

# Inhalt

## Vorwort

15

## Prolog

### Vorwärts und rückwärts

19

Wahrscheinliche und unwahrscheinliche Abläufe . . . . .	19
Zeit in fundamentalen und effektiven Naturgesetzen . . . . .	20
Mehrere gleichberechtigte Zeiten . . . . .	21
Zeit der Gesetze und Zeit der Systeme . . . . .	21
Wahrscheinliche und unwahrscheinliche Zustände . . . . .	23
Ordnung und Unordnung . . . . .	24
Naturgesetze und die »Richtung der Zeit« . . . . .	26
Woher die Ordnung? . . . . .	28
Exkurs: Zeit vor der Zeit des Urknalls? . . . . .	29
Wiederaufnahme: Woher die Ordnung? . . . . .	31
Abgezwigte Systeme . . . . .	32
Gesetz ohne Gesetz? . . . . .	34
Deterministisches Chaos . . . . .	35
Naturgesetze und Naturkonstanten . . . . .	38
Grobkörnigkeit und die »Richtung der Zeit« . . . . .	40
Realität und Emergenz . . . . .	40

# 1. Sprachliches, Religiöses und Philosophisches zu Zeit und Gesetz

42

Zeiterfahrung und Gesetze . . . . .	42
Zeit und Schöpfungsmythen . . . . .	43
Der Schlund der Zeit . . . . .	45
Rationale Mythen . . . . .	46
Die Welt kann verstanden werden . . . . .	48
Einfluß der Zeit auf die Dinge? Der Dinge auf die Zeit? . . . . .	49
Götter und Himmelskörper . . . . .	53
Tabellen, Geometrie und Gesetze . . . . .	54
Urstoffe und Wandel . . . . .	55
Werden und Änderung vs. Sein und Dauer . . . . .	58
Funktion und Grenzwert . . . . .	59
Zenon von Elea . . . . .	62
Platon . . . . .	63
Aristoteles . . . . .	64
Straton und die Stoiker . . . . .	67
Von Augustin zu Leibniz . . . . .	68
Kant . . . . .	72

# 2. Naturwissenschaftliches zu Zeit und Gesetz

73

Systeme und ihre Zustände . . . . .	73
Ursachen und Wirkungen . . . . .	75
Luftwiderstand und Zeitumkehrsymmetrie . . . . .	77
Effektive Naturgesetze . . . . .	78
Ordnung, Unordnung und Korrelationen . . . . .	80
Vergroßerungen – I . . . . .	81
Raum und Phasenraum . . . . .	83
Fundamentale und irdische Physik . . . . .	84
Planetarische Physik . . . . .	85
Programme und Naturgesetze . . . . .	86
Komprimierbarkeit . . . . .	87
Gödel auch hier! . . . . .	89
Formulierungen, Interpretationen und Verständnis . . . . .	90

### 3. Zeit als Parameter

91

Newtons Absolute Zeit . . . . .	91
Einzelbegriffe und Systeme . . . . .	92
Falsifizierbarkeit . . . . .	94
Gödel abermals . . . . .	95
Zeit der Theorie und der wirklichen Welt . . . . .	97
Gleichzeitigkeit à la Newton . . . . .	101
Newtonsche Zeitmessungen . . . . .	102
Newtons Zeit in der wirklichen Welt . . . . .	106
Realität und Objektivität der Zeit . . . . .	108
Zeit als Etikett . . . . .	109
Wiederaufnahme: Vorwärts und rückwärts . . . . .	110
Tatsachen und Gesetze . . . . .	111
Zeit als Observable . . . . .	113
Spezielle Relativitätstheorie . . . . .	114
Erkenntnistheoretische Vorbemerkung . . . . .	114
Abschirmungen . . . . .	117
Absolute und relative Bewegung . . . . .	118
Spiegelbilder und das Leibnizsche Prinzip der Identität des Ununterscheidbaren . . . . .	121
Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	123
Einsteins Zug . . . . .	129
Ereignisse . . . . .	130
Gleichzeitigkeit . . . . .	131
Zeitliche Reihenfolgen . . . . .	133
Geschwindigkeiten von Signalen . . . . .	133
Zusammenfassung . . . . .	136
Bewegte Uhren gehen langsamer . . . . .	137
Zwillingsparadox . . . . .	140
Der Mechanismus des Zwillingsparadox . . . . .	143
Das Prinzip der maximalen Alterung . . . . .	145
Freier Fall und Allgemeine Relativitätstheorie . . . . .	146
Lineale und Uhren . . . . .	148
Uhren im Schwerfeld . . . . .	151
Das Prinzip der maximalen Alterung in der Allgemeinen Relativitätstheorie . . . . .	154

## 4. Die Richtung der Zeit

157

Uhren . . . . .	157
Exkurs: Besonderheiten der Schwerkraft . . . . .	160
Wiederaufnahme: Uhren . . . . .	161
Maschinen, die nicht rückwärts laufen können . . . . .	162
Perpetuum mobile zweiter Art . . . . .	163
Zusammenfassung . . . . .	165
Energieumsatz und die »Richtung der Zeit« . . . . .	166
Expansion, Kontraktion und die »Richtung der Zeit« . . . . .	170
Gewimmel der Atome . . . . .	172
Wann Wiederkehr? . . . . .	174
Energieverteilungen . . . . .	175
Temperatur als Mittelwert der Bewegungsenergie . . . . .	177
Umkehrinwand . . . . .	180
Vergroberungen – II . . . . .	183
Molekulares Chaos . . . . .	185
Manifeste und verborgene Ordnung . . . . .	187
Pfeil der Abläufe, nicht der Zeit . . . . .	188
Illustration . . . . .	189
Wärmebewegung und Pendelschwingung . . . . .	190
Abweichungen vom Gleichgewicht . . . . .	194
Kosmische Hintergrundstrahlung . . . . .	196
Materie, Strahlung und Ordnung . . . . .	198
In Teilsystemen kann die Ordnung wachsen . . . . .	199
Thermodiffusion als Beispiel . . . . .	199
Heiße und kalte Wärmestrahlung . . . . .	202
Woher die Ordnung, die abgebaut wird? . . . . .	204

## 5. Zeitliche Symmetrien

205

Symmetrie und Unbeobachtbarkeit . . . . .	205
Symmetrien von Naturgesetzen . . . . .	206
Zeitverschiebungssymmetrie . . . . .	208
Energieerhaltung und Zeitverschiebungssymmetrie . . . . .	209

Die sieben Spiegel der Elementarteilchenphysik . . . . .	211
Die Naturgesetze sind nicht $P$ -spiegelsymmetrisch . . . . .	212
Die Naturgesetze sind nicht $C$ -spiegelsymmetrisch . . . . .	214
$PC$ -Symmetrie der Naturgesetze . . . . .	215
... und ihre Brechung . . . . .	216
Das $PCT$ -Theorem . . . . .	218
$PCT$ -Theorem und $PC$ -Verletzung erzwingen $T$ -Verletzung in den Naturgesetzen . . . . .	220
Starre Theorien . . . . .	221
Metrische und topologische Zeit . . . . .	223
Uhren und Geometrie . . . . .	225
Zeit des Universums und in ihm . . . . .	226
Was aber ist Zeit? . . . . .	228

## 6. Zeit in der Quantenmechanik

232

Wahrscheinlichkeiten, klassisch . . . . .	233
Wahrscheinlichkeiten, quantenmechanisch . . . . .	234
Quantenmechanische Korrelationen ohne Übertragung und ohne gemeinsame Wurzel . . . . .	240
Verfestigungen . . . . .	242
Verfestigungen jetzt . . . . .	244
»Geisterartige Wirkungen« wirken nicht . . . . .	246
Verborgene »Elemente der Realität«? . . . . .	247
Unauflösbare Verschränktheiten . . . . .	247
Analyse und Synthese . . . . .	248
Globale und lokale Eigenschaften . . . . .	249
Indeterminismus der Quantenmechanik . . . . .	251
Kopenhagener Deutung und Schrödingers Katze . . . . .	252
Radioaktive Zerfälle und die »Richtung der Zeit« . . . . .	254
Woher die klassische Welt? . . . . .	255
Allgemeine Relativitätstheorie und Quantenmechanik im frühen Universum . . . . .	256
Unschärferelationen . . . . .	257
Superraum und Quantenmechanik . . . . .	259
Zeit und die Wellenfunktion des Universums . . . . .	260

Lösungen der Wheeler-De Witt-Gleichung . . . . .	261
Von nichts und Nichts . . . . .	262
Anfangsbedingungen . . . . .	263
Das Hartle-Hawking-Universum . . . . .	265
Konzeptionen der Quantenkosmologie . . . . .	266
Schwarze Löcher, klassisch . . . . .	267
Schwarze Löcher, quantenmechanisch . . . . .	268
»Öffentliche« und »private« Eigenschaften Schwarzer Löcher . . . . .	270

## 7. Reduktionistisches zu Zeit und Gesetz

274

Sinnkriterien naturwissenschaftlicher Aussagen . . . . .	274
Basissätze und theoretische Konstruktionen . . . . .	275
Realität oder gar Existenz theoretischer Konstruktionen . . . . .	276
Die Realität von Naturgesetzen . . . . .	278
Bertrand Russell und die Kenntnis der Außenwelt . . . . .	279
Ludwig Boltzmann und die »Existenz« der Atome . . . . .	280
Außenwelt bei Stegmüller . . . . .	281
Ebenen der Beschreibung . . . . .	282
Einzel Tatsachen und Systeme . . . . .	283
Emergenz und Reduktionismus . . . . .	284
Emergenz und Denkmaschinen . . . . .	286
Beziehungen zur Wärmelehre . . . . .	289
Auftritt des Zufalls . . . . .	291
Spontane Symmetriebrechung . . . . .	292
. . . und der Satz vom zureichenden Grunde . . . . .	293
Zufall, Chaos und Determinismus . . . . .	295
Historische Zufälle . . . . .	297

## Epilog

303

Naturgesetze und unsere Stellung auf der Oberfläche der Erde . . . . .	303
Naturgesetze und unsere Stellung im Universum . . . . .	306
Anthropische Prinzipien . . . . .	308

Ein anthropisches System . . . . .	310
Naturkonstanten . . . . .	312
Bedingte Wahrscheinlichkeiten der Naturkonstanten . . . . .	313
Wiederaufnahme: Vorwärts und rückwärts . . . . .	313
Zeit in der Quantenmechanik . . . . .	315
Anthropisches Prinzip und Reduktionismus . . . . .	316

## **Dank**

319

## **Anhang**

321

Anmerkungen . . . . .	323
Zitatnachweis . . . . .	324
Literatur . . . . .	328
Bildnachweis . . . . .	335
Namenverzeichnis . . . . .	336