
7.2.2	Vektoren	191
7.2.3	Tensoren	193
7.3	Klassifikation physikalischer Größen unter Spiegelungen	194
7.4	Nichtinertialsysteme	195
7.4.1	Geradlinig beschleunigte Systeme	195
7.4.2	Gleichförmig rotierendes Bezugssystem. Zentrifugalkraft, Corioliskraft	196
7.5	Aufgaben	203

8. Symmetrien und Erhaltungssätze	
8.1 Hamiltonfunktion und Hamiltonsche Gleichungen	204
8.2 Invarianz der Hamiltonfunktion bei abgeschlossenen Systemen, Erhaltungssätze	207
8.2.1 Räumliche Translationsinvarianz	208
8.2.2 Rotationsinvarianz	211
8.2.3 Zeitliche Translationsinvarianz	214
8.2.4 Spiegelungen und Zeitumkehr	216
8.2.5 Galilei-Transformation	221
8.3 Nichtabgeschlossene Systeme	225
*9. Starrer Körper. Bewegliche Achsen	
9.1 Die Freiheitsgrade des starren Körpers	228
9.2 Eulersches Theorem. Zeitableitung beliebiger Vektoren	231
9.3 Drehimpuls und Trägheitsmoment des starren Körpers bei Rotation um einen festen Punkt	233
9.4 Eigenschaften des Trägheitstensors	238
9.4.1 Trägheitstensoren verschiedener Körper	238
9.4.2 Hauptträgheitsachsen	242
9.4.3 Drehimpuls und Trägheitsmoment um feste Achsen	242
9.4.4 Trägheitsellipsoid	243
9.4.5 Steinerscher Satz	245
9.5 Bewegungsgleichungen des starren Körpers. Eulersche Gleichungen	247
9.6 Kinetische Energie des starren Körpers. Translationsenergie. Rotationsenergie. Energieerhaltungssatz	250
9.7 Kräftefreier Kreisel	253
9.7.1 Kugelkreisel	254
9.7.2 Kräftefreie Rotation um eine Hauptträgheitsachse	254
9.7.3 Kräftefreie Rotation um eine beliebige Achse. Poin- sotsche Konstruktion	260
9.7.4 Symmetrischer Kreisel	261
9.8 Kreisel unter der Einwirkung von Kräften. Larmor Präzession ..	266
10. Schwingungen	268
10.1 Ungedämpfte Schwingung. Komplexe Schreibweise	269
10.2 Gedämpfte Schwingung	272
* 10.3 Erzwungene Schwingung	278

10.3.1 Lösung der Schwingungsgleichung	281
10.3.2 Einschwingvorgang und stationärer Zustand	282
10.3.3 Resonanz	285
10.3.4 Grenzfall verschwindender Dämpfung	291
*10.4 Gekoppelte Oszillatoren	293
10.4.1 Zwei gekoppelte Oszillatoren mit Dämpfung	293
10.4.2 Zwei gekoppelte Oszillatoren ohne Dämpfung	298
10.5 Aufgaben	302
11. Mechanische Wellen	
11.1 D'Alembert-Wellen	303
11.1.1 Mechanik der Massenpunktketten	303
11.1.2 Kontinuierlicher Grenzfall. D'Alembert-Gleichung	305
11.1.3 Longitudinalwellen und Transversalwellen	307
11.2 Lösung der d'Alembert-Gleichung	308
11.2.1 Allgemeine Lösung. Soliton	308
11.2.2 Harmonische Welle	309
11.2.3 Superpositionsprinzip	311
*11.3 Energie- und Impulstransport	312
11.3.1 Kanonischer Impuls	312
11.3.2 Energiedichte und Energiestromdichte	314
11.3.3 Impulsdichte und Impulsstromdichte	315
11.3.4 Bewegungsgleichung für die mechanische Impulsdichte ..	318
11.4 Totalreflexion und stehende Wellen	319
11.4.1 Randbedingungen	319
11.4.2 Reflexion am losen Ende	320
11.4.3 Reflexion am festen Ende	321
11.4.4 Reflexion von Solitonen	321
11.4.5 Reflexion harmonischer Wellen. Stehende Wellen	324
11.4.6 Eigenschwingungen von Luftsäule und Saite	326
11.5 Brechung und Reflexion	329
*11.6 Transformationseigenschaften der d'Alembert-Gleichung	333
11.6.1 Wellen auf der Oszillatorkette	333
11.6.2 Lichtwellen. Relativitätsprinzip. Lorentz-Transformationen	334
*11.7 Klein-Gordon-Wellen	337
11.7.1 Modell gekoppelter Oszillatoren	337
11.7.2 Harmonische Wellen als Lösungen der Klein-Gordon-Gleichung. Phasengeschwindigkeit	339

11.7.3 Superpositionsprinzip. Allgemeine Lösung der Wellengleichung	340
11.7.4 Wellenpaket. Gruppengeschwindigkeit	341
11.7.5 Unschärferelation. Dispersion	345
* 11.8 Räumliche Wellenvorgänge	347
12. Relativistische Mechanik	
12.1 Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bezugssystem	352
12.2 Lorentz-Transformation	355
12.2.1 Versagen der Galilei-Transformation	355
12.2.2 Gleichzeitigkeit	357
12.2.3 Lorentz-Transformationen	357
12.2.4 Invarianz des Viererabstandes	361
12.2.5 Längenkontraktion und Zeitdilatation	363
12.2.6 Lorentz-Transformation in beliebiger Richtung	365
12.3 Vierervektoren	366
12.4 Relativistische Punktmechanik eines einzelnen Teilchens	368
12.4.1 Eigenzeit. Vierergeschwindigkeit. Viererimpuls. Relativistische Bewegungsgleichung	368
12.4.2 Relativistische Bewegungsgleichung. Äquivalenz von Masse und Energie. Impulserhaltungssatz	373
12.4.3 Energieerhaltungssatz	375
12.5 Relativistische Mechanik von Mehrteilchensystemen	377
12.5.1 Definition des Systems. Bewegungsgleichungen	377
12.5.2 Erhaltungssätze	379
12.6 Elementarteilchenreaktionen bei relativistischen Geschwindigkeiten	380
12.6.1 Einheiten für Geschwindigkeit, Energie, Impuls und Masse in der Elementarteilchenphysik	381
12.6.2 Erhaltung des Gesamtviererimpulses bei Teilchen- reaktionen	383
12.6.3 Elastischer Stoß von Elementarteilchen	384
12.6.4 Inelastischer Stoß. Teilchenerzeugung und -vernichtung	388
12.6.5 Zerfall von Elementarteilchen	392
12.6.6 Beobachtung von Elementarteilchenreaktionen in der Blasenkammer	394
12.6.7 "Energieausbeute" bei Massenumwandlung	395
* 12.7 Vierertensoren	397

* 12.8 Rotationen im Minkowski-Raum. Homogene Lorentz- Transformationen	400
12.8.1 Lorentz-Schub in x-Richtung	403
12.8.2 Lorentz-Schub in beliebiger Richtung	404
12.8.3 Räumliche Rotationen im Minkowski-Raum	404
12.8.4 Lorentz-Transformationen ohne Spiegelung und Zeitumkehr	404
12.8.5 Räumliche Spiegelung um Minkowski-Raum. Zeitumkehr, Inversion	404
12.8.6 Allgemeine Lorentz-Transformationen	405
* 12.9 Graphische Veranschaulichung der Vierervektoren und ihrer Transformationen	405
* 12.10 Klassifikation physikalischer Größen unter Lorentz- Transformationen	414
12.10.1 Lorentz-Skalare (Invarianten)	414
12.10.2 Vektoren	414
12.10.3 Tensoren	414
12.10.4 Verhalten von Lorentz-Größen unter räumlichen Rotationen	415
* 12.11 Inhomogene Lorentz-Transformationen	415
 Anhang A: Komplexe Zahlen	416
Anhang B: Formelsammlung	421
Anhang C: Die wichtigsten SI-Einheiten der Mechanik	445
Sachverzeichnis	447