

# Inhalt

Vorwort.....	VII
Über dieses Buch.....	IX
Inhalt.....	XI

1 Die Welt der Teilchen .....	1
Eine weltweite Reise in die Teilchenphysik – Bildhafte Eindrücke von Teilchendetektoren .....	2
Was ist Teilchenphysik Eine fundamentale Wissenschaft im Wechselspiel mit anderen.....	4
Ursprünge der Teilchenphysik Wie und wer? .....	6
Längenskalen und Einheiten Von riesig groß bis zu winzig klein alles Physik .....	8
Die Elementarteilchen Die Bausteine der Welt.....	10
Die vier Grundkräfte der Natur Vier sehr ungleiche Partner .....	12
Das Quarkmodell Wie Quarks das Teilchenchaos zähmten .....	14
Was ist eigentlich ein Elementarteilchen? Gibt es immer kleinere Bausteine? .....	16
Was ist Antimaterie? Science Fiction oder Realität? .....	18
Detektoren im Alltag Einen Teilchendetektor tragen wir im Kopf.....	20
Wie macht die Physik Fortschritte? Eine komplizierte Suche nach einfachen Antworten .....	22
Experimentelle Forschung in der Teilchenphysik Verschiedene Experimente für verschiedene Fragestellungen.....	24
Hintergründe zur wissenschaftlichen Methode Der Unterschied zwischen „Wahrheit“ und „Wissen“ .....	26
Vorstellung und Realität Verschiedene Beschreibungen funktionieren .....	28
2 Allgemeine Grundlagen .....	31
Energie und Leistung Kilowattstunden, Elektronenvolt, ... wie hängt das alles zusammen? .....	32
Spezielle Relativitätstheorie Wie schnell ist schnell?.....	34
Kinematik - Impuls und Drehimpuls .....	36
Beschleunigung und Strahlung Wer beschleunigt, der strahlt .....	38
Grundkonzepte der Quantenmechanik - Von Pfeilen und Elektronen.....	40
Zufall und Vorhersage Quantenmechanik <i>at work</i> .....	42

Spin	Eine eigentümliche Größe der Quantenmechanik.....	44
Das Prinzip von Streuexperimenten	Atomares Billard.....	46
Feynman-Diagramme	Grafische Darstellungen von Wechselwirkungen.....	48
Produktion, Zerstörung und Zerfall von Teilchen	Wie Teilchen aus Teilchen entstehen können.....	50
Resonanzen	- Wenn alles zusammenpasst.....	52
Über die Reichweite von Wechselwirkungen	Von intergalaktischen Abständen zur Größe von Atomkernen .....	54
Symmetrien	Schon und praktisch.....	56
Spontane Symmetriebrechung	Die versteckte Symmetrie .....	58
<b>3 Experimentelle Grundlagen</b>	.....	<b>61</b>
Wie funktioniert ein Beschleuniger?	Mit elektrischen Feldern zu hohen Energien .....	62
Wechselwirkung zwischen Teilchen und Materie	Warum wir überhaupt Teilchen in Messgeräten nachweisen können .....	64
Halbleiterdetektoren	Die Multitalente: von der Handykamera bis zum LHC.....	66
Gasbasierte Detektoren	Messen, wo gar kein Detektor zu sein scheint .....	68
Szintillatoren und Photomultiplier	- Die großen Augen der Teilchenphysik.....	70
Orts- und Impulsmessung	Woher kommen wir, wohin gehen wir: fundamentale Fragen auch für Teilchen	72
Energiemessung von Teilchen	Wie viele Kalorien isst der Detektor? .....	74
Signaturen von Teilchen	- Fußabdrucke von Teilchen in den Detektoren.....	76
Čerenkov-Strahlung und Teilchenidentifikation	Schneller als Licht .....	78
Statistik	Die mathematische Beschreibung von Zufall .....	80
Messunsicherheiten	- Jeder macht Fehler .....	82
Simulationen in der Experimentalphysik	Welche Beobachtung wird wirklich vorhergesagt? .....	84
<b>4 Theoretische Grundlagen</b>	.....	<b>87</b>
Anwendungen der speziellen Relativitätstheorie	Relativität im Teilchenphysikalltag.....	88
Fermionen und Bosonen	Die Basis nicht nur der Chemie .....	90
Äußere und innere Symmetrien	Zur Schau gestellt oder versteckt? .....	92

Eichsymmetrien - Versteckte Symmetrien als Ursprung der Kräfte.....	94
Das Noether-Theorem Symmetrien bedingen Erhaltungsgrößen .....	96
Feynman-Diagramme II Eine Bastelanleitung.....	98
Quantenfeldtheorie Erzeugung und Vernichtung von Teilchen.....	100
Schleifen Quantenmechanische Spezialeffekte .....	102
Renormierung Die Zähmung der Unendlichkeit.....	104
Präzise Berechnung des nicht vollständig Lösbaren - Wie man trickreich der Natur ihre Geheimnisse entlockt .....	106
Simulationen in der theoretischen Physik Wie Computer das Unerreichbare erreichen .....	108
5 Detektoren und Beschleuniger.....	111
Der LHC-Beschleunigerkomplex am CERN - Von der Wasserstoffflasche bis zur Kollision .....	112
Strahlführung - Nur nicht auf die schiefe Bahn geraten.....	114
Plasmabeschleunigung Ein Beschleuniger, der auf einen Kuchentisch passt.....	116
Beschleuniger in der Medizin Diagnose und Therapie .....	118
Röntgenstrahlung Das geht unter die Haut .....	120
Synchrotronstrahlung - Quellen besonderen Lichts.....	122
Typische Detektoren an Beschleunigern Groß und Klein unter den Detektoren .....	124
Große Detektoren tief im Berg - Die schwierige Jagd nach Neutrinos .....	126
Tieftemperaturdetektoren Hochste Ansprüche bei tiefsten Temperaturen .....	128
Flüssige Edelgase als Detektoren Seltene Flüssigkeiten zur Suche nach seltenen Teilchen.....	130
Teilchenfallen Eingesperrte Teilchen .....	132
Positronen-Emissions-Tomographie Nutzliche Antimaterie-Vernichtung im Körperinneren .....	134
Magnetresonanztomographie Mit dem Spin ins Innere des Körpers blicken.....	136
6 Grundlagen der Auswertung von Teilchenphysikmessungen .....	139
Trigger und Datenverarbeitung Der Weg der Nadel im Heuhaufen vom Detektor auf die Festplatte.....	140
Datenauswertung - Aus sehr vielen Informationen das Spannende herausfinden.....	142
Identifikation der Teilchensorte über die Masse Teilchen spielen „Wer bin ich?“ .....	144

Die Bestimmung von Messunsicherheiten	Lieber besser messen als länger messen.....	146
Schlüsse ziehen aus Statistik	Wann ist etwas zu unwahrscheinlich, um wahr zu sein?.....	148
Veröffentlichen, was es nicht gibt	Nichts zu finden ist ein wichtiges Ergebnis.....	150
Ein Beispiel für die Entdeckung eines Teilchens	... anhand des Higgs-Bosons.....	152
Was sind „Blinde Analysen“?	Der Placebo-Effekt bei Forschenden .....	154
Wie korrigiert man falsche Entdeckungen?	Korrekturverfahren in der Teilchenphysik .....	156
Neuronale Netzwerke und maschinelles Lernen	Mit Köpfchen zu neuen Erkenntnissen.....	158
Die Erfindung des World Wide Web	Offene weltumspannende Wissenschaft für eine offene Gesellschaft .....	160

7 Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik .....	163	
Elektromagnetismus	Die alltägliche Kraft.....	164
Die schwache Wechselwirkung	Verwandlung ist möglich .....	166
Up, Down, Rechts und Links	Wer ist mit wem verwandt?.....	168
Die unsichtbare Breite des $Z$ -Bosons	Es gibt nur drei Neutrinos! .....	170
Spontane Symmetriebrechung im Standardmodell	Das Higgs-Boson als Spielverderber.....	172
Spontane Symmetriebrechung II	Woher kommt das Photon? .....	174
Spontane Symmetriebrechung III	Was hat die bottom-Quark-Masse mit dem Higgs-Zerfall zu tun? .....	176
Diskrete Symmetrien: $P$ - und $CP$ -Verletzung	Gespiegelt ist ganz was anderes.....	178
Der Pion-Zerfall	Links, rechts, schneller, langsamer: Das macht einen Unterschied .....	180
Der Weg zu sechs Quarks in drei Familien	Wer wechselwirkt mit wem? .....	182
Neutrinos	- Die außergewöhnlichen Leichtgewichte unter den Elementarteilchen .....	184
Neutrinooszillationen	Wankelmütige Neutrinos .....	186
8 Die Besonderheiten der starken Wechselwirkung .....	189	
Quantenchromodynamik	Von 1 nach 3: kleiner Unterschied mit großer Wirkung.....	190
Confinement	Warum es keine freien Quarks gibt.....	192
Die Suche nach freien Quarks	Oder wie man sich von der Statistik tauschen lassen kann.....	194
Die laufende Kopplung	Ein Scheinriese?.....	196

Die Struktur des Protons	Ein reichhaltiges Innenleben .....	198
Quarkverteilungen im Proton	Mehr als nur drei Quarks.....	200
Kann man Quarks und Gluonen sehen?	Das Unerreichbare wird sichtbar .....	202
Woher kommt unsere Masse?	Verkehrte Welt?.....	204
Gitter-QCD	Der Supercomputer macht's möglich .....	206
Der Quarkmasseneffekt	Warum wir den Massenunterschieden der Quarks unsere Existenz verdanken ...	208
Von Nukleonen zu Kernen	Welch Vielfalt aus zwei Bausteinen .....	210
Die Karlsruher Nuklidkarte	Vom Tal der Stabilität .....	212
Exotische Zustände	Ein neuer Teilchenzoo? .....	214
Die <sup>14</sup> C-Altersbestimmung	Archäologie mithilfe von Kernphysik .....	216
9 Der Triumph des Standardmodells und darüber hinaus .....		219
Die Entdeckung der neutralen Ströme	Der erste Durchbruch des Standardmodells .....	220
Die zufällige Entdeckung des $J/\psi$	Der zweite Durchbruch des Standardmodells.....	222
Die Entdeckung von $W$ - und $Z$ -Boson	Von der Beobachtung eines Stroms zur Entdeckung eines Teilchens .....	224
Entdeckung und Besonderheit des top-Quarks	Das schwerste bekannte Elementarteilchen .....	226
Warum ausgerechnet das Standardmodell?	Präzisionsphysik am LEP und Vorhersage des Higgs-Bosons	228
Die Entdeckung des Higgs-Bosons	Ultimativer Triumph des Standardmodells .....	230
Ist es wirklich das Higgs-Boson?	Experimentelles Portrait eines Teilchens.....	232
Präzisionsexperimente	0,001 159 652 .....	234
Das Myon	Schweres Schwesterteilchen des Elektrons .....	236
Überprüfung von Neutrinooszillationen	- Eindrucksvolle Bestätigung einer Abweichung.....	238
Messung der Neutrinomasse	Kleinste Masse größte Waage .....	240
Die Verletzung der $CP$ -Symmetrie in $B$ -Mesonen	Leben wir im Spiegel oder davor? .....	242
Seltene Zerfälle von $B$ -Mesonen	- Winzige Hinweise auf große Neuigkeiten? .....	244
Gestaltwandler unter sich	Von Charme, Schönheit und seltsamen Teilchen .....	246
Die Vermessung des CKM-Dreiecks	Das große Treffen .....	248
Die Hürden des Erfolgs	- Worüber neue Theorien springen müssen.....	250

10 Die Grenzen des Standardmodells.....	253
Warum wir weitersuchen    Ungeloste Probleme im Standardmodell .....	254
Neutrinomassen    Warum so klein? .....	256
GUT    Die große Vereinheitlichung.....	258
Supersymmetrie    Wie viel Symmetrie ist möglich?.....	260
Extra-Dimensionen    Vielleicht ist die Gravitation ja gar nicht so schwach .....	262
Stringtheorie    Eine vibrierende Schnur als Vereinheitlichung .....	264
Urknall    Das erste Teilchenlabor .....	266
Dunkle Materie    Eine Herausforderung für die Elementarteilchenphysik .....	268
Dark Sector: Dunkle Energie    Eine Herausforderung für die Kosmologie und Elementarteilchenphysik ....	270
Das starke <i>CP</i> -Problem    - Wie Theoretiker Probleme wegwaschen.....	272
Ist das Leben auf der Erde ein Zufall?    Verstehen wir, warum Leben entstehen konnte? .....	274
11 Die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells .....	277
Ist das Neutrino sein eigenes Antiteilchen?    - Die Suche nach dem neutrinolosen doppelten $\beta$ -Zerfall .....	278
Neue Teilchen am LHC    - Suchen mit einer konkreten Idee .....	280
Das unspezifische Unbekannte am LHC    Suchen ohne konkrete Idee.....	282
Zusätzliche Raumdimensionen am LHC    - Wohin verschwindet die Gravitation? .....	284
Das Rätsel der Dunklen Materie    Woher wissen wir, wonach wir suchen müssen?.....	286
Direkte Suche nach der Dunklen Materie    Auf der Jagd nach unsichtbaren Teilchen.....	288
Materie und Antimaterie    Warum gibt es uns überhaupt? .....	290
Teilchenphysik im Weltall    Hoch hinaus .....	292
Die Suche nach elektrischen Dipolmomenten    Wo ist die Antimaterie geblieben? .....	294
Die Suche nach Axionen    Zwei Fliegen mit einer Klappe .....	296
Protonenzerfall    Lang lebe das Proton! .....	298
Supernovae als Teilchenphysiklabore    Dramatische Ereignisse mit ungeahnten Fähigkeiten .....	300
12 Die Verbindung des Größten mit dem Kleinsten .....	303
Baryogenese    - Wieso gibt es (fast) keine Antimaterie im Universum?.....	304
Nukleosynthese im Urknall    Helium, Neutrinos und die Materie-Antimaterie-Asymmetrie .....	306

Elemententstehung in Sternen	Wie war das mit dem Sternenstaub? .....	308
Kosmischer Mikrowellenhintergrund	Ein Blick ins fruhe Universum und seine Zusammensetzung .....	310
Das Größte und das Kleinste	Einfluss der Neutrinomasse auf die großraumige Struktur im Universum...	312
Kosmische Strahlung	Teilchen aus dem All .....	314
Ultrahochenergetische kosmische Strahlung	Die Suche nach den kosmischen Hochleistungsbeschleunigern .....	316
Multimessenger-Astronomie	Neue Blicke ins Teilchen-Universum.....	318
Neutrinos von der Sonne	Ein Blick ins Innere der Sonne.....	320
Die Entwicklung des Universums	Blick in die sehr ferne Zukunft .....	322

Lohnt sich das alles? .....	325
Danksagung.....	327
Die Eigenschaften der Elementarteilchen – Übersicht und Tabellen.....	328
Glossar.....	329
Bildnachweis.....	345
Index .....	352
Das Autorenteam.....	360