

# Inhaltsverzeichnis

## I Einleitende Orientierung

<b>§ 1</b>	<b>Physikalische Größen</b>	1
	Größen als Mittel des quantitativen Vergleichens	1
	Anwendung auf die Welt als ganze	3
	Theorie und Wirklichkeit	4
<b>§ 2</b>	<b>Physik und Mathematik</b>	6
	Die physikalische Messung	7
	Mittelwert und quadratische Streuung	8
	Statistik der Einzelmessungen und Wahrscheinlichkeit	9
	Bessere und schlechtere Meßverfahren	12
	Der Fehler einer Messung	13
	Streuung und Fehler in der klassischen Physik	15
	Streuung und Fehler in der Quantenmechanik	17
	Das Instrument „Mathematik“	19
	Richtig und Falsch in der Physik	20
	Theorie und Mathematik	21
<b>§ 3</b>	<b>Kinematik und Dynamik</b>	22
	Die kinematische Beschreibung der Bewegung	22
	Unphysikalische Bewegungen	24
	Bewegung als Transport	25
<b>§ 4</b>	<b>Die Begriffe Impuls und Energie in ihrer historischen Entwicklung</b>	26
	Huygens' Untersuchungen zum elastischen Stoß	27
	Newtons Bewegungsgleichungen	29
	Newtons Prinzip der Gleichheit von actio und reactio	31
	Kinetische und potentielle Energie	32
	Ausdehnung des Energiebegriffs auf nicht-mechanische Vorgänge und Systeme	35
	Ausdehnung des Impulsbegriffs auf nicht-mechanische Systeme	36
	Bewegung als Energie-Impuls-Transport	37
	Heisenbergs Unschärferelationen	39

## II Impuls und Energie

§ 5	<b>Der Transport von Energie und Impuls</b>	41
	Transporte durch den leeren Raum	41
	Innere Energie, Ruhenergie	42
	Kinetische Energie	43
	Grenzgeschwindigkeit von Transporten	46
§ 6	<b>Der Begriff des Teilchens</b>	49
	Energie-Impuls-Zusammenhang eines Transports	49
	Die Funktion $E(P)$ für Transporte durch den leeren Raum bei beliebiger Geschwindigkeit	51
	Newtonsche Teilchen	53
	Extrem relativistische Teilchen	54
§ 7	<b>Die Messung des Impulses</b>	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	<b>Die Messung der Energie</b>	62
	Energiemessung als Operation des Vergleichens	62
	Verschiebungen	63
	Verschiebungsenergie im homogenen Gravitationsfeld	64
	Freier Fall im homogenen Gravitationsfeld	65
	Verschiebungsenergie beim Spannen einer elastischen Feder	69
	Einheiten der Energie	71

## III Stoßprozesse

§ 9	<b>Allgemeine Charakterisierung von Stoßprozessen</b>	73
	Wechselwirkung von Energie-Impuls-Transporten	73
	Impuls- und Energiebilanz zwischen Anfangs- und Endzustand	75
§ 10	<b>Schwerpunktssystem</b>	76
	Schwerpunktssystem eines Teilchens	76
	Schwerpunktssystem mehrerer Teilchen	77
	Stoßinvarianten	80
§ 11	<b>Der elastische Stoß</b>	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
<b>§ 12 Der inelastische Stoß . . . . .</b>	<b>95</b>
Energiebilanz . . . . .	95
Modell eines inelastischen Stoßes . . . . .	96
Der total inelastische Stoß . . . . .	97
Franck-Hertz-Versuch . . . . .	99
Paarerzeugung und Paarzerstrahlung . . . . .	100
Absorptionsprozesse für hochenergetische Photonen . . . . .	101
Emission eines Photons. Mößbauer-Effekt . . . . .	103
<b>§ 13 Teilchenreaktionen . . . . .</b>	<b>105</b>
Mikroskopische Reversibilität . . . . .	105
Reaktionsenergie und Schwellenergie . . . . .	106
Aktivierungsenergie . . . . .	107
Beispiel einer chemischen Reaktion . . . . .	107
Kernfusionsreaktionen . . . . .	109
Proton-Proton-Stoß . . . . .	110
<b>§ 14 Dissipative Energie-Impuls-Transporte . . . . .</b>	<b>112</b>
Energie-Impuls-Transport in Materie . . . . .	113
Modell eines Stoßmechanismus mit Energiedissipation . . . . .	114
Teilchen und Quasiteilchen . . . . .	116

IV Felder

<b>§ 15 Körper und Feld als Grenzfälle des Teilchenbegriffs . . . . .</b>	<b>119</b>
Das Problem der Lokalisierbarkeit eines Teilchens . . . . .	119
Die klassische Einteilung der Transporte in korpuskulare und feldartige . . . . .	121
<b>§ 16 Verschiebungsenergie . . . . .</b>	<b>122</b>
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
<b>§ 17 Die mathematische Beschreibung statischer Felder . . . . .</b>	<b>130</b>
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
<b>§ 18 Beispiele statischer Felder . . . . .</b>	<b>142</b>
Das homogene Gravitationsfeld . . . . .	142
Gravitationsfeld eines punkartigen Körpers . . . . .	143
Coulomb-Feld . . . . .	144
Die elastische Feder als Feld . . . . .	145
<b>§ 19 Die Bewegung von Körpern in statischen Feldern . . . . .</b>	<b>146</b>
Bewegungen . . . . .	146
Energiebilanz bei Bewegungen . . . . .	147
Impulsbilanz bei Bewegungen . . . . .	148
Bewegungsgleichungen . . . . .	149
Hamiltonsche Gleichungen . . . . .	151
<b>§ 20 Spezielle Bewegungsgleichungen und ihre Lösungen . . . . .</b>	<b>152</b>
Bewegungsgleichungen eines Newtonschen Körpers im homogenen Kraftfeld . . . . .	152
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
<b>§ 21 Bewegung eines elektrisch geladenen Körpers im Magnetfeld . . . . .</b>	<b>181</b>
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
<b>§ 22 Austausch und Transport von Energie und Impuls durch Felder . . . . .</b>	<b>191</b>
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
<b>§ 23 Zwei- und Mehrkörper-Probleme in statischer Näherung . . . . .</b>	<b>201</b>
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

<b>§ 24 „Natürliche“ Bewegungen. Translation und Rotation . . . . .</b>	<b>225</b>
Kinematik der Translation und Rotation . . . . .	227
Polare und axiale Vektoren . . . . .	229
<b>§ 25 Der Drehimpuls . . . . .</b>	<b>232</b>
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
<b>§ 26 Energie und Drehimpuls . . . . .</b>	<b>251</b>
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
<b>§ 27 Rotationsbewegungen eines starren Körpers . . . . .</b>	<b>267</b>
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 . . . . .	276

## VI Relativitätstheorie

§ 28 Bezugssysteme und Geometrie . . . . .	279
§ 29 Der absolute Raum und die absolute Zeit Newtons . . . . .	280
§ 30 Inertialsysteme und Relativitätsprinzip . . . . .	281
Inertialsysteme . . . . .	281
Relativitätsprinzip . . . . .	282
Galilei-Transformation . . . . .	283
§ 31 Nicht-inertiale Bezugssysteme . . . . .	284
Newtons Unterscheidung zwischen „wahren“ Kräften und Trägheitskräften . . . . .	284
Rotierende Bezugssysteme . . . . .	285
Résumé der Newtonschen Auffassung . . . . .	289
Historische Notiz zum Begriff des absoluten Raumes . . . . .	289
Das Foucault-Pendel . . . . .	290
Kreiselkompaß . . . . .	296
Die Funktion $E(\mathbf{P}, \mathbf{r})$ im rotierenden Bezugssystem . . . . .	296
Larmor-Theorem . . . . .	298
Atom im Magnetfeld. Zeeman-Effekt . . . . .	299
§ 32 Trägheitsfeld und Äquivalenzprinzip . . . . .	300
Beschleunigungsfelder . . . . .	300
Äquivalenzprinzip . . . . .	302
Lichtablenkung im Gravitationsfeld . . . . .	304
Rotverschiebung im Gravitationsfeld . . . . .	306
§ 33 Dynamische Beschreibung von Energietransporten in Beschleunigungsfeldern . . . . .	307
Energiebilanz in Beschleunigungsfeldern . . . . .	307
Der Newtonsche Grenzfall . . . . .	309
Extrem relativistischer Grenzfall . . . . .	309
§ 34 Zeitablauf gleicher physikalischer Vorgänge an verschiedenen Stellen im Gravitationsfeld . . . . .	310
Uhren im Gravitationsfeld . . . . .	310
Uhren bei beschleunigten Bewegungen. Zwillingsparadoxon . . . . .	312
§ 35 Grenzgeschwindigkeit und Relativitätsprinzip . . . . .	317

§ 36 Transformation von Energie, Impuls und Geschwindigkeit beim Übergang zwischen Inertialsystemen . . . . . 318

§ 37 Lorentz-Transformation . . . . . 321

§ 38 Relativität der Gleichzeitigkeit. Invariante und nicht-invariante Zeitordnung . . . . . 323

§ 39 Zeitdehnung und Gestaltsänderung durch Bewegung . . . . . 326

    Elimination der Retardierung. Transversaler Doppler-Effekt . . . . . 326

    Auswirkungen des transversalen Doppler-Effekts . . . . . 327

    Zeitdehnung infolge gradlinig-gleichförmiger Bewegung . . . . . 331

    Einfluß der Gleichzeitigkeit auf die geometrische Gestalt . . . . . 333

    Der Aufbau der Relativitätstheorie. Rückschau und Ausblick . . . . . 336

§ 40 Raum-Zeit-Geometrie der Inertialsysteme . . . . . 338

    Die Welt der Ereignisse . . . . . 339

    Die Metrik der Raum-Zeit-Welt . . . . . 343

§ 41 Wirkung eines Beschleunigungsfeldes auf die Raum-Zeit-Welt . . . . . 347

    Gleichförmig beschleunigte Bewegung im Inertialsystem . . . . . 348

    Trägheitsbewegungen in beliebigen Bezugssystemen . . . . . 351

    Die Weltlinien des Lichts in nicht-inertialen Bezugssystemen . . . . . 353

§ 42 Gravitationsfelder, die eine Krümmung der Raum-Zeit-Welt bewirken 355

    Der lokale Charakter der Inertialsysteme . . . . . 355

    Die Krümmung der Raum-Zeit-Welt . . . . . 357

    Planetenbewegung als geodätische Weltlinie . . . . . 359

§ 43 Zusammenhang zwischen Krümmung und Verteilung von Energie und Impuls in der Welt . . . . . 360

    Die Feldgleichungen des Newtonschen Gravitationsfeldes . . . . . 361

    Die Einsteinschen Feldgleichungen . . . . . 361

    Kosmologische Weltmodelle . . . . . 362

VII Gravitation

§ 44 Newtons Gravitationstheorie . . . . . 367

    Die Bewegung des Mondes als freier Fall . . . . . 368

    Die Keplerschen Gesetze . . . . . 370

    Kinematische Folgerungen aus den Keplerschen Gesetzen . . . . . 371

    Newtons Gravitationsgesetz . . . . . 371

    2-Körper-Problem . . . . . 373

    Die potentielle Energie der Gravitationswechselwirkung . . . . . 375

    Bestimmung der Masse von Himmelskörpern . . . . . 377

    Hyperbelbewegungen . . . . . 378

§ 45	<b>Ausbau der Newtonschen Gravitationstheorie</b>	379
	Gravitationsfeld einer gegebenen Massenverteilung	380
	Gravitationspotentiale einfacher Massenverteilungen	381
	Die Gravitationsenergie einer Massenverteilung	387
	Das n-Körper-Problem	387
§ 46	<b>Deformationswirkung von Gravitationsfeldern auf ausgedehnte Körper (Gezeiten)</b>	390
	Deformation eines Körpers im inhomogenen Gravitationsfeld	391
	Drehmoment als Folge eines inhomogenen Gravitationsfeldes	394
	Mathematische Beschreibung der Inhomogenität eines Gravitationsfeldes	395
	Gezeiten-Effekte	397
§ 47	<b>Einsteins Theorie der Gravitation</b>	400
	Gravitation als Raum-Zeit-Struktur	400
	Lichtablenkung im Gravitationsfeld	401
	Rot- und Violettverschiebung im Gravitationsfeld	403
	Periheldrehung des Merkur	405
	Laufzeitverzögerung elektromagnetischer Signale im Gravitationsfeld	405
	Gravitationsfeld eines rotierenden Körpers	406
	Ereignishorizont	407
	Endliche und unendliche Zeitintervalle zwischen Ereignispaaren	409
	Der radiale freie Fall im Schwarzschild-Feld	410
	Die Raum-Zeit-Welt eines frei fallenden Beobachters	413
	Schwarzes Loch. Gravitationskollaps	415
§ 48	<b>Gravitationswellen</b>	417
	Erzeugung	418
	Ausbreitung	421
	Nachweis	421
§ 49	<b>Kosmologie</b>	422
	Kosmologische Postulate	423
	Olbers' Paradoxon	423
	Die Expansion des Weltalls	426
	Die 3 K-Weltraumstrahlung	428
	<b>Astrophysikalische Daten</b>	430
	<b>Sachverzeichnis</b>	432
	<b>Naturkonstanten</b>	
	<b>Wichtige Einheiten</b>	