

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** *XV*

<b>1</b>	<b>Vom absoluten Raum und von absoluter Zeit zur dynamischen Raumzeit: Ein Überblick</b>	<b>1</b>
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

<b>2</b>	<b>Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie; die Lorentz-Transformationen</b>	<b>41</b>
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
<b>3</b>	<b>Relativistische Kinematik</b>	<b>75</b>
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
<b>4</b>	<b>Relativistische Optik</b>	<b>95</b>
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
<b>5</b>	<b>Raumzeit und Vierervektoren</b>	<b>109</b>
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
<b>6</b>	<b>Relativistische Teilchenmechanik</b>	<b>133</b>
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	Viererkräft und Dreierkräft	151
6.11	Aufgaben	154
<b>7</b>	<b>Vierertensoren; Elektromagnetismus im Vakuum</b>	<b>161</b>
7.1	Tensoren: Einföhrende 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 maxwellischen 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

<b>8</b>	<b>Gekrümmte Räume und die grundlegenden Ideen der Allgemeinen Relativitätstheorie</b>	<b>203</b>
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
<b>9</b>	<b>Statische und stationäre Raumzeiten</b>	<b>225</b>
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
<b>10</b>	<b>Geodäten, der Krümmungstensor und die Vakuumfeldgleichungen</b>	<b>247</b>
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
<b>11</b>	<b>Die Schwarzschild-Metrik</b>	<b>277</b>
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
<b>12</b>	<b>Schwarze Löcher und der Kruskal-Raum</b>	<b>311</b>
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	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-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
<b>17</b>	<b>Lichtausbreitung in FRW-Universen</b>	<b>443</b>
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
<b>18</b>	<b>Die Dynamik von FRW-Universen</b>	<b>465</b>
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**