

# Inhaltsverzeichnis

## Teil 1

### Die Spezielle Relativitätstheorie

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Licht ist für alle gleich schnell – Der Weg zur Relativitätstheorie</b>	<b>5</b>
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
<b>3</b>	<b>Raum und Zeit sind miteinander verbunden – Eine Theorie verändert unsere Sicht auf die physikalische Welt</b>	<b>17</b>
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
<b>4</b>	<b>Abstände und Zeitdauern sind relativ – Die mathematischen Grundlagen</b>	<b>29</b>
4.1	Lorentz-Transformation	31
4.1.1	Elementare Herleitung (nach Melcher)	31
4.2	Längenbestimmung mit Ereigniskordinaten	39
4.2.1	Längen zwischen gleichzeitigen Ereignissen	39
4.2.2	Längen zwischen nicht gleichzeitigen Ereignissen	42
4.3	Zeitbestimmung mit Ereigniskordinaten	44
4.3.1	Zeitintervalle zwischen gleichortigen Ereignissen	44
4.3.2	Zeitintervalle zwischen nicht gleichortigen Ereignissen	46

4.4	Relativität von Gleichortigkeit und Gleichzeitigkeit . . . . .	52
4.5	Transformation der Geschwindigkeit . . . . .	54
4.6	Transformation der Beschleunigung . . . . .	55

<b>5</b>	<b>Passt der Stab in die Scheune – oder nicht? –</b>	
	<b>Paradoxien und Beispiele der Speziellen Relativitätstheorie . . . . .</b>	<b>59</b>
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

<b>6</b>	<b>Physikalische Größen neu verstehen – Von der klassischen zur relativistischen Physik . . . . .</b>	<b>73</b>
6.1	Impulssatz und Massenveränderlichkeit . . . . .	74
6.2	Energie-Impuls-Satz . . . . .	79
6.3	Vierer-Vektoren . . . . .	82

<b>7</b>	<b>Wenn Licht und Ton verformt werden – Der Doppler-Effekt und die Aberration . . . . .</b>	<b>87</b>
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

<b>8</b>	<b>Elektromagnetismus und Relativität – Über die relativistische Bewegung von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern . . . . .</b>	<b>105</b>
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

<b>9</b>	<b>Wenn Zeit unterschiedlich schnell vergeht – Teil 1: Das Zwillingsparadoxon in beschleunigter Bewegung . . . . .</b>	<b>111</b>
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
<b>10</b>	<b>Durch Raum und Zeit reisen – Eine Theorie gibt Antworten auf alte Fragen . . . . .</b>	<b>131</b>
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
<b>11</b>	<b>Zusammenfassung SRT . . . . .</b>	<b>141</b>
 <b>Teil 2</b>		
<b>Die Allgemeine Relativitätstheorie</b>		
<b>12</b>	<b>Einleitung . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>13</b>	<b>Wenn Masse den Raum krümmt – Einsteins große Theorie von Raum, Zeit und Materie . . . . .</b>	<b>153</b>
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
<b>14</b>	<b>Wie sich die Zeit auch in der ART ändert . . . . .</b>	<b>167</b>
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

<b>15</b>	<b>Reisen im freien Fall – Teil 2: Das Zwillingsparadoxon aus dem Blickwinkel der ART</b>	<b>177</b>
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

<b>16</b>	<b>Einleitung</b>	<b>205</b>
<b>17</b>	<b>Das Universums expandiert – Zeitliche Entwicklung des Universums</b>	<b>207</b>
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
<b>18</b>	<b>Wo sind die Grenzen des Wissens?</b>	<b>233</b>
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

<b>19</b>	<b>Einleitung</b>	<b>241</b>
<b>20</b>	<b>Was wir heute messen können – Aktuelle Experimente</b>	<b>243</b>
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
<b>21</b>	<b>Zusammenfassung ART</b>	<b>257</b>
	<b>Anhang</b>	<b>259</b>
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
	<b>Weiterführende Literatur (kleine Auswahl)</b>	<b>283</b>
	Allgemeinverständlich	283
	Lehrbücher	284
	Biographien und Beiträge von und über Einstein	286
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>287</b>