

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
	Begegnung	2
Teil I Konzepte		
2	Raum und Trägheit	7
	Raum und Zeit	13
	Philosophische Fallstricke?	13
	Nahwirkungsprinzip	15
	Drei Welten	17
	Was kennzeichnet ein Objekt?	20
	Bewegung in der Newton'schen Raumzeit	21
	Die Geschwindigkeit	23
	Koordinatensysteme	24
	Vektoren	25
	Koordinatentransformationen	26
	Invarianten	27
	Inertialsysteme	28
3	Gekrümmte Räume	31
	Der gekrümmte Raum	36
	Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten ist (k)eine Gerade	37
	Parallelen	40
		VII

VIII Inhaltsverzeichnis

Winkelsumme	41
Rechtecke	42
Überschussradius	43
Paralleltransport	44
Lokal ist der Raum flach	46
Einbettungen sind unnötig	47
4 Beschleunigungen und Kräfte	51
Beschleunigung	55
Kräfte	56
Die Impulserhaltung	59
5 Energie	63
Energie und Arbeit	69
Energieerhaltung	71
Erweiterungen des Energiebegriffs	72
Das Noether-Theorem	76
6 Geodäten	79
Beschleunigungen und Kräfte	86
Gekrümmte Räume	88
Mehr über Koordinatensysteme	88
Karten und Koordinaten	91
Die kürzeste Verbindung zwischen zwei Punkten	92
Die Metrik	96
Koordinatenbeschleunigungen	98
Geschwindigkeit und Koordinatenbeschleunigung	100
Abweichung benachbarter Geodäten	102
Nicht-geodätische Bewegung	103
Die Wahl des Koordinatensystems	104

Fragen

Teil II Komplikationen

7 Relativität	113
Elektromagnetismus	117
Die spezielle Relativitätstheorie	119
Die Lichtgeschwindigkeit in Medien	120

Ist die Spezielle Relativitätstheorie eine Theorie des Elektromagnetismus?	121
Das Ende der Newton'schen Physik	122
8 Lichtgeschwindigkeit	125
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	132
Zeitdilatation	132
Längenkontraktion	136
Gleichzeitigkeit	138
Kausalität	140
Überlichtgeschwindigkeit	141
Scheinbare Überlichtgeschwindigkeit	142
Geschwindigkeitsaddition	143
Die Gültigkeit der SRT	144
9 Raumzeit	149
Raumzeit-Diagramme	159
Vierervektoren	164
Abstand und Eigenzeit	166
Seltsame Abstände	169
Verwirrende Einheiten	171
Zwillingsparadoxon	171
10 Bewegung in der Raumzeit	175
Das Prinzip der maximalen Eigenzeit	186
Die Vierergeschwindigkeit	189
Die „Geometrisierung“ der Physik	192
Der Viererimpuls	195
$E = mc^2$	195
Masse und Bewegungsenergie	198
Wie beweist man $E = mc^2$?	202
Illusion	
Teil III Konstruktionen	
11 Freier Fall	211
Die Allgemeine Relativitätstheorie	220
Das Äquivalenzprinzip	221
„Gerade Wege“ in der Raumzeit	222

X	Inhaltsverzeichnis	
	Die Wurfparabel	223
	Die Raumzeit ist gekrümmt	227
	Lokal ist die Raumzeit flach	230
	Weltlinien im freien Fall	231
	Oberflächlich betrachtet	232
	Es gibt keine Schwerkraft	234
	Scheinkraft, Koordinatenbeschleunigung oder Kraft	235
12	Die gekrümmte Raumzeit	237
	Die Krümmung des Raums	241
	Überschussradius	243
	Das leidige Gummituch	245
	Raumartige Geodäten	246
	Beschleunigung langsamer Objekte	247
	Lichtablenkung	249
	Geodäten im Raum	250
	Das Bestiarium der Krümmungsmaße	252
	Die Raumzeit ist torsionsfrei	253
	Die Metrik	253
	Der Riemann'sche Krümmungstensor	255
	Benachbarte Geodäten	257
	Der Ricci-Tensor	258
	Der Einstein-Tensor	261
	Der Weyl-Tensor	262
13	Energie, Impuls und Strom	265
	Was ist die Quelle der Raumzeit-Krümmung?	270
	Die Dichte	271
	Masse oder Energie?	272
	Die Energie in unterschiedlichen Bezugssystemen	273
	Ströme	274
	Der Energie-Impuls-Tensor	275
	Impulsstrom und Spannung	276
	Gravitomagnetismus	280
	Energie-Impuls-Tensor und Erhaltungssätze	281
14	Die Einstein-Gleichung	283
	Die Einstein-Gleichung	288
	Erhaltungssätze und Einstein-Gleichung	290
	Wie stark krümmt Materie die Raumzeit?	291
	Ist Gleiches wirklich gleich?	293

Was bedeutet die Einstein-Gleichung?	294
Die Einstein-Gleichung ist dynamisch	295
Materie in der gekrümmten Raumzeit	296
Die Energie des Gravitationsfelds	298
Ist die Gravitation selbst eine Quelle der Gravitation?	299
Raumzeit und Abstraktion	301

Lenkung

Teil IV Konsequenzen

15 Sterne und Planeten	315
Symmetrische Lösungen	321
Koordinaten	322
Die Schwarzschild-Metrik	324
Die innere Metrik	326
Die Masse in der Schwarzschild-Raumzeit	329
Planetenbahnen	330
Die Periheldrehung des Merkur	331
Lichtablenkung	334
Gezeitenkräfte	336
16 Schwarze Löcher	339
Der Weg zum Schwarzen Loch	345
Schwarze Löcher sind unausweichlich	346
Der Ereignishorizont	348
Sturz ins Innere des Schwarzen Lochs	351
Experimente am Ereignishorizont	352
Stürzender Raum	354
Bahnen um Schwarze Löcher	355
Rotation	357
17 Gravitationswellen	363
Wie Gravitationswellen den Raum verzerren	369
Beschleunigungen durch eine Gravitationswelle	373
Erzeugung von Gravitationswellen	375
Messung von Gravitationswellen	377
Wechselwirkung von Gravitationswellen	379

Erkenntnis

Teil V Konflikte

18	Wurmlöcher und Zeitreisen	389
	Wurmlöcher	394
	Exotische Materie	396
	Ist exotische Materie möglich?	397
	Wurmloch-Typen	399
	Erzeugung von Wurmlöchern	400
	Zeitmaschinen	401
	Überlichtschnelles Reisen	404
19	Die Ausdehnung des Universums	405
	Das homogene Universum	412
	Die Einstein-Gleichung im homogenen Universum	413
	Das Universum dehnt sich aus	415
	Skalenfaktor und Hubble-Parameter	417
	Die Rotverschiebung	420
	Hintergrundstrahlung	422
	Die Krümmung des Universums	423
	Die Evolution des Universums	425
	Die kosmologische Konstante	428
	Probleme des Urknalls	431
	Expansion und Materie	432
20	Schwerkraft oder Raumzeit-Krümmung?	435
	Die Schwerkraft	438
	Wie wirkt die Gravitation?	439
	Träge und schwere Masse	441
	Feld und potentielle Energie	441
	Das Äquivalenzprinzip	443
	Können Kräfte die Raumzeit krümmen?	444
	Kraft oder Raumzeit-Krümmung?	446
21	Quanten und Gravitation	447
	Der Weg zur Quantenmechanik	457
	Quantenmechanische Zustände	458
	Die Wellenfunktion	460

Messproblem und Kollaps	461
Unterschiedliche Zustände	462
Unschärfe	464
Quantenfelder	466
Das Vakuum	467
Teilchen	468
Wechselwirkung von Teilchen	470
Hawking-Strahlung	471
Quantisierung der Gravitation	474
Gravitonen	475
Mögliche Lösungen	477
Fazit	480
Rebellion	
Anhang A: Notation	491
Anhang B: Anmerkungen	493
Glossar	535
Literatur	541
Personenverzeichnis	547
Sachverzeichnis	549