



# Auf einen Blick

<b>Über den Autoren</b> .....	<b>7</b>
<b>Einführung</b> .....	<b>19</b>
<b>Teil I: Der Weg zur modernen Physik</b> .....	<b>25</b>
<b>Kapitel 1:</b> Das Klassische Relativitätsprinzip.....	27
<b>Kapitel 2:</b> Der Weg zur Klassischen Mechanik.....	35
<b>Kapitel 3:</b> Newtons Vermächtnis .....	49
<b>Kapitel 4:</b> Klassisches Koordinaten-Hopping: Die Galilei-Transformation.....	69
<b>Kapitel 5:</b> Maxwell und das Licht.....	79
<b>Kapitel 6:</b> Es ächzt und knirscht im Weltgetriebe.....	111
<b>Teil II: Spezielle Relativitätstheorie</b> .....	<b>121</b>
<b>Kapitel 7:</b> Ein Genie und seine Zeit, die Erste.....	123
<b>Kapitel 8:</b> Die Postulate der Speziellen Relativitätstheorie.....	129
<b>Kapitel 9:</b> Die Lorentz-Transformation oder: Alles hat seinen Preis.....	135
<b>Kapitel 10:</b> Das Ende der absoluten Zeit.....	143
<b>Kapitel 11:</b> Über kurz oder lang: Die Längenkontraktion .....	161
<b>Kapitel 12:</b> Die (scheinbar) paradoxe Welt der Relativitätstheorie.....	169
<b>Kapitel 13:</b> Es wird vierdimensional: Die Raumzeit.....	191
<b>Kapitel 14:</b> Masse und Energie.....	215
<b>Teil III: Allgemeine Relativitätstheorie</b> .....	<b>241</b>
<b>Kapitel 15:</b> Ein Genie und seine Zeit, die Zweite.....	243
<b>Kapitel 16:</b> Die Spezielle Relativitätstheorie auf dem Silbertablett.....	249
<b>Kapitel 17:</b> Newtons Gravitation .....	253
<b>Kapitel 18:</b> Beschleunigung und Trägheitskräfte .....	261
<b>Kapitel 19:</b> Das Äquivalenzprinzip .....	265
<b>Kapitel 20:</b> Die rotierende Scheibe: Ein geometrischer Stresstest.....	285
<b>Kapitel 21:</b> Uhren (und Maßstäbe) im Schwerfeld .....	291
<b>Kapitel 22:</b> Licht auf krummen Wegen.....	301
<b>Kapitel 23:</b> Über dem Tellerrand der Schulgeometrie .....	311
<b>Kapitel 24:</b> Fremde Gezeiten <i>oder</i> Inertialsysteme in der Krise.....	323
<b>Kapitel 25:</b> Das Geodätenprinzip .....	331
<b>Kapitel 26:</b> Das Wesen der Schwerkraft.....	345
<b>Kapitel 27:</b> Die Einstein'schen Feldgleichungen .....	349
<b>Kapitel 28:</b> Eine besondere Lösung: Die Schwarzschild-Metrik.....	357
<b>Kapitel 29:</b> Gravitation ad absurdum: Schwarze Löcher .....	369
<b>Kapitel 30:</b> Schwingende Raumzeit: Gravitationswellen .....	383
<b>Kapitel 31:</b> Das expandierende Universum .....	389
<b>Kapitel 32:</b> Ein Genie und seine Zeit, die Dritte und letzte.....	407





## 10 Auf einen Blick

<b>Teil IV: Der Top-Ten-Teil</b> .....	<b>413</b>
<b>Kapitel 33:</b> Eine hemmungslos subjektive Auswahl der zehn interessantesten Zitate Albert Einsteins .....	415
<b>Kapitel 34:</b> Die (außer Einstein) 10 + 1 wichtigsten Personen auf dem Weg zur Relativitätstheorie.....	417
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>421</b>





# Inhaltsverzeichnis

<b>Über den Autoren</b> .....	<b>7</b>
<b>Einführung</b> .....	<b>19</b>
Über dieses Buch .....	20
Konventionen in diesem Buch .....	21
Was Sie nicht lesen müssen .....	21
Törichte Annahmen über den Leser .....	21
Wie dieses Buch aufgebaut ist .....	22
Teil I: Der Weg zur modernen Physik .....	22
Teil II: Spezielle Relativitätstheorie .....	23
Teil III: Allgemeine Relativitätstheorie .....	23
Teil IV: Der Top-Ten-Teil .....	24
Symbole, die in diesem Buch verwendet werden .....	24
Wie es weitergeht .....	24
<b>TEIL I</b>	
<b>DER WEG ZUR MODERNEN PHYSIK</b> .....	<b>25</b>
<b>Kapitel 1</b>	
<b>Das Klassische Relativitätsprinzip</b> .....	<b>27</b>
Was ist Bewegung? .....	28
Vom Koordinatensystem ... ..	30
... zum Bezugssystem .....	32
<b>Kapitel 2</b>	
<b>Der Weg zur Klassischen Mechanik</b> .....	<b>35</b>
Der Vater der Naturwissenschaften .....	35
Beobachter trifft Analytiker: Brahe und Kepler .....	37
Isaac Newton begründet die moderne Physik .....	40
Ganz besondere Bezugssysteme .....	44
Newtons Raum und Zeit .....	45
<b>Kapitel 3</b>	
<b>Newtons Vermächtnis</b> .....	<b>49</b>
Kinematik: Nichts als die reine Bewegung .....	50
Geschwindigkeit verbindet Ort und Zeit .....	51
Die nächste Stufe auf der Differenzialleiter: Beschleunigung .....	55
Die Geschwindigkeit als Vektor .....	56
Nach vorne mit Wucht: Der Impuls .....	56
Impulserhaltung .....	56
Der Chef in der Mechanikabteilung: Die Energie .....	58
Energie geht nicht verloren .....	60





## 12 Inhaltsverzeichnis

Dynamik: Von den Kräften und ihren Wirkungen .....	65
Zwei ungleiche Brüder: Masse und Gewicht.....	66
Bewegungsgleichungen.....	67

### Kapitel 4

#### Klassisches Koordinaten-Hopping:

#### Die Galilei-Transformation ..... 69

Gegeneinander bewegte Bezugssysteme .....	70
Der Veränderung trotzen: Das Invarianzprinzip .....	74

### Kapitel 5

#### Maxwell und das Licht ..... 79

Elektrizität und Magnetismus im Wandel der Zeit.....	79
Elektrizität wird eine Wissenschaft.....	81
Von Elektrizität und Magnetismus zum Elektromagnetismus.....	82
Bewegte Ladungen im Magnetfeld.....	87
Die Maxwell'schen Gleichungen.....	89
Der Elektromagnetismus schlägt Wellen.....	91
Die Vermessung des Lichts.....	94
Nicht zu fassen: Der Äther .....	99
Seltsame Sache, klare Muster: Interferenz.....	101
Äther ade .....	104
Licht im Ätherwind.....	105
Das Experiment von Michelson und Morley.....	106

### Kapitel 6

#### Es ächzt und knirscht im Weltgetriebe ..... 111

Aberration und die Mitführungsthese .....	111
Hendrik A. Lorentz' erstaunliche Interpretation des Michelson-Experiments.....	114
Ist die Elektrodynamik Galilei-invariant? .....	117
Welche Lichtgeschwindigkeit misst ein Astronaut?.....	117
Was soll die Ladung im Magnetfeld tun?.....	118

## TEIL II

### SPEZIELLE RELATIVITÄTSTHEORIE..... 121

### Kapitel 7

#### Ein Genie und seine Zeit, die Erste ..... 123

Von München über Italien in die Schweiz.....	123
Der Autodidakt.....	125
Patentangestellter dritter Klasse.....	126
Das Wunderjahr .....	127





## Inhaltsverzeichnis 13

<b>Kapitel 8</b>	
<b>Die Postulate der Speziellen Relativitätstheorie .....</b>	<b>129</b>
Einsteins Reise mit dem Licht .....	129
Das Ende des Äthers .....	131
Die Einstein'schen Postulate .....	132
Das erste Postulat .....	132
Das zweite Postulat .....	132
<b>Kapitel 9</b>	
<b>Die Lorentz-Transformation oder: Alles hat seinen Preis .....</b>	<b>135</b>
Einsteins Weg zur Lorentz-Transformation .....	137
Die Lorentz-Transformation im Überblick .....	140
<b>Kapitel 10</b>	
<b>Das Ende der absoluten Zeit .....</b>	<b>143</b>
Von der ruhenden zur bewegten Lichtuhr .....	143
Lichtuhr im Waggon, die Erste: Ruhe .....	144
Lichtuhr im Waggon, die Zweite: Bewegung .....	145
Warum sich die Zeitdilatation versteckt .....	148
Beispiel 1: Ein vorbeifahrendes Auto .....	149
Beispiel 2: Ein Düsenjet mit Schallgeschwindigkeit .....	149
Beispiel 3: Die Voyager-Sonde .....	149
Beispiel 4: Eine Reise zur Wega (Teil I) .....	150
Die Lichtgeschwindigkeit als Grenze .....	152
Wie man Uhren synchronisiert .....	153
Die Eisenbahn und die Zähmung der Zeit .....	155
Die Tücken der Gleichzeitigkeit .....	156
Klassische Gleichzeitigkeit .....	157
Relative Gleichzeitigkeit .....	159
<b>Kapitel 11</b>	
<b>Über kurz oder lang: Die Längenkontraktion .....</b>	<b>161</b>
Wie man Längen misst .....	162
Längen verkürzen sich .....	163
Längenkontraktion und Lorentz-Transformation .....	166
Längenkontraktion à la Einstein und Lorentz .....	167
<b>Kapitel 12</b>	
<b>Die (scheinbar) paradoxe Welt der Relativitätstheorie .....</b>	<b>169</b>
Eine Reise zur Wega (Teil II) .....	169
Die erstaunlich lange Reise der Myonen .....	170
Kommt ein Speerwerfer nach Hause .....	171
Die kinematische Version .....	172
Die dynamische Version .....	174





## 14 Inhaltsverzeichnis

Das Zwillingsparadoxon .....	178
Die Abreise .....	179
Der Umstieg .....	180
Die Rückkehr .....	181
Begegnen sich zwei Raumschiffe – das Additionstheorem.....	183
Schlechte Nachrichten: Schneller als das Licht? .....	186
Magnetismus ist relativ.....	188

### Kapitel 13

#### Es wird vierdimensional: Die Raumzeit ..... 191

Die Raumzeit ist ein Daumenkino .....	192
Die Sache mit der Zeitachse .....	194
Zwei in Einem: Minkowski-Diagramme.....	195
Spezielle Relativitätstheorie in Minkowski-Diagrammen.....	198
Die Relativität der Gleichzeitigkeit.....	198
Die Zeitdilatation.....	199
Die Längenkontraktion.....	200
Das Zwillingsparadoxon.....	201
Das Scheunenparadoxon.....	204
Wie man Abstände in der Raumzeit misst.....	205
Kausalität, ein Fels in der Brandung.....	209
Uhren als Weltlinienmesser.....	212

### Kapitel 14

#### Masse und Energie ..... 215

Mehr Speed, mehr Masse .....	216
Neuer Impuls und neue Kraft.....	218
Noch einmal: $c$ als absolute Grenzgeschwindigkeit.....	219
Die Mutter aller Formeln.....	221
Die Bedeutung der Einstein'schen Formel.....	230
Aus dem Nichts, zurück ins Nichts – Paarerzeugung und Paarvernichtung.....	230
Treffen sich zwei Protonen: Teilchenbeschleuniger.....	231
Wenn eins plus eins nicht zwei ergibt – der Massendefekt.....	232
Die Entfesselung der Bindungsenergie.....	234
Sonnenenergie aus $mc^2$ .....	236
Eine verblüffende Erkenntnis Ihr Gewicht betreffend.....	238

### TEIL III

#### ALLGEMEINE RELATIVITÄTSTHEORIE.....241

### Kapitel 15

#### Ein Genie und seine Zeit, die Zweite ..... 243

Der akademische Durchbruch.....	243
Auf nach Berlin.....	244
Der Weg zur Allgemeinen Relativitätstheorie.....	245
Die Geburt der Legende.....	246



## Inhaltsverzeichnis 15

<b>Kapitel 16</b>	
<b>Die Spezielle Relativitätstheorie auf dem Silbertablett.....</b>	<b>249</b>
<b>Kapitel 17</b>	
<b>Newtons Gravitation.....</b>	<b>253</b>
Die erste Theorie von Allem .....	253
Newtons Formel .....	254
Herrscherin über das Universum .....	256
Die Gravitation verrät einen neuen Planeten .....	257
Warum Newtons Gravitation für Einstein nicht genug war .....	257
Die Verschiebung des Merkurperihels.....	258
Die Newton'sche Gravitation und das Relativitätsprinzip.....	259
<b>Kapitel 18</b>	
<b>Beschleunigung und Trägheitskräfte.....</b>	<b>261</b>
Die Kraft beim Bremsen und Beschleunigen.....	261
Die Fliehkraft.....	262
<b>Kapitel 19</b>	
<b>Das Äquivalenzprinzip.....</b>	<b>265</b>
Das Einstein'sche Äquivalenzprinzip.....	265
Träge Masse und schwere Masse.....	265
Rätsel in der Kiste, die Erste: Freier Fall versus Schwerelosigkeit.....	270
Einfach nur Masse .....	274
Was ist Schwerelosigkeit? .....	275
Inertialsysteme in der Krise.....	276
Kugelstoß in der Kiste .....	277
Kugelstoß im freien Fall .....	277
Newton im Schwimmbad.....	278
Eine kleine Sprachkonvention.....	282
Eine Zwischenbilanz.....	282
<b>Kapitel 20</b>	
<b>Die rotierende Scheibe: Ein geometrischer Stresstest.....</b>	<b>285</b>
Das Setup .....	285
Die Uhren .....	286
Die Maßstäbe.....	286
Die Raumgeometrie .....	287
<b>Kapitel 21</b>	
<b>Uhren (und Maßstäbe) im Schwerfeld.....</b>	<b>291</b>
Die frei fallende Uhr.....	291
Uhren im Hochhaus.....	292
Uhren in einer Rakete.....	295





## 16 Inhaltsverzeichnis

Frei im leeren Raum .....	295
Beschleunigt im leeren Raum .....	296
Ruhend im Schwerfeld .....	297
Frei fallend im Schwerfeld .....	297
Die gravitative Rotverschiebung .....	298
Maßstäbe im Schwerfeld .....	299

### Kapitel 22

#### **Licht auf krummen Wegen .....** **301**

Ein Lichtstrahl in der Kiste .....	301
Woher das Licht weiß, wo es hin soll .....	302
Mit der Sonnenfinsternis zum Durchbruch .....	305
Gravitationslinsen .....	308

### Kapitel 23

#### **Über dem Tellerrand der Schulgeometrie .....** **311**

Euklidische und gekrümmte Räume .....	311
Mit rechten Dingen .....	312
Krumme Dreiecke .....	312
Eine Reise zum Nordpol .....	313
Schön eingebettet .....	315
Positive und negative Krümmung .....	316
Möglichst gerade Kurven .....	317
Ziemlich ebene Gebiete .....	319
Zusammenfassung: Nichteuklidische Geometrie .....	320

### Kapitel 24

#### **Fremde Gezeiten *oder* Inertialsysteme in der Krise .....** **323**

Vertrautes auf den Kopf gestellt .....	323
Zurechtgestutzte Inertialsysteme .....	325
Ebbe und Flut .....	329

### Kapitel 25

#### **Das Geodätenprinzip .....** **331**

Geodäten weisen den freien Fall .....	331
Kometenbahnen im interstellaren Raum .....	332
Kometenbahnen im Sonnensystem .....	334
Das Geodätenprinzip .....	338
Räumliche Schattenbahnen .....	339
Eine Geodäte für jeden Fall .....	341
Der Ursprung der Fallbeschleunigung .....	342



## Inhaltsverzeichnis 17

<b>Kapitel 26</b>	
<b>Das Wesen der Schwerkraft</b> .....	<b>345</b>
Was ist »Schwere«? .....	345
Gravitation ist keine Kraft (aber was dann?) .....	347
<b>Kapitel 27</b>	
<b>Die Einstein'schen Feldgleichungen</b> .....	<b>349</b>
Die Feldgleichung(en) der klassischen Gravitation .....	350
Die Feldgleichung der Allgemeinen Relativitätstheorie .....	351
Maß-Regeln <i>oder</i> die Metrik .....	353
<b>Kapitel 28</b>	
<b>Eine besondere Lösung: Die Schwarzschild-Metrik</b> .....	<b>357</b>
Kugelkoordinaten .....	358
Die Schwarzschild-Metrik .....	360
Der zeitliche Term .....	361
Der radiale Term .....	364
<b>Kapitel 29</b>	
<b>Gravitation ad absurdum: Schwarze Löcher</b> .....	<b>369</b>
Wie Sterne enden .....	369
Rote Riesen .....	370
Weiße Zwerge .....	370
Neutronensterne .....	372
Schwarze Löcher .....	373
Eine Reise in ein Schwarzes Loch .....	374
Was Sie dabei erleben .....	375
Was Ihr Freund beobachtet .....	376
Schwarze Löcher im Universum .....	376
Ein Monster im Zentrum der Milchstraße .....	377
Aktive galaktische Kerne .....	378
<b>Kapitel 30</b>	
<b>Schwingende Raumzeit: Gravitationswellen</b> .....	<b>383</b>
Die Elastizität der Raumzeit .....	383
PSR B1913+16 .....	384
Der direkte Nachweis .....	385
<b>Kapitel 31</b>	
<b>Das expandierende Universum</b> .....	<b>389</b>
Das Kosmologische Prinzip .....	389
Die Friedmann-Lösung .....	391
Die Jahrtausendentdeckung .....	393



## 18 Inhaltsverzeichnis

Das kosmologische Standardmodell .....	398
Der Nachhall des Urknalls .....	399
Die mittlere Materiedichte $\Omega_m$ .....	400
Dunkle Materie .....	401
Dunkle Energie .....	403
Das $\Lambda$ CDM-Modell .....	405

### Kapitel 32

#### **Ein Genie und seine Zeit, die Dritte und letzte.....407**

Enttäuschte Hoffnung .....	407
Gottes Würfel .....	408
Deutschland adieu .....	409
Einstein und die Bombe .....	410
Friedensbotschafter unter Beobachtung .....	411

### TEIL IV

#### **DER TOP-TEN-TEIL.....413**

### Kapitel 33

#### **Eine hemmungslos subjektive Auswahl der zehn interessantesten Zitate Albert Einsteins.....415**

### Kapitel 34

#### **Die (außer Einstein) 10 + 1 wichtigsten Personen auf dem Weg zur Relativitätstheorie.....417**

Galilei Galileo .....	417
Isaac Newton .....	417
Michael Faraday .....	418
Bernhard Riemann .....	418
James Clerk Maxwell .....	418
Albert A. Michelson .....	419
Hendrik Antoon Lorentz .....	419
Henri Poincaré .....	419
Hermann Minkowski .....	420
Marcel Grossmann .....	420
Sir Arthur Eddington .....	420

#### **Stichwortverzeichnis.....421**

