

# Kurzinhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	<b>1</b>
1	Einführung in die SRT	3
2	Entwicklung und Grundprinzipien der SRT	4
3	Relativistische Kinematik	18
4	Relativistische Mechanik	74
5	Relativistische Formulierung der Elektrodynamik	120
6	Beschleunigte Bezugssysteme in der SRT	156
<b>II</b>	<b>Allgemeine Relativitätstheorie</b>	<b>159</b>
7	Einführung in die ART	161
8	Geometrische und physikalische Grundlagen der ART	165
9	Mathematische Grundlagen der ART	200
10	Physikalische Grundgesetze in der ART	241
11	Einfache Anwendungen der ART	292
12	Linearisierte Feldgleichungen und Gravitationswellen	326
13	Radialsymmetrische Lösungen der Feldgleichungen mit Materie	337
<b>III</b>	<b>Einführung in die Kosmologie</b>	<b>367</b>
14	Einführung	369
15	Newton- und SRT-Kosmologie	385
16	Mathematische Grundlagen der ART-Kosmologie	404
17	Kosmographie	428
18	Hydro-, Thermo- und Elektrodynamik des kosmischen Substrats	449
19	Grundgleichungen und Lösungsmannigfaltigkeit	468
20	Auswahl realistischer Weltmodelle	489
21	Frühes Universum und Umwandlungsprozesse im kosmischen Substrat	517

<b>22</b>	<b>Nicht expandierende Objekte</b>	<b>528</b>
<b>23</b>	<b>Kosmische Inflation</b>	<b>537</b>
<b>24</b>	<b>Kausale Struktur des Universums</b>	<b>572</b>
	<b>Sachregister</b>	<b>591</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>603</b>

# Inhaltsverzeichnis

<b>I</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einführung in die SRT</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Entwicklung und Grundprinzipien der SRT</b>	<b>4</b>
2.1	Äthertheorie . . . . .	4
2.2	Relativitätspostulat und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	10
2.3	Raum-Zeit-Struktur der SRT . . . . .	12
2.4	Synchronisation von Uhren . . . . .	14
2.5	Konsequenzen aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	15
2.5.1	Relativität der Gleichzeitigkeit . . . . .	15
2.5.2	Relativität und Messung von Längen . . . . .	16
Aufgaben	. . . . .	17
<b>3</b>	<b>Relativistische Kinematik</b>	<b>18</b>
3.1	Lorentz-Transformation . . . . .	18
3.1.1	Affinität der Transformation . . . . .	19
3.1.2	Standardkonfiguration . . . . .	21
3.1.3	Lorentz-Transformation für Systeme in Standardkonfiguration .	22
3.1.4	Eigentliche Lorentz-Transformation . . . . .	27
3.1.5	Eigenschaften der Lorentz-Transformation . . . . .	28
3.1.6	$c$ als Maximalgeschwindigkeit und Kausalitätsprinzip . . . . .	29
3.1.7	Transformation von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	31
3.2	Lorentz-Kontraktion . . . . .	35
3.2.1	Fotografische Momentaufnahmen schnell bewegter Körper . .	37
3.3	Zeitdilatation . . . . .	42
3.3.1	Theoretische Ableitung . . . . .	42
3.3.2	Experimenteller Nachweis . . . . .	43
3.3.3	Direkt beobachtbare Zeitveränderungen . . . . .	46
3.4	Minkowski-Diagramme . . . . .	47
3.4.1	Lorentz-Kontraktion und Zeitdilatation . . . . .	48
3.4.2	Lichtkegel, Vergangenheit und Zukunft . . . . .	49
3.5	Kinematische Paradoxa . . . . .	51
3.5.1	Garagenparadoxon . . . . .	52
3.5.2	Skifahrerparadoxon . . . . .	53
3.5.3	Zwillingsparadoxon . . . . .	55

3.6	Vektoren und Tensoren in der vierdimensionalen Raum-Zeit . . . . .	60
3.6.1	Koordinatenabhängige Definition von Tensoren . . . . .	60
3.6.2	Metrik, Skalarprodukt, Heben und Senken von Indizes . . . . .	64
3.6.3	Sätze über Tensoren und Lorentz-Transformation . . . . .	67
	Exkurs 3.1: Zusammenhang zwischen koordinatenab- und unabhängig- iger Formulierung der Tensorrechnung . . . . .	70
Aufgaben	. . . . .	72
<b>4</b>	<b>Relativistische Mechanik</b>	<b>74</b>
4.1	Vorbetrachtungen . . . . .	74
4.1.1	Zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse . . . . .	74
4.1.2	Äquivalenz von Masse und Energie . . . . .	76
4.2	Vierervektoren der Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft . . . . .	76
4.3	Relativistische Bewegungsgleichung eines einzelnen Massenpunktes . .	79
4.4	Relativistische Bewegungsgleichungen für Systeme von Massenpunkten	82
4.4.1	Zweierstöße . . . . .	83
4.4.2	Inelastische Stöße mit Teilchenerzeugung und -vernichtung . . . . .	86
4.5	Relativistische kinetische Energie und Energie-Masse-Äquivalenz . . . . .	88
4.6	Photonenmasse . . . . .	90
4.7	Äquivalenz von träger und schwerer Masse . . . . .	91
4.8	Tachyonen . . . . .	92
4.9	Energie-Impuls-Tensor . . . . .	93
4.9.1	Einzelner Massenpunkt . . . . .	93
4.9.2	System von Massenpunkten . . . . .	95
	Exkurs 4.1: Plädoyer für die bewegte Masse . . . . .	96
4.10	Lagrange- und Hamilton-Formulierung der Bewegungsgleichung . . . . .	97
4.10.1	Systemabhängige Formulierung . . . . .	97
4.10.2	Invariante Formulierung . . . . .	99
4.11	Spezielle Probleme . . . . .	103
4.11.1	Relativistische Weltraumfahrt . . . . .	103
4.11.2	Lösung der Gleichungen für den elastischen Stoß . . . . .	105
4.11.3	Schwellenenergie bei inelastischen Stößen . . . . .	112
4.12	Mechanik idealer Flüssigkeiten . . . . .	114
4.12.1	Druckfreie Flüssigkeiten . . . . .	114
4.12.2	Flüssigkeiten mit isotropem Druck . . . . .	116
Aufgaben	. . . . .	118
<b>5</b>	<b>Relativistische Formulierung der Elektrodynamik</b>	<b>120</b>
5.1	Kovariante Formulierung der Maxwell-Gleichungen . . . . .	120
5.2	Transformation der elektromagnetischen Feldgrößen . . . . .	123
5.2.1	Transformation von $E$ , $B$ , $\varrho_{\text{el}}$ und $j$ . . . . .	123
5.2.2	Transformationsinvarianten . . . . .	124
5.3	Maxwell-Gleichungen und Ohmsches Gesetz in Materie . . . . .	126
5.4	Kovariante Darstellung avancierter und retardierter Potentiale . . . . .	127
5.5	Potentiale und Felder einer beschleunigten Punktladung . . . . .	129
5.6	Teilchenbewegung im elektromagnetischen Feld . . . . .	132

5.7	Energie- und Impulserhaltung . . . . .	136
5.8	Elektromagnetische Theorie des Elektrons . . . . .	137
5.9	Doppler-Verschiebung und Aberration . . . . .	139
5.10	Strahlungsprobleme bei der Bewegung geladener Teilchen . . . . .	141
5.10.1	Energie- und Impulsabgabe eines strahlenden Teilchens . . . . .	142
5.11	Lorentz-Dirac-Gleichung . . . . .	145
5.11.1	Heuristische Ableitung . . . . .	145
	Exkurs 5.1: Skizze der Diracschen Ableitung . . . . .	147
5.11.2	Eigenschaften der Lorentz-Dirac-Gleichung . . . . .	148
5.11.3	Lösung mit Strahlung und ohne Strahlungsreaktion . . . . .	151
	Aufgaben . . . . .	154
<b>6</b>	<b>Beschleunigte Bezugssysteme in der SRT</b>	<b>156</b>
<b>II</b>	<b>Allgemeine Relativitätstheorie</b>	<b>159</b>
<b>7</b>	<b>Einführung in die ART</b>	<b>161</b>
	Aufgaben . . . . .	164
<b>8</b>	<b>Geometrische und physikalische Grundlagen der ART</b>	<b>165</b>
8.1	Geometrische Grundlagen . . . . .	165
8.1.1	Gaußsche Geometrie gekrümmter Flächen . . . . .	166
8.1.2	Riemannsche Geometrie . . . . .	169
8.1.3	Finsler-Geometrie . . . . .	170
8.2	Geometrie und physikalische Raum-Zeit . . . . .	174
8.2.1	Eigenschaften der Raum-Zeit . . . . .	174
8.2.2	Realisierung räumlicher und zeitlicher Koordinaten . . . . .	175
8.3	Relativitätsprinzipien, Machsches Prinzip und Äquivalenzprinzip . . . . .	178
8.3.1	Relativitätsprinzip der Newtonschen Theorie . . . . .	178
8.3.2	Relativitätsprinzip der SRT . . . . .	179
8.3.3	Machsches Prinzip . . . . .	179
8.3.4	Äquivalenzprinzip . . . . .	182
8.4	Folgerungen aus dem Äquivalenzprinzip . . . . .	188
8.4.1	Metrik der ART . . . . .	188
8.4.2	Relativitätsprinzip der ART . . . . .	196
8.5	Grundlagen der Gravitationstheorie . . . . .	197
8.6	ART und Machsches Prinzip . . . . .	199
	Aufgaben . . . . .	199
<b>9</b>	<b>Mathematische Grundlagen der ART</b>	<b>200</b>
9.1	Koordinatenabhängige Definition von Vektoren und Tensoren . . . . .	200
9.2	Tensoralgebra . . . . .	203
9.2.1	Invarianz von Symmetrien . . . . .	204
9.2.2	Übertragung von Symmetrien . . . . .	204
9.2.3	Quotientenkriterium . . . . .	204

9.2.4	Folgerungen aus dem Quotientenkriterium . . . . .	205
9.2.5	Spezielle Tensoren . . . . .	205
9.2.6	Heben und Senken von Indizes, Skalarprodukt . . . . .	206
9.2.7	Eigenschaften des metrischen Tensors $g_{\mu\nu}$ . . . . .	207
9.2.8	Orthogonale, zeitorthogonale und synchrone Koordinaten . . . . .	208
9.2.9	Skalare und tensorielle Dichten . . . . .	210
9.3	Tensoranalysis . . . . .	211
9.3.1	Kovariante Ableitung . . . . .	211
9.3.2	Parallelität im Kleinen und Paralleltransport . . . . .	215
9.3.3	Skalarprodukt und Paralleltransport . . . . .	216
9.3.4	Anschauliche Deutung der kovarianten Ableitung . . . . .	216
9.3.5	Zusammenhang zwischen $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ und $g_{\mu\nu}$ . . . . .	217
9.3.6	Kovariante Rotation . . . . .	218
9.3.7	Kovariante Divergenz von Vektoren und Gaußscher Satz . . . . .	218
9.3.8	Kovariante Ableitung von Tensoren . . . . .	220
9.4	Geodätische Linien . . . . .	220
9.5	Krümmungstensor . . . . .	222
9.5.1	Paralleltransport auf geschlossenen Kurven . . . . .	224
9.5.2	Global pseudo-euklidischer Raum . . . . .	226
9.5.3	Eigenschaften des Krümmungstensors . . . . .	228
9.5.4	Ricci-Tensor und Krümmungsskalar . . . . .	229
9.6	Formulierung von Naturgesetzen mit Hilfe von Tensoren . . . . .	230
	Exkurs 9.1: Koordinatenunabhängige Einführung von Vektoren und Tensoren . . . . .	231
	Aufgaben . . . . .	239
<b>10</b>	<b>Physikalische Grundgesetze in der ART</b>	<b>241</b>
10.1	Messung von Zeiten und Längen in der ART . . . . .	241
10.1.1	Messung in Nichtinertialsystemen . . . . .	242
10.1.2	Endliche Eigenzeitintervalle . . . . .	250
10.2	Mechanik . . . . .	251
10.2.1	Bewegungsgleichung für Massenpunkte . . . . .	251
10.2.2	Physikalische Impulse und Geschwindigkeiten . . . . .	253
10.2.3	Newton'scher Grenzfall für Einzelteilchen im Schwerefeld . . . . .	254
10.2.4	Erhaltungssätze beim freien Fall . . . . .	255
10.2.5	Relativbewegung im inhomogenen Schwerefeld . . . . .	256
10.2.6	Mechanik idealer Flüssigkeiten . . . . .	258
10.3	Elektrodynamik . . . . .	258
10.3.1	Maxwell-Gleichungen der ART . . . . .	258
10.3.2	Ladungserhaltung . . . . .	260
10.4	Kopplung von Mechanik und Elektrodynamik . . . . .	261
10.5	Lorentz-Dirac-Gleichung der ART . . . . .	264
10.6	Einstinsche Feldgleichungen im Vakuum . . . . .	266
10.7	Einstinsche Feldgleichungen mit Materie . . . . .	267
10.7.1	Freiheiten bei der Lösung der Feldgleichungen . . . . .	271
10.8	Materietensor für ein System geladener Punktteilchen . . . . .	273

10.9	Hilbertsches Variationsprinzip . . . . .	274
10.10	Energie des Gravitationsfeldes in der Newton-Theorie . . . . .	276
10.10.1	Reine Newton-Theorie . . . . .	277
10.10.2	Speziellrelativistisch modifizierte Newton-Theorie . . . . .	277
10.11	Energie-Impuls-Komplex . . . . .	282
10.11.1	Lokale und globale Erhaltungssätze . . . . .	285
10.11.2	Definition von Massen und Feldenergien. . . . .	289
10.12	Symmetrie und Erhaltungssätze . . . . .	289
	Exkurs 10.1: Ungeladene Teilchen in inhomogenen Schwerefeldern* . .	290
	Aufgaben . . . . .	291
<b>11</b>	<b>Einfache Anwendungen der ART</b>	<b>292</b>
11.1	Schwarzschild-Lösung . . . . .	292
11.1.1	Allgemeine Metrik mit räumlicher Kugelsymmetrie . . . . .	292
11.1.2	Christoffel-Symbole und Ricci-Tensor bei Kugelsymmetrie . .	294
11.1.3	Lösung der Vakuum-Feldgleichungen . . . . .	296
11.1.4	Kruskal-Form der Schwarzschild-Metrik . . . . .	300
11.2	Bewegung eines Punktteilchens im Schwarzschild-Feld . . . . .	303
11.2.1	Periheldrehung gebundener Bahnen . . . . .	305
11.2.2	Eigenzeit in einem Satelliten . . . . .	307
11.2.3	Freier Fall in radialer Richtung . . . . .	308
11.2.4	Schwerebeschleunigung im Schwarzschild-Feld . . . . .	313
11.3	Ausbreitung von Licht im Schwarzschild-Feld . . . . .	314
11.3.1	Grundgleichungen . . . . .	314
11.3.2	Lichtablenkung . . . . .	316
11.3.3	Gravitationslinsen . . . . .	319
11.3.4	Einfang von Licht . . . . .	320
11.4	Rotverschiebung von Spektrallinien im Gravitationsfeld . . . . .	322
11.4.1	Beobachtung von Unter- und Überlichtgeschwindigkeiten . .	324
	Aufgaben . . . . .	325
<b>12</b>	<b>Linearisierte Feldgleichungen und Gravitationswellen</b>	<b>326</b>
12.1	Linearisierung der Feldgleichungen . . . . .	326
12.2	Lösung der inhomogenen Gravitationswellengleichung . . . . .	329
12.3	Ebene Gravitationswellen . . . . .	330
12.4	Zur Energie von Gravitationswellen . . . . .	331
12.5	Wirkung von Gravitationswellen auf Probeteilchen . . . . .	333
12.6	Experimente zum Nachweis von Gravitationswellen . . . . .	334
12.7	Existenz und indirekter Nachweis von Gravitationswellen . . . . .	335
	Aufgaben . . . . .	336
<b>13</b>	<b>Radialsymmetrische Lösungen der Feldgleichungen mit Materie</b>	<b>337</b>
13.1	Sterngleichgewicht . . . . .	339
13.1.1	Gleichungen für statisches Gleichgewicht . . . . .	339
13.1.2	Gleichgewichtslösung für konstante Dichte . . . . .	342
13.1.3	Massendefekt . . . . .	343

13.1.4	Energie-Komplex und Gravitationsfeldenergie des Sterns* . . . . .	345
13.1.5	Neudefinition der Bestandteile des Energie-Impuls-Komplexes* . . . . .	351
13.2	Kugelsymmetrischer Gravitationskollaps . . . . .	353
13.2.1	Übergang zu mitbewegten Koordinaten . . . . .	353
13.2.2	Feldgleichungen für den Kollaps eines druckfreien Gases konstanter Dichte . . . . .	354
13.2.3	Lösung der Feldgleichungen . . . . .	355
	Exkurs 13.1: Energiekomplex kollabierender Sterne und Energie des Gravitationsfeldes* . . . . .	360
13.3	Schwarze Löcher . . . . .	362
13.3.1	Hawking-Strahlung schwarzer Löcher . . . . .	365
	Aufgaben . . . . .	366
<b>III</b>	<b>Einführung in die Kosmologie</b>	<b>367</b>
<b>14</b>	<b>Einführung</b>	<b>369</b>
14.1	Historischer Rückblick . . . . .	371
14.2	Zur empirischen Struktur des Universums . . . . .	378
<b>15</b>	<b>Newton- und SRT-Kosmologie</b>	<b>385</b>
15.1	Newtonscche und pseudo-Newtonscche Kosmologie . . . . .	385
15.1.1	Grundgleichungen und Hubblesches Expansionsgesetz . . . . .	385
15.1.2	Übergang zu mitbewegten Koordinaten . . . . .	389
15.1.3	Ableitung der kosmologischen Gleichungen in mitgeführten Koordinaten . . . . .	390
15.1.4	Interpretation und Gültigkeitsgrenzen . . . . .	391
15.1.5	Kosmologische Kraft . . . . .	392
15.1.6	Kosmologische Gleichungen mit kosmologischer Kraft . . . . .	394
15.1.7	Statische Lösung . . . . .	396
15.1.8	Stationäre Lösung . . . . .	397
15.1.9	Rein Newtonscche Lösungen mit Urknall . . . . .	398
15.2	SRT-Modell von Milne . . . . .	399
	Aufgaben . . . . .	402
<b>16</b>	<b>Mathematische Grundlagen der ART-Kosmologie</b>	<b>404</b>
16.1	Symmetrische Räume, Bewegungsgruppen und Killing-Vektoren . . . . .	404
16.2	Homogenität, Isotropie und maximale Symmetrie . . . . .	408
16.3	Metrik maximal symmetrischer Räume . . . . .	414
16.3.1	Raumartige Räume maximaler Symmetrie . . . . .	415
16.3.2	Maximal symmetrische Raum-Zeit . . . . .	416
16.3.3	Homogenität und Isotropie in einem Unterraum . . . . .	417
16.3.4	Räumlich homogene und isotrope Raum-Zeit . . . . .	418
16.4	Maximal forminvariante Tensoren in maximal symmetrischen Räumen .	421
	Aufgaben . . . . .	423

<b>17 Kosmographie</b>	<b>428</b>
17.1 Kosmologisches Prinzip und Robertson-Walker-Metrik . . . . .	428
17.2 Abstands- und Zeitmessung . . . . .	430
17.3 Expansion und Kontraktion des Weltalls . . . . .	432
17.4 Teilchen- und Ereignishorizont . . . . .	434
17.5 Bewegung von Teilchen . . . . .	438
17.6 Rotverschiebung . . . . .	439
17.6.1 Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Ort bzw. Zeit der Lichtemission . . . . .	441
17.7 Zum Olbersschen Paradoxon . . . . .	445
Aufgaben . . . . .	447
<b>18 Hydro-, Thermo- und Elektrodynamik des kosmischen Substrats</b>	<b>449</b>
18.1 Hydrodynamik des kosmischen Substrats . . . . .	449
18.2 Thermodynamik relativistischer Fluide . . . . .	453
18.2.1 Zustandsgleichungen . . . . .	453
18.2.2 Kosmische Hintergrundstrahlung . . . . .	455
18.2.3 Entropie und Entropiesatz . . . . .	459
18.3 Skalenverhalten von Druck, Dichte und Temperatur . . . . .	460
18.3.1 Entkoppelte Strahlung und Materie . . . . .	460
18.3.2 Gekoppelte Strahlung und Materie . . . . .	461
18.4 Elektrische Ladung des Universums . . . . .	464
Aufgaben . . . . .	465
<b>19 Grundgleichungen und Lösungsmannigfaltigkeit</b>	<b>468</b>
19.1 Feldgleichungen der Robertson-Walker-Metrik . . . . .	468
19.2 Erste Folgerungen . . . . .	473
19.2.1 Urknall . . . . .	473
19.2.2 Raumkrümmung und Krümmung der Raum-Zeit . . . . .	474
19.3 Druckfreie Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichung . . . . .	474
19.3.1 Umformung und Parameterabhängigkeit der Gleichung . . . . .	474
19.3.2 Einsteins statische Lösung . . . . .	475
19.3.3 Lösungen ohne Materie . . . . .	476
19.3.4 Lösungen ohne kosmologische Kraft: Standardmodell . . . . .	477
19.3.5 Lösungen mit Materie und kosmologischer Kraft . . . . .	479
19.4 Lösungen mit endlichem Druck und $\Lambda=0$ . . . . .	482
19.4.1 Strahlungsuniversum . . . . .	482
19.4.2 Entkoppelte Strahlung und Materie . . . . .	483
19.5 Stationäres Universum . . . . .	485
Aufgaben . . . . .	487
<b>20 Auswahl realistischer Weltmodelle</b>	<b>489</b>
20.1 Komponenten des kosmischen Substrats . . . . .	489
20.2 Grundgleichung und relative Dichteparameter . . . . .	490
20.3 Separate Behandlung verschiedener Evolutionsphasen . . . . .	493
20.3.1 Materie-Strahlung-Gleichgewicht . . . . .	494

20.3.2	Die ersten zweieinhalb Milliarden Jahre . . . . .	495
20.3.3	Von der Strahlungsentkopplung bis $t = \infty$ . . . . .	497
20.3.4	Einschränkungen des Parameterbereichs für $t \geq t_e$ . . . . .	499
20.4	Bestimmung von $H_0$ , $\Omega_{m0}$ und $\Omega_{A0}$ . . . . .	502
20.5	Favorisiertes Modell . . . . .	505
20.6	Probleme der Weltmodelle . . . . .	509
20.6.1	Durch Urknall gelöste und im Rahmen von Urknallmodellen lösbarer Probleme . . . . .	509
20.6.2	Flachheitsproblem . . . . .	510
20.6.3	Problem der fehlenden Masse und dunkle Materie . . . . .	511
Aufgaben	. . . . .	513
<b>21</b>	<b>Frühes Universum und Umwandlungsprozesse im kosmischen Substrat</b>	<b>517</b>
21.1	Problem der Anfangssingularität . . . . .	517
21.2	Einfluß von Quanteneffekten . . . . .	518
21.3	Evolutionsszenario . . . . .	520
21.3.1	Ära relativistischer Teilchen und der Strahlung . . . . .	520
21.3.2	Materiedominierte Ära . . . . .	524
21.3.3	Temperaturentwicklung . . . . .	526
Aufgaben	. . . . .	527
<b>22</b>	<b>Nicht expandierende Objekte</b>	<b>528</b>
22.1	Einstein-Strauss-Vakuole . . . . .	528
22.2	Berücksichtigung dunkler Energie* . . . . .	531
22.2.1	Ursache von Nichtexpansion . . . . .	533
22.2.2	Zusammenwirken von Expansion und Nichtexpansion . . . . .	535
22.3	Grenzen der Nichtexpansion* . . . . .	535
<b>23</b>	<b>Kosmische Inflation</b>	<b>537</b>
23.1	Urnall-Probleme . . . . .	537
23.1.1	Horizontproblem . . . . .	537
23.1.2	Problem der magnetischen Monopole . . . . .	539
23.1.3	Umformulierung des Flachheitsproblems . . . . .	539
23.2	Konzept der kosmischen Inflation . . . . .	539
23.2.1	Beschleunigung der Expansion . . . . .	540
23.2.2	Mindestmaß inflationärer Expansion . . . . .	544
23.2.3	Vermeidung größerer Dichteinhomogenitäten . . . . .	546
23.3	Problemlösungen durch inflationäre Expansion . . . . .	547
23.3.1	Lösung des Problems der Anfangsmasse . . . . .	547
23.3.2	Lösung des Flachheitsproblems . . . . .	548
23.3.3	Lösung des Monopol-Problems . . . . .	548
23.4	Inflation mit skalarem Quantenfeld . . . . .	549
23.4.1	Reines Inflatonfeld $\Phi$ . . . . .	551
23.4.2	Vollständige Inflationszenarien . . . . .	560
23.5	Vorinflationäre Phase* . . . . .	561

<b>17 Kosmographie</b>	<b>428</b>
17.1 Kosmologisches Prinzip und Robertson-Walker-Metrik . . . . .	428
17.2 Abstands- und Zeitmessung . . . . .	430
17.3 Expansion und Kontraktion des Weltalls . . . . .	432
17.4 Teilchen- und Ereignishorizont . . . . .	434
17.5 Bewegung von Teilchen . . . . .	438
17.6 Rotverschiebung . . . . .	439
17.6.1 Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Ort bzw. Zeit der Lichtemission . . . . .	441
17.7 Zum Olbersschen Paradoxon . . . . .	445
Aufgaben . . . . .	447
<b>18 Hydro-, Thermo- und Elektrodynamik des kosmischen Substrats</b>	<b>449</b>
18.1 Hydrodynamik des kosmischen Substrats . . . . .	449
18.2 Thermodynamik relativistischer Fluide . . . . .	453
18.2.1 Zustandsgleichungen . . . . .	453
18.2.2 Kosmische Hintergrundstrahlung . . . . .	455
18.2.3 Entropie und Entropiesatz . . . . .	459
18.3 Skalenverhalten von Druck, Dichte und Temperatur . . . . .	460
18.3.1 Entkoppelte Strahlung und Materie . . . . .	460
18.3.2 Gekoppelte Strahlung und Materie . . . . .	461
18.4 Elektrische Ladung des Universums . . . . .	464
Aufgaben . . . . .	465
<b>19 Grundgleichungen und Lösungsmannigfaltigkeit</b>	<b>468</b>
19.1 Feldgleichungen der Robertson-Walker-Metrik . . . . .	468
19.2 Erste Folgerungen . . . . .	473
19.2.1 Urknall . . . . .	473
19.2.2 Raumkrümmung und Krümmung der Raum-Zeit . . . . .	474
19.3 Druckfreie Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichung . . . . .	474
19.3.1 Umformung und Parameterabhängigkeit der Gleichung . . . . .	474
19.3.2 Einsteins statische Lösung . . . . .	475
19.3.3 Lösungen ohne Materie . . . . .	476
19.3.4 Lösungen ohne kosmologische Kraft: Standardmodell . . . . .	477
19.3.5 Lösungen mit Materie und kosmologischer Kraft . . . . .	479
19.4 Lösungen mit endlichem Druck und $\Lambda=0$ . . . . .	482
19.4.1 Strahlungsuniversum . . . . .	482
19.4.2 Entkoppelte Strahlung und Materie . . . . .	483
19.5 Stationäres Universum . . . . .	485
Aufgaben . . . . .	487
<b>20 Auswahl realistischer Weltmodelle</b>	<b>489</b>
20.1 Komponenten des kosmischen Substrats . . . . .	489
20.2 Grundgleichung und relative Dichteparameter . . . . .	490
20.3 Separate Behandlung verschiedener Evolutionsphasen . . . . .	493
20.3.1 Materie-Strahlung-Gleichgewicht . . . . .	494

20.3.2	Die ersten zweieinhalb Milliarden Jahre . . . . .	495
20.3.3	Von der Strahlungsentkopplung bis $t = \infty$ . . . . .	497
20.3.4	Einschränkungen des Parameterbereichs für $t \geq t_e$ . . . . .	499
20.4	Bestimmung von $H_0$ , $\Omega_{m0}$ und $\Omega_{A0}$ . . . . .	502
20.5	Favorisiertes Modell . . . . .	505
20.6	Probleme der Weltmodelle . . . . .	509
20.6.1	Durch Urknall gelöste und im Rahmen von Urknallmodellen lösbarer Probleme . . . . .	509
20.6.2	Flachheitsproblem . . . . .	510
20.6.3	Problem der fehlenden Masse und dunkle Materie . . . . .	511
Aufgaben	. . . . .	513
<b>21</b>	<b>Frühes Universum und Umwandlungsprozesse im kosmischen Substrat</b>	<b>517</b>
21.1	Problem der Anfangssingularität . . . . .	517
21.2	Einfluß von Quanteneffekten . . . . .	518
21.3	Evolutionsszenario . . . . .	520
21.3.1	Ära relativistischer Teilchen und der Strahlung . . . . .	520
21.3.2	Materiedominierte Ära . . . . .	524
21.3.3	Temperaturentwicklung . . . . .	526
Aufgaben	. . . . .	527
<b>22</b>	<b>Nicht expandierende Objekte</b>	<b>528</b>
22.1	Einstein-Strauss-Vakuole . . . . .	528
22.2	Berücksichtigung dunkler Energie* . . . . .	531
22.2.1	Ursache von Nichtexpansion . . . . .	533
22.2.2	Zusammenwirken von Expansion und Nichtexpansion . . . . .	535
22.3	Grenzen der Nichtexpansion* . . . . .	535
<b>23</b>	<b>Kosmische Inflation</b>	<b>537</b>
23.1	Urnall-Probleme . . . . .	537
23.1.1	Horizontproblem . . . . .	537
23.1.2	Problem der magnetischen Monopole . . . . .	539
23.1.3	Umformulierung des Flachheitsproblems . . . . .	539
23.2	Konzept der kosmischen Inflation . . . . .	539
23.2.1	Beschleunigung der Expansion . . . . .	540
23.2.2	Mindestmaß inflationärer Expansion . . . . .	544
23.2.3	Vermeidung größerer Dichteinhomogenitäten . . . . .	546
23.3	Problemlösungen durch inflationäre Expansion . . . . .	547
23.3.1	Lösung des Problems der Anfangsmasse . . . . .	547
23.3.2	Lösung des Flachheitsproblems . . . . .	548
23.3.3	Lösung des Monopol-Problems . . . . .	548
23.4	Inflation mit skalarem Quantenfeld . . . . .	549
23.4.1	Reines Inflatonfeld $\Phi$ . . . . .	551
23.4.2	Vollständige Inflationszonen . . . . .	560
23.5	Vorinflationäre Phase* . . . . .	561

23.5.1 Symmetrisches Universum . . . . .	561
23.5.2 Zeit und Volumen unsymmetrischer Universen* . . . . .	564
Exkurs 23.1: Lösungen mit inflationärer Zwischenphase . . . . .	567
Aufgaben . . . . .	571
<b>24 Kausale Struktur des Universums</b>	<b>572</b>
24.1 Urknalluniversen ohne Inflation* . . . . .	572
24.2 Urknalluniversen mit Inflation* . . . . .	576
24.3 Paralleluniversen in einem Multiversum und ewige Inflation . . . . .	578
24.3.1 Spielzeugmodelle für Fluktuationen* . . . . .	580
24.3.2 Konsequenzen, Spekulationen und Probleme . . . . .	582
24.4 Globale Energieerhaltung* . . . . .	585
24.5 Anthropisches Prinzip . . . . .	589
Aufgaben . . . . .	590
<b>Sachregister</b>	<b>591</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>603</b>