

Inhaltsverzeichnis

Vorwort *XV*

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

Teil I Spezielle Relativitätstheorie 39

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

- 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 Nichtstabilität 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 Kosmogenese 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-Metriken 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 *Apparent Horizon* 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

