

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XV*

1	Vom absoluten Raum und von absoluter Zeit zur dynamischen Raumzeit: Ein Überblick	<i>1</i>
1.1	Definition, Beschreibung und Ursprünge der Relativitätstheorie	<i>1</i>
1.2	Die newtonschen Gesetze und Inertialsysteme	<i>6</i>
1.3	Die Galilei-Transformationen	<i>8</i>
1.4	Newtonsche Relativität	<i>9</i>
1.5	Einwände gegen den absoluten Raum; das machsche Prinzip	<i>10</i>
1.6	Der Äther	<i>12</i>
1.7	Michelson und Morley suchen den Äther	<i>13</i>
1.8	Die lorentzsche Äthertheorie	<i>14</i>
1.9	Die Ursprünge der Speziellen Relativitätstheorie	<i>16</i>
1.10	Weitere Unterstützung für Einsteins Postulate	<i>18</i>
1.11	Kosmologie und erste Zweifel an Inertialsystemen	<i>20</i>
1.12	Träge und schwere Masse	<i>22</i>
1.13	Das einsteinsche Äquivalenzprinzip	<i>24</i>
1.14	Eine Vorschau auf die Allgemeine Relativitätstheorie	<i>25</i>
1.15	Vorbehalte gegen das Äquivalenzprinzip	<i>29</i>
1.16	Die gravitative Frequenzverschiebung und Lichtablenkung	<i>31</i>
1.17	Aufgaben	<i>35</i>

Teil I Spezielle Relativitätstheorie *39*

2	Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie; die Lorentz-Transformationen	<i>41</i>
2.1	Über das Wesen physikalischer Theorien	<i>41</i>
2.2	Grundlegende Eigenschaften der Speziellen Relativitätstheorie	<i>42</i>
2.3	Relativistisches Lösen von Problemen	<i>45</i>
2.4	Die Relativität der Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation, und Längenkontraktion: eine Vorschau	<i>47</i>

- 2.5 Relativitätsprinzip und die Homogenität und Isotropie der Inertialsysteme 48
- 2.6 Das Koordinatengitter; Definitionen der Gleichzeitigkeit 50
- 2.7 Herleitung der Lorentz-Transformationen 53
- 2.8 Eigenschaften der Lorentz-Transformation 57
- 2.9 Grafische Darstellung der Lorentz-Transformation 60
- 2.10 Die relativistische Geschwindigkeitsgrenze 66
- 2.11 Welche Transformationen erlaubt das Relativitätsprinzip? 69
- 2.12 Aufgaben 70

- 3 Relativistische Kinematik 75**
- 3.1 Einleitung 75
- 3.2 Weltbild und Weltkarte 75
- 3.3 Längenkontraktion 76
- 3.4 Das Längenkontraktionsparadoxon 78
- 3.5 Zeitdilatation; das Zwillings-Paradoxon 79
- 3.6 Transformation der Geschwindigkeit; Relativ- und gegenseitige Geschwindigkeit 83
- 3.7 Transformation der Beschleunigung; Hyperbolische Bewegung 86
- 3.8 Starre Bewegung und der gleichmäßig beschleunigte Stab 87
- 3.9 Aufgaben 89

- 4 Relativistische Optik 95**
- 4.1 Einleitung 95
- 4.2 Der Mitführeffekt 95
- 4.3 Der Doppler-Effekt 96
- 4.4 Aberration 100
- 4.5 Die optische Erscheinung bewegter Objekte 101
- 4.6 Aufgaben 104

- 5 Raumzeit und Vierervektoren 109**
- 5.1 Die Entdeckung des Minkowski-Raums 109
- 5.2 3-dimensionale Minkowski-Diagramme 110
- 5.3 Lichtkegel und Intervalle 112
- 5.4 Dreiervektoren 115
- 5.5 Vierervektoren 118
- 5.6 Die Geometrie der Vierervektoren 123
- 5.7 Ebene Wellen 125
- 5.8 Aufgaben 128

- 6 Relativistische Teilchenmechanik 133**
- 6.1 Gültigkeitsbereich der newtonschen Mechanik 133
- 6.2 Die Axiome der neuen Mechanik 134
- 6.3 Die Äquivalenz von Masse und Energie 137
- 6.4 Viererimpuls-Identitäten 141

- 6.5 Relativistisches Billard 142
- 6.6 Das Zero-Impuls-System 143
- 6.7 Schwellwert-Energien 145
- 6.8 Lichtquanten und de-Broglie-Wellen 147
- 6.9 Der Compton-Effekt 149
- 6.10 Viererkraft und Dreierkraft 151
- 6.11 Aufgaben 154

- 7 Vierertensoren; Elektromagnetismus im Vakuum 161**
- 7.1 Tensoren: Einführende Gedanken und Notation 161
- 7.2 Tensoren: Definitionen und Eigenschaften 164
- 7.2.1 Definition der Tensoren 164
- 7.2.2 Drei grundlegende Tensoren 165
- 7.2.3 Die Gruppeneigenschaften 166
- 7.2.4 Tensoralgebra 166
- 7.2.5 Ableitung von Tensoren 168
- 7.2.6 Die Metrik 168
- 7.2.7 Vierertensoren 171
- 7.3 Die maxwellschen Gleichungen in Tensor-Form 172
- 7.4 Das Viererpotenzial 177
- 7.5 Transformation von \mathbf{e} und \mathbf{b} . Das duale Feld 179
- 7.6 Das Feld einer gleichförmig bewegten Punktladung 182
- 7.7 Das Feld eines unendlich langen, geraden Stroms 184
- 7.8 Der Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Felds 186
- 7.9 Von der Mechanik des Felds zur Kontinuumsmechanik 189
- 7.10 Aufgaben 192

Teil II Allgemeine Relativitätstheorie 201

- 8 Gekrümmte Räume und die grundlegenden Ideen der Allgemeinen Relativitätstheorie 203**
- 8.1 Gekrümmte Flächen 203
- 8.2 Gekrümmte Räume höherer Dimensionen 207
- 8.3 Riemannsche Räume 211
- 8.4 Ein Plan für die Allgemeine Relativitätstheorie 216
- 8.5 Aufgaben 220

- 9 Statische und stationäre Raumzeiten 225**
- 9.1 Das Koordinatengitter 225
- 9.2 Die Synchronisierung von Uhren 226
- 9.3 Erste Standardform der Metrik 229
- 9.4 Newtonsche Anhaltspunkte für das geodätische Bewegungsgesetz 231

- 9.5 Symmetrien und die geometrische Beschreibung statischer und stationärer Raumzeiten 234
- 9.6 Die kanonische Metrik und relativistische Potenziale 238
- 9.7 Das gleichförmig rotierende Gitter im Minkowski-Raum 242
- 9.8 Aufgaben 244

10 Geodäten, der Krümmungstensor und die Vakuumfeldgleichungen 247

- 10.1 Tensoren für die Allgemeine Relativitätstheorie 247
- 10.2 Geodäten 249
- 10.3 Geodätische Koordinaten 252
- 10.4 Kovariante und absolute Ableitung 255
- 10.5 Der riemannsche Krümmungstensor 262
- 10.6 Die einsteinschen Vakuumfeldgleichungen 267
- 10.7 Aufgaben 271

11 Die Schwarzschild-Metrik 277

- 11.1 Herleitung der Metrik 277
- 11.2 Eigenschaften der Metrik 279
 - 11.2.1 Feldstärke und die Bedeutung von m 279
 - 11.2.2 Das Birkhoff-Theorem 280
 - 11.2.3 Der Schwarzschild-Radius 281
- 11.3 Die Geometrie des Schwarzschild-Koordinatengitters 281
- 11.4 Beitrag der räumlichen Krümmung zu post-newtonschen Effekten 283
- 11.5 Koordinaten und Messungen 285
- 11.6 Die gravitative Frequenzverschiebung 287
- 11.7 Isotrope Metrik und die Shapiro-Verzögerung 287
- 11.8 Teilchenbahnen im Schwarzschild-Raum 288
- 11.9 Die Periheldrehung des Merkur 292
- 11.10 Photonenbahnen 296
- 11.11 Lichtablenkung an einer kugelsymmetrischen Masse 298
- 11.12 Gravitationslinsen 301
- 11.13 de-Sitter-Präzession mittels rotierender Koordinaten 304
- 11.14 Aufgaben 306

12 Schwarze Löcher und der Kruskal-Raum 311

- 12.1 Schwarzschildsche Schwarze Löcher 311
 - 12.1.1 Die Bildung von Horizonten 311
 - 12.1.2 Die Regularität des Horizonts 312
 - 12.1.3 Einlaufende Teilchen 313
 - 12.1.4 Die Nichtstatizität des inneren Schwarzschild-Raums 314
 - 12.1.5 Trichtergeometrie 315
 - 12.1.6 Die Bildung Schwarzer Löcher 316

- 12.2 Potenzielle Energie; ein allgemein-relativistischer ‚Beweis‘ von $E = mc^2$ 317
- 12.3 Die Fortsetzbarkeit der Schwarzschild-Raumzeit 319
- 12.4 Das gleichmäßig beschleunigte Gitter 322
- 12.5 Der Kruskal-Raum 326
- 12.6 Die Thermodynamik Schwarzer Löcher 333
- 12.7 Aufgaben 336

- 13 Eine analytisch exakte, ebene Gravitationswelle 341**
- 13.1 Einleitung 341
- 13.2 Die Metrik der ebenen Welle 341
- 13.3 Wenn die Welle auf Staub trifft 344
- 13.4 Inertialkoordinaten hinter der Welle 345
- 13.5 Wenn die Welle auf Licht trifft 348
- 13.6 Die Penrose-Topologie 349
- 13.7 Die Lösung der Feldgleichung 350
- 13.8 Aufgaben 352

- 14 Die vollständigen Feldgleichungen; der de-Sitter-Raum 355**
- 14.1 Die physikalischen Gesetze in der gekrümmten Raumzeit 355
- 14.2 Die vollständigen Feldgleichungen (endlich!) 358
- 14.3 Die kosmologische Konstante 363
- 14.4 Der modifizierte Schwarzschild-Raum 365
- 14.5 Der de-Sitter-Raum 366
- 14.6 Der Anti-de-Sitter-Raum 373
- 14.7 Aufgaben 375

- 15 Die linearisierte Allgemeine Relativitätstheorie 379**
- 15.1 Die Grundgleichungen 379
- 15.2 Gravitationswellen; die TT-Eichung 385
- 15.3 Die Physik ebener Wellen 387
- 15.4 Die Erzeugung und die Detektion von Gravitationswellen 392
- 15.5 Die elektromagnetische Analogie in der linearisierten ART 398
- 15.6 Aufgaben 405

- Teil III Kosmologie 409**

- 16 Kosmologische Raumzeiten 411**
- 16.1 Grundlagen 411
- 16.1.1 Einleitung 411
- 16.1.2 Die Regularität des Universums 411
- 16.1.3 Die Geschichte der modernen Kosmologie 412
- 16.1.4 Sterne und Galaxien 415
- 16.1.5 Homogenität und Isotropie 416

16.1.6	Kosmologischer Strahlungshintergrund	417
16.1.7	Die Hubble-Expansion	418
16.1.8	Der Urknall	419
16.1.9	Das Alter des Universums	420
16.1.10	Die kosmologische Konstante	421
16.1.11	Die Dichte des Universums	422
16.1.12	Kosmogense	424
16.2	Die Konstruktion des kosmologischen Modells	425
16.3	Das Milne-Universum	427
16.4	Die Friedmann-Robertson-Walker-Metrik	431
16.4.1	Einleitung	431
16.4.2	3-Metrien konstanter Krümmung	431
16.4.3	Die Friedmann-Robertson-Walker-Metrik	433
16.5	Der Satz von Robertson und Walker	436
16.6	Aufgaben	437
17	Lichtausbreitung in FRW-Universen	443
17.1	Repräsentation von FRW-Universen durch Subuniversen	443
17.2	Die kosmologische Frequenzverschiebung	445
17.3	Kosmologische Horizonte	446
17.4	Der <i>Apparent Horizon</i>	453
17.5	Observable	455
17.6	Aufgaben	460
18	Die Dynamik von FRW-Universen	465
18.1	Die Anwendung der Feldgleichungen	465
18.2	Was uns die Feldgleichungen sagen	467
18.2.1	Energieerhaltung	467
18.2.2	Die Friedmann-Gleichung	468
18.2.3	Die newtonsche Analogie	468
18.2.4	Druck	469
18.2.5	Der Energie-Impuls-Tensor des Vakuums	470
18.2.6	Universen mit mehreren Komponenten	471
18.3	Die Friedmann-Modelle	472
18.3.1	Einführung	472
18.3.2	Statische Modelle	473
18.3.3	Leere Modelle	474
18.3.4	Die drei nicht-leeren Modelle mit $\Lambda = 0$	476
18.3.5	Die nicht-leeren Modelle mit $\Lambda \neq 0$	479
18.4	Der Vergleich mit Beobachtungen	482
18.5	Inflation	487
18.6	Das anthropische Prinzip	492
18.7	Aufgaben	493

Anhang A Komponenten des Krümmungstensors
der Diagonalmetrik 497

Stichwortverzeichnis 501

