

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	<b>Newton'sche Mechanik</b>	<b>9</b>
1.1	Raum und Zeit . . . . .	10
1.2	Die Newton'schen Gesetze . . . . .	11
1.3	Koordinatensysteme . . . . .	13
1.4	Geschwindigkeit und Beschleunigung . . . . .	16
1.5	Galilei-Transformationen . . . . .	19
1.6	Nichtinertialsysteme und Scheinkräfte*	25
1.7	Zusammenfassung . . . . .	31
1.8	Verweise . . . . .	33
1.9	Aufgaben . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	<b>37</b>
2.1	Abändern der Galilei-Transformationen . . . . .	39
2.2	Längenkontraktion und Zeitdilatation . . . . .	44
2.3	Paradoxa . . . . .	50
2.4	Zusammenfassung . . . . .	58
2.5	Verweis . . . . .	59
2.6	Aufgaben . . . . .	60
<b>3</b>	<b>Mathematik der Speziellen Relativitätstheorie</b>	<b>63</b>
3.1	Der Minkowski-Raum . . . . .	63
3.2	Lorentztransformationen . . . . .	76
3.3	Tensoren im Minkowski-Raum . . . . .	79
3.4	Zusammenfassung . . . . .	92
3.5	Verweise . . . . .	95
3.6	Aufgaben . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Das Äquivalenzprinzip</b>	<b>101</b>
4.1	Frei fallende Beobachter . . . . .	102
4.2	Bewegungsgleichungen im Schwerefeld . . . . .	106
4.3	Die Metrik der Raumzeit . . . . .	107
4.4	Zusammenfassung . . . . .	117

4.5	Verweis . . . . .	118
4.6	Aufgaben . . . . .	119
<b>II</b>	<b>Geometrie</b>	<b>121</b>
<b>5</b>	<b>Tensorkalkül auf Mannigfaltigkeiten</b>	<b>123</b>
5.1	Mannigfaltigkeiten . . . . .	124
5.2	Tangentialvektoren . . . . .	130
5.3	Vektorfelder . . . . .	132
5.4	Tangentialvektoren als Ableitungsoperatoren . . . . .	134
5.5	Kovektoren und 1-Formen . . . . .	135
5.6	1-Formen als Kraftfelder . . . . .	138
5.7	Allgemeine Tensorfelder . . . . .	140
5.8	Zusammenfassung . . . . .	146
5.9	Verweise . . . . .	148
5.10	Aufgaben . . . . .	149
<b>6</b>	<b>Metriken und kovariante Ableitung</b>	<b>153</b>
6.1	Metriken . . . . .	153
6.2	Die kovariante Ableitung . . . . .	157
6.3	Paralleltransport . . . . .	163
6.4	Christoffel-Symbole und die Metrik . . . . .	167
6.5	Indexpositionen und Metrik . . . . .	168
6.6	Geodäten . . . . .	168
6.7	Minimale Kopplung* . . . . .	172
6.8	Zusammenfassung . . . . .	174
6.9	Verweis . . . . .	176
6.10	Aufgaben . . . . .	177
<b>7</b>	<b>Krümmung</b>	<b>179</b>
7.1	Der Riemannsche Krümmungstensor . . . . .	179
7.2	Symmetrien des Riemannschen Krümmungstensors . . . . .	181
7.3	Ricci-Tensor und Ricci-Skalar . . . . .	182
7.4	Krümmung und Paralleltransport . . . . .	186
7.5	Krümmung auf zweidimensionalen Räumen* . . . . .	188
7.6	Gezeitenkräfte in der ART* . . . . .	189
7.7	Zusammenfassung . . . . .	192
7.8	Verweise . . . . .	193
7.9	Aufgaben . . . . .	196
<b>8</b>	<b>Die Einstein-Gleichungen</b>	<b>199</b>
8.1	Feldgleichungen für die ART . . . . .	199

8.2	Herleitung des Einstein-Tensors . . . . .	202
8.3	Das Wirkungsprinzip der ART* . . . . .	208
8.4	Verweise . . . . .	223
8.5	Aufgaben . . . . .	225
<b>9</b>	<b>Symmetrien und Erhaltungssätze</b>	<b>227</b>
9.1	Diffeomorphismen* . . . . .	227
9.2	Vektorfelder und Flüsse* . . . . .	235
9.3	Killing-Vektorfelder* . . . . .	241
9.4	Metriken mit Symmetrien* . . . . .	243
9.5	Erhaltungsgrößen entlang von Geodäten* . . . . .	248
9.6	Zusammenfassung* . . . . .	251
9.7	Verweis* . . . . .	253
9.8	Aufgaben* . . . . .	254
<b>III</b>	<b>Anwendungen</b>	<b>257</b>
<b>10</b>	<b>Die Schwarzschild-Metrik</b>	<b>259</b>
10.1	Das Äußere einer kugelsymmetrischen Masseverteilung . . . . .	259
10.2	Bedeutung des Schwarzschild-Radius . . . . .	263
10.3	Rotverschiebung im Gravitationspotenzial . . . . .	267
10.4	Bewegung im rotationssymmetrischen Schwerkraftfeld . . . . .	269
10.5	Zusammenfassung . . . . .	278
10.6	Verweise . . . . .	280
10.7	Aufgaben . . . . .	284
<b>11</b>	<b>Kosmologie</b>	<b>287</b>
11.1	Das Universum beobachten . . . . .	287
11.2	FRW-Gleichungen . . . . .	291
11.3	Lösungen der FRW-Gleichungen . . . . .	294
11.4	Das Hubble-Gesetz . . . . .	299
11.5	Lichtausbreitung in FRW-Raumzeiten . . . . .	301
11.6	Horizonte . . . . .	304
11.7	Zusammenfassung . . . . .	308
11.8	Verweise . . . . .	310
<b>12</b>	<b>Gravitationswellen</b>	<b>317</b>
12.1	Lineare Näherung . . . . .	317
12.2	Koordinatentransformationen . . . . .	318
12.3	Lineare Feldgleichungen . . . . .	320
12.4	Die Lösung der Wellengleichung . . . . .	323
12.5	Gravitationswellen anschaulich . . . . .	327

12.6 Zusammenfassung . . . . .	331
12.7 Verweise . . . . .	333
12.8 Aufgaben . . . . .	335
<b>13 Tipps zu den Aufgaben</b>	<b>337</b>
13.1 Tipps zu Aufgaben Kapitel 1 . . . . .	337
13.2 Tipps zu Aufgaben Kapitel 2 . . . . .	340
13.3 Tipps zu Aufgaben Kapitel 3 . . . . .	341
13.4 Tipps zu Aufgaben Kapitel 4 . . . . .	343
13.5 Tipps zu Aufgaben Kapitel 5 . . . . .	345
13.6 Tipps zu Aufgaben Kapitel 6 . . . . .	347
13.7 Tipps zu Aufgaben Kapitel 7 . . . . .	349
13.8 Tipps zu Aufgaben Kapitel 8 . . . . .	350
13.9 Tipps zu Aufgaben Kapitel 9 . . . . .	352
13.10 Tipps zu Aufgaben Kapitel 10 . . . . .	353
13.11 Tipps zu Aufgaben Kapitel 11 . . . . .	354
13.12 Tipps zu Aufgaben Kapitel 12 . . . . .	356
<b>14 Lösungen zu den Aufgaben</b>	<b>359</b>
14.1 Lösungen der Aufgaben Kapitel 1 . . . . .	359
14.2 Lösungen der Aufgaben Kapitel 2 . . . . .	368
14.3 Lösungen der Aufgaben Kapitel 3 . . . . .	373
14.4 Lösungen der Aufgaben Kapitel 4 . . . . .	384
14.5 Lösungen der Aufgaben Kapitel 5 . . . . .	393
14.6 Lösungen der Aufgaben Kapitel 6 . . . . .	406
14.7 Lösungen der Aufgaben Kapitel 7 . . . . .	416
14.8 Lösungen der Aufgaben Kapitel 8 . . . . .	424
14.9 Lösungen der Aufgaben Kapitel 9 . . . . .	429
14.10 Lösungen der Aufgaben Kapitel 10 . . . . .	436
14.11 Lösungen der Aufgaben Kapitel 11 . . . . .	447
14.12 Lösungen der Aufgaben Kapitel 12 . . . . .	456
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>461</b>