

Inhaltsverzeichnis

Teil 1

Die Spezielle Relativitätstheorie

1	Einleitung	3
2	Licht ist für alle gleich schnell – Der Weg zur Relativitätstheorie	5
2.1	Das Michelson-Morley-Experiment	6
2.2	Annahmen zum Michelson-Morley-Experiment	7
2.3	Ergebnis des Michelson-Morley-Experiments und Konsequenzen	12
3	Raum und Zeit sind miteinander verbunden – Eine Theorie verändert unsere Sicht auf die physikalische Welt	17
3.1	Prinzipien der Speziellen Relativitätstheorie	17
3.2	Raum, Zeit und Bewegung	18
3.2.1	Raum	18
3.2.2	Zeit	19
3.2.3	Raum-Zeit	19
3.2.4	Gleichförmige Bewegung	19
3.2.5	Koordinatensystem	23
3.2.6	Eigenzeit	23
3.2.7	Koordinatenzeit	24
3.2.8	Gleichzeitigkeit	24
3.3	Raum-Zeit-Diagramm	25
4	Abstände und Zeitdauern sind relativ – Die mathematischen Grundlagen	29
4.1	Lorentz-Transformation	31
4.1.1	Elementare Herleitung (nach Melcher)	31
4.2	Längenbestimmung mit Ereigniskoordinaten	39
4.2.1	Längen zwischen gleichzeitigen Ereignissen	39
4.2.2	Längen zwischen nicht gleichzeitigen Ereignissen	42
4.3	Zeitbestimmung mit Ereigniskoordinaten	44
4.3.1	Zeitintervalle zwischen gleichartigen Ereignissen	44
4.3.2	Zeitintervalle zwischen nicht gleichartigen Ereignissen	46

4.4	Relativität von Gleichartigkeit und Gleichzeitigkeit	52
4.5	Transformation der Geschwindigkeit	54
4.6	Transformation der Beschleunigung	55
5	Passt der Stab in die Scheune – oder nicht? –	
	Paradoxien und Beispiele der Speziellen Relativitätstheorie	59
5.1	„Veranschaulichung“ der Relativität der Gleichzeitigkeit	59
5.2	Zerfall von Myonen	61
5.3	Stab-Scheune-Paradoxon	62
5.3.1	Längenkontraktionsparadoxon und die Relativität der Gleichzeitigkeit	62
5.3.2	Andere Betrachtung des Stab-Scheune-Paradoxons	66
5.4	Wie sehen relativistisch bewegte Objekte aus?	68
6	Physikalische Größen neu verstehen – Von der klassischen zur relativistischen Physik	73
6.1	Impulssatz und Massenveränderlichkeit	74
6.2	Energie-Impuls-Satz	79
6.3	Vierer-Vektoren	82
7	Wenn Licht und Ton verformt werden – Der Doppler-Effekt und die Aberration	87
7.1	Akustischer Doppler-Effekt	89
7.2	Longitudinaler optischer Doppler-Effekt	91
7.3	Transversaler optischer Doppler-Effekt	95
7.4	Verallgemeinerter optischer Doppler-Effekt	97
7.5	Aberration	100
8	Elektromagnetismus und Relativität – Über die relativistische Bewegung von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern	105
8.1	Bewegung einer Ladung im elektrischen Feld	105
8.2	Bewegung einer Ladung im magnetischen Feld	107
8.3	Kraft durch elektrischen Strom	108
9	Wenn Zeit unterschiedlich schnell vergeht – Teil 1: Das Zwillingsparadoxon in beschleunigter Bewegung	111
9.1	Bewegungssituation	111
9.2	Wechselseitige Betrachtung der Bezugssysteme	114
9.3	Bewegungsgleichung	115
9.4	Graphische Betrachtung der Bewegungsgleichungen	119

9.5	Zeiten und Wege des Raumschiffes	123
9.5.1	Vergleich der Eigenzeiten	124
9.5.2	Vergleich der Reisewege	124
9.6	Graphische Ermittlung der Zeiten und Wege	125
10	Durch Raum und Zeit reisen – Eine Theorie gibt Antworten auf alte Fragen	131
10.1	Reisen in die Zukunft	131
10.1.1	Reise zum Alpha Centauri	132
10.1.2	Reise ins Zentrum der Milchstraße	133
10.1.3	Reisen mit Überlichtgeschwindigkeit	134
10.2	Reisen in die Vergangenheit	136
	Literatur	138
11	Zusammenfassung SRT	141

Teil 2

Die Allgemeine Relativitätstheorie

12	Einleitung	151
13	Wenn Masse den Raum krümmt – Einsteins große Theorie von Raum, Zeit und Materie	153
13.1	Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie	153
13.2	Äquivalenzprinzip	154
13.2.1	Steigender Fahrstuhl	154
13.2.2	Fallender Fahrstuhl	155
13.2.3	Schwere Masse und Träge Masse	156
13.2.4	Rotationsbewegung	158
13.3	Kovarianzprinzip	159
13.4	Korrespondenzprinzip	162
13.4.1	Übergang von der ART zur SRT und zu Newton	163
14	Wie sich die Zeit auch in der ART ändert	167
14.1	Flug mit Atomuhren	167
14.2	Global Positioning System (GPS)	169
14.3	Uhrenvergleich am Äquator und am Pol	171
14.4	Beschleunigtes Koordinatensystem	172

15 Reisen im freien Fall – Teil 2: Das Zwillingsparadoxon aus dem Blickwinkel der ART	177
15.1 Bewegungsgleichung in Eigenzeit	179
15.2 Berechnung der Eigenzeit	188
15.3 Reisezeit der Erde	189
15.3.1 Vergleich mit SRT	190
15.3.2 Graphische Vergleiche	192
15.3.3 Vollständige Hin- und Rückreise mit Anfangswerten	194
Literatur	200
Teil 3 Auf kosmischen Skalen – Was die Allgemeine Relativitätstheorie über das Universum aussagt	
16 Einleitung	205
17 Das Universums expandiert – Zeitliche Entwicklung des Universums	207
17.1 Grundlagen	207
17.2 Allgemeine Gleichungen	209
17.3 Exakte Lösungen für Modelle mit Materie	210
17.4 Spezielle Lösung	215
17.5 Allgemeine Lösung	220
17.5.1 Numerische Integration	221
17.6 Quantitative Lösung	223
17.6.1 Beobachtbare Größen	224
17.6.2 Kritische Dichte	226
17.6.3 Heutiges Modell	227
18 Wo sind die Grenzen des Wissens?	233
18.1 Urknall	233
18.2 Expansion	234
18.3 Anthropisches Prinzip	234
18.4 Eine Weltformel muss noch gefunden werden	236
Literatur	237

Teil 4

Das Universum vermessen und die Theorie testen:

Gravity Probe B

19	Einleitung	241
20	Was wir heute messen können – Aktuelle Experimente	243
20.1	Geodätischer Effekt, Lense-Thirring-Effekt	243
20.2	Experiment Gravity Probe B	244
20.3	Bewegungsgleichung	248
20.3.1	Geodätische Präzession	249
20.3.2	Lense-Thirring Effekt	251
	Literatur	255
21	Zusammenfassung ART	257
	Anhang	259
A.1	Anhang zu Kapitel 7: Allgemeine Herleitung des optischen Doppler-Effekts und der Aberration	259
A.2	Anhang zu Kapitel 20	269
A.3	Konstruktion von Raum-Zeit-Diagrammen – Bestimmung des Einheitslängenverhältnisses zwischen S und S'	277
A.4	Physiker und Mathematiker, die für Einsteins Relativitätstheorien von besonderer Bedeutung waren	280
	Weiterführende Literatur (kleine Auswahl)	283
	Allgemeinverständlich	283
	Lehrbücher	284
	Biographien und Beiträge von und über Einstein	286
	Sachverzeichnis	287