

G. Falk W. Ruppel

*Die Physik des
Naturwissenschaftlers*

Mechanik Relativität Gravitation

Ein Lehrbuch

Dritte, verbesserte Auflage

Springer-Verlag
Berlin Heidelberg New York
London Paris Tokyo

Inhaltsverzeichnis

I Einleitende Orientierung

§ 1	Physikalische Größen	1
	Größen als Mittel des quantitativen Vergleichens	1
	Anwendung auf die Welt als ganze	3
	Theorie und Wirklichkeit	4
§ 2	Physik und Mathematik	6
	Die physikalische Messung	7
	Mittelwert und quadratische Streuung	8
	Statistik der Einzelmessungen und Wahrscheinlichkeit	10
	Bessere und schlechtere Meßverfahren	13
	Der Fehler einer Messung	14
	Streuung und Fehler in der klassischen Physik	15
	Streuung und Fehler in der Quantenmechanik	18
	Das Instrument „Mathematik“	19
	Richtig und Falsch in der Physik	20
	Theorie und Mathematik	21
§ 3	Kinematik und Dynamik	22
	Die kinematische Beschreibung der Bewegung	22
	Unphysikalische Bewegungen	25
	Bewegung als Transport	26
§ 4	Die Begriffe Impuls und Energie in ihrer historischen Entwicklung . .	27
	Huygens' Untersuchungen zum elastischen Stoß	27
	Newtons Bewegungsgleichungen	30
	Newtons Prinzip der Gleichheit von actio und reactio	32
	Kinetische und potentielle Energie	33
	Ausdehnung des Energiebegriffs auf nicht-mechanische Vorgänge und Systeme	36
	Ausdehnung des Impulsbegriffs auf nicht-mechanische Systeme . .	37
	Bewegung als Energie-Impuls-Transport	38
	Heisenbergs Unschärferelationen	40

II Impuls und Energie

§ 5	Der Transport von Energie und Impuls	41
	Transporte durch den leeren Raum	41
	Innere Energie, Ruhenergie	42
	Kinetische Energie	43
	Grenzgeschwindigkeit von Transporten	46
§ 6	Der Begriff des Teilchens	49
	Energie-Impuls-Zusammenhang eines Transports	49
	Die Funktion $E(\mathbf{P})$ für Transporte durch den leeren Raum bei beliebiger Geschwindigkeit	51
	Newtonsche Teilchen	53
	Extrem relativistische Teilchen	54
§ 7	Die Messung des Impulses	55
	Impulsmessung als Operation des Vergleichens	55
	Das Prinzip der Impulsmessung	56
	Impulsmessung bei $v \ll c$	58
	Impulsaustausch eines Pendels	59
	Impulsmessung bei $v = c$	61
	Einheiten des Impulses	61
§ 8	Die Messung der Energie	62
	Energiemessung als Operation des Vergleichens	62
	Verschiebungen	63
	Verschiebungenergie im homogenen Gravitationsfeld	64
	Freier Fall im homogenen Gravitationsfeld	65
	Verschiebungenergie beim Spannen einer elastischen Feder	69
	Einheiten der Energie	71

III Stoßprozesse

§ 9	Allgemeine Charakterisierung von Stoßprozessen	73
	Wechselwirkung von Energie-Impuls-Transporten	73
	Impuls- und Energiebilanz zwischen Anfangs- und Endzustand	75
§ 10	Schwerpunktssystem	76
	Schwerpunktssystem eines Teilchens	76
	Schwerpunktssystem mehrerer Teilchen	77
	Stoßinvarianten	80
§ 11	Der elastische Stoß	82
	Impuls- und Energiebilanz	82
	Elastischer Stoß zwischen Newtonschen Teilchen	83
	Zentral-elastischer Stoß	84
	Beispiele elastischer Stoßprozesse	87

Compton-Effekt	88
Weiche und harte Photonen beim Compton-Effekt	89
Beobachtung der Compton-Streuung an gebundenen Elektronen	90
Compton-Effekt am bewegten Elektron	91
Reflexion von Licht am ruhenden Spiegel	92
Reflexion von Licht am bewegten Spiegel	92
§ 12 Der inelastische Stoß	95
Energiebilanz	95
Modell eines inelastischen Stoßes	96
Der total inelastische Stoß	97
Franck-Hertz-Versuch	99
Paarerzeugung und Paazerstrahlung	100
Absorptionsprozesse für hochenergetische Photonen	101
Emission eines Photons. Mößbauer-Effekt	103
§ 13 Teilchenreaktionen	105
Mikroskopische Reversibilität	105
Reaktionsenergie und Schwellenergie	106
Aktivierungsenergie	107
Beispiel einer chemischen Reaktion	107
Kernfusionsreaktionen	109
Proton-Proton-Stoß	110
§ 14 Dissipative Energie-Impuls-Transporte	112
Energie-Impuls-Transport in Materie	113
Modell eines Stoßmechanismus mit Energiedissipation	114
Teilchen und Quasiteilchen	116
IV Felder	
§ 15 Körper und Feld als Grenzfälle des Teilchenbegriffs	119
Das Problem der Lokalisierbarkeit eines Teilchens	119
Die klassische Einteilung der Transporte in korpuskulare und feldartige	121
§ 16 Verschiebungsenergie	122
Energieänderungen und ihre mathematische Beschreibung. Kraft	123
Die Energieformen Bewegungs- und Verschiebungsenergie	124
Vorgänge mit Austausch allein von Bewegungs- und Verschiebungs- energie	127
Das Modell des statischen Feldes	129
§ 17 Die mathematische Beschreibung statischer Felder	130
Einteilung der statischen Felder in zwei Typen	130
Statische Felder vom ersten Typ	131

Statische Felder vom zweiten Typ	132
Physikalische Felder	133
Mathematische Felder	134
Gradientenfelder	136
Äquipotentialflächen	139
Konservative und nicht-konservative Kraftfelder	140
§ 18 Beispiele statischer Felder	142
Das homogene Gravitationsfeld	142
Gravitationsfeld eines punkttartigen Körpers	143
Coulomb-Feld	144
Die elastische Feder als Feld	145
§ 19 Die Bewegung von Körpern in statischen Feldern	146
Bewegungen	146
Energiebilanz bei Bewegungen	147
Impulsbilanz bei Bewegungen	148
Bewegungsgleichungen	149
Hamiltonsche Gleichungen	151
Integrale der Bewegung	152
§ 20 Spezielle Bewegungsgleichungen und ihre Lösungen	153
Bewegungsgleichungen eines Newtonschen Körpers im homogenen Kraftfeld	153
Bahnen eines Newtonschen Körpers im homogenen Kraftfeld	154
Relativistische Bewegung im homogenen Kraftfeld	157
Kepler-Problem	159
Kreisbahnen des Kepler-Problems	162
Allgemeine Bahnkurven eines Newtonschen Körpers beim Kepler-Problem	165
Der lineare harmonische Oszillator	168
Der 3-dimensionale harmonische Oszillator	171
Anwendungen des harmonischen Oszillators	174
Allgemeine Bedeutung des harmonischen Oszillators	176
Beispiele harmonischer Oszillatoren	179
§ 21 Bewegung eines elektrisch geladenen Körpers im Magnetfeld	181
Beschleunigung eines elektrisch geladenen Körpers in einem Magnetfeld	181
Die Funktion $E(\mathbf{P}, \mathbf{r})$ eines geladenen Körpers im Magnetfeld	182
Bewegungsgleichungen	184
Das Vektorpotential als Beschreibung des Magnetfeldes	185
Bahnen eines geladenen Körpers im homogenen Magnetfeld	186
Relativistische Bewegung im Magnetfeld	190
§ 22 Austausch und Transport von Energie und Impuls durch Felder	191
Energie- und Impulsbilanz eines statischen Feldes	191
Die elastische Feder als Modell für den Impulsaustausch und Impulstransport eines Feldes	194

Die statische Näherung eines Feldes	198
Der leere Raum als Zustand eines Feldes, Trägheitsfeld	199
§ 23 Zwei- und Mehrkörper-Probleme in statischer Näherung	201
Bewegungsgleichungen	201
Reduktion eines 2-Körper-Problems auf ein 1-Körper-Problem. Schwerpunkts- und Relativvariablen	204
2-Körper-Probleme mit Feldern vom ersten Typ	206
Modell eines 2-atomigen Moleküls	210
Modell eines gestreckten 3-atomigen Moleküls	211
Hauptachsentransformation	213
Lösung des Hauptachsenproblems	214
Eigenschwingungen	215
Virial-Theorem	221
Einige Folgerungen aus dem Virial-Theorem	223

V Drehimpuls

§ 24 „Natürliche“ Bewegungen. Translation und Rotation	225
Kinematik der Translation und Rotation	227
Polare und axiale Vektoren	229
§ 25 Der Drehimpuls	232
Allgemeine Eigenschaften des Drehimpulses	232
Bahndrehimpuls eines Körpers	232
Dynamische Auszeichnung eines Bezugspunkts, Rotations- symmetrische Felder	238
Bahndrehimpuls eines n-Körper-Systems	241
Bahndrehimpuls eines 2-Körper-Systems	242
Bahndrehimpuls eines n-Körper-Systems mit 2-Körper-Wechsel- wirkungen	244
Der gesamte Drehimpuls eines n-Körper-Systems	246
Austausch von Drehimpuls zwischen den Partnern eines 2-Körper-Systems	247
Der Spin	249
§ 26 Energie und Drehimpuls	251
Zerlegung einer Bewegung in Rotation und 1-dimensionale Bewegung (Schwingung)	251
Energie als Funktion des Drehimpulses	253
Energie eines rotierenden starren n-Körper-Systems	255
Die Komponenten des Trägheitstensors	256
Steinerscher Satz	260
Hauptträgheitsachsen	263
§ 27 Rotationsbewegungen eines starren Körpers	267
Rotation um eine vorgegebene Achse	267

Rollende Bewegung	268
Gehemmte Rotation. Rotationsschwingungen	269
Freie Rotation eines starren Körpers. Kreisel	273
Der Kreisel unter dem Einfluß eines Drehmomentes	279

VI Relativitätstheorie

§ 28 Bezugssysteme und Geometrie	283
§ 29 Der absolute Raum und die absolute Zeit Newtons	284
§ 30 Inertialsysteme und Relativitätsprinzip	285
Inertialsysteme	285
Relativitätsprinzip	286
Galilei-Transformation	287
§ 31 Nicht-inertiale Bezugssysteme	288
Newtons Unterscheidung zwischen „wahren“ Kräften und Trägheitskräften	288
Rotierende Bezugssysteme	289
Résumé der Newtonschen Auffassung	293
Historische Notiz zum Begriff des absoluten Raumes	293
Die dynamische Auffassung inertialer und nicht-inertialer Bezugssysteme	294
Das Foucault-Pendel	296
Kreiselkompaß	302
Die Funktion $E(\mathbf{P}, \mathbf{r})$ im rotierenden Bezugssystem	302
Larmor-Theorem	304
Atom im Magnetfeld. Zeeman-Effekt	305
§ 32 Trägheitsfeld und Äquivalenzprinzip	306
Beschleunigungsfelder	306
Äquivalenzprinzip	308
Lichtablenkung im Gravitationsfeld	310
Rotverschiebung im Gravitationsfeld	312
§ 33 Dynamische Beschreibung von Energietransporten in Beschleunigungsfeldern	313
Energiebilanz in Beschleunigungsfeldern	313
Der Newtonsche Grenzfall	315
Extrem relativistischer Grenzfall	315
§ 34 Zeitablauf gleicher physikalischer Vorgänge an verschiedenen Stellen im Gravitationsfeld	316
Uhren im Gravitationsfeld	316
Uhren bei beschleunigten Bewegungen. Zwillingsparadoxon	318
§ 35 Grenzgwindigkeit und Relativitätsprinzip	323

§ 36	Transformation von Energie, Impuls und Geschwindigkeit beim Übergang zwischen Inertialsystemen	324
§ 37	Lorentz-Transformation	327
§ 38	Relativität der Gleichzeitigkeit. Invariante und nicht-invariante Zeitordnung	329
§ 39	Zeitdehnung und Gestaltsänderung durch Bewegung	332
	Elimination der Retardierung. Transversaler Doppler-Effekt	332
	Auswirkungen des transversalen Doppler-Effekts	333
	Zeitdehnung infolge gradlinig-gleichförmiger Bewegung	337
	Einfluß der Gleichzeitigkeit auf die geometrische Gestalt	339
	Der Aufbau der Relativitätstheorie. Rückschau und Ausblick	342
§ 40	Raum-Zeit-Geometrie der Inertialsysteme	345
	Die Welt der Ereignisse	346
	Die Metrik der Raum-Zeit-Welt	350
§ 41	Wirkung eines Beschleunigungsfeldes auf die Raum-Zeit-Welt	354
	Gleichförmig beschleunigte Bewegung im Inertialsystem	355
	Trägheitsbewegungen in beliebigen Bezugssystemen	358
	Die Weltlinien des Lichts in nicht-inertialen Bezugssystemen	360
§ 42	Gravitationsfelder, die eine Krümmung der Raum-Zeit-Welt bewirken	362
	Der lokale Charakter der Inertialsysteme	362
	Die Krümmung der Raum-Zeit-Welt	364
	Planetenbewegung als geodätische Weltlinie	366
§ 43	Zusammenhang zwischen Krümmung und Verteilung von Energie und Impuls in der Welt	367
	Die Feldgleichungen des Newtonschen Gravitationsfeldes	368
	Die Einsteinschen Feldgleichungen	368
	Kosmologische Weltmodelle	369

VII Gravitation

§ 44	Newtons Gravitationstheorie	373
	Die Bewegung des Mondes als freier Fall	374
	Die Keplerschen Gesetze	376
	Kinematische Folgerungen aus den Keplerschen Gesetzen	377
	Newtons Gravitationsgesetz	377
	2-Körper-Problem	379
	Die potentielle Energie der Gravitationswechselwirkung	381
	Bestimmung der Masse von Himmelskörpern	383
	Hyperbelbewegungen	384

§ 45	Ausbau der Newtonschen Gravitationstheorie	385
	Gravitationsfeld einer gegebenen Massenverteilung	386
	Gravitationspotentiale einfacher Massenverteilungen	387
	Die Gravitationsenergie einer Massenverteilung	393
	Das n-Körper-Problem	393
§ 46	Deformationswirkung von Gravitationsfeldern auf ausgedehnte Körper (Gezeiten)	396
	Deformation eines Körpers im inhomogenen Gravitationsfeld	397
	Drehmoment als Folge eines inhomogenen Gravitationsfeldes	400
	Mathematische Beschreibung der Inhomogenität eines Gravitationsfeldes	401
	Gezeiten-Effekte	403
§ 47	Einsteins Theorie der Gravitation	406
	Gravitation als Raum-Zeit-Struktur	406
	Lichtablenkung im Gravitationsfeld	407
	Rot- und Violettverschiebung im Gravitationsfeld	409
	Periheldrehung des Merkur	411
	Laufzeitverzögerung elektromagnetischer Signale im Gravitationsfeld	411
	Gravitationsfeld eines rotierenden Körpers	412
	Ereignishorizont	413
	Endliche und unendliche Zeitintervalle zwischen Ereignispaaren	415
	Der radiale freie Fall im Schwarzschild-Feld	416
	Die Raum-Zeit-Welt eines frei fallenden Beobachters	419
	Schwarzes Loch. Gravitationskollaps	421
§ 48	Gravitationswellen	423
	Erzeugung	424
	Quellen und Nachweis	427
§ 49	Kosmologie	428
	Kosmologische Postulate	429
	Olbers' Paradoxon	429
	Die Expansion des Weltalls	432
	Die 3K-Weltraumstrahlung	434
	Astrophysikalische Daten	436
	Sachverzeichnis	438
	Naturkonstanten	
	Wichtige Einheiten	