

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
<b>3.</b>	<b>Kinematik</b>	
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
<b>4.</b>	<b>Dynamik eines einzelnen Massenpunktes</b>	
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 Schwerfeld .....	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
 <b>5. Dynamik mehrerer Massenpunkte</b>		
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.	<b>Starrer Körper. Feste Achsen</b>	
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 Schwerfeld. Physikalisches Pendel .....	170
6.5	Steinerscher Satz .....	173
6.6	Rotationsenergie. Energieerhaltung .....	174
6.7	Aufgabe .....	176
7.	<b>Transformationen und Bezugssysteme</b>	
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 Massenpunktkette .....	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 Teilchenreaktionen .....	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 Blaskammer .....	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