Wilfried Kuhn
Janez Strnad

Quantenfeldtheorie

vieweg studium

Aufbaukurs Physik

Herausgegeben von Hanns Ruder

Wilfried Kuhn und Janez Strnad

Quantenfeldtheorie

Horst Rollnik

Quantentheorie

Band 1: Grundlagen – Wellenmechanik – Axiomatik

**Band 2: Quantifizierung physikalischer Systeme –
Pfadintegrale – relativistische Quantentheorie**

Etienne Guyon, Jean-Pierre Hulin und Luc Petit

Hydrodynamik

Grundkurs Physik

Herausgegeben von Hanns Ruder

Roman und Hannelore Sexl

Weißer Zwerge – Schwarze Löcher

Roman Sexl und Herbert Kurt Schmidt

Raum – Zeit – Relativität

Hanns und Margret Ruder

Die Spezielle Relativitätstheorie

Wilfried Kuhn
Janez Strnad

Quantenfeldtheorie

Photonen und ihre Deutung

Prof. Dr. Wilfried Kuhn
Institut für Didaktik der Physik
Justus-Liebig-Universität Gießen
Karl-Glöckner-Straße 21
35394 Gießen

Prof. Dr. Janez Strnad
Physik-Department und Stefan-Institut
Universität Ljubljana
6100 Ljubljana/Slowenia

Alle Rechte vorbehalten

© Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1995

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen der Bertelsmann Fachinformation GmbH.

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlag: Klaus Birk, Wiesbaden

Gedruckt auf säurefreiem Papier

ISBN 978-3-528-07275-9

ISBN 978-3-322-90949-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-90949-7

Vorwort

Es gibt eine Reihe von sehr guten Büchern zur Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes. Diesen ein weiteres hinzuzufügen, bedarf daher einer Begründung.

Darstellungen auf hohem mathematischem Niveau sind für den Spezialisten konzipiert. Einer der Begründer der Quantenelektrodynamik Richard Feynman hat aber auch in seinem Buch *QED - Die seltsame Theorie des Lichtes und der Materie* den sehr bemerkenswerten Versuch unternommen, einem breiten Publikum von interessierten Nichtspezialisten die Grundgedanken der QED ganz ohne mathematischen Formalismus näher zu bringen. Unsere Darstellung ist in der Mitte dieses breiten Literaturspektrums platziert. Es handelt sich um eine didaktisch reflektierte auf die wesentlichen Grundgedanken der Theorie gerichtete Darstellung, die sich sehr wohl des mathematischen Formalismus bedient.

Das Buch wendet sich an Studenten, die bereits die theoretischen Grundkurse in Mechanik, Elektrodynamik und Quantenmechanik absolviert haben, insbesondere an Lehramtskandidaten. Aufgrund langjähriger Erfahrungen in Lehrerfortbildung kennen wir die Defizite dieser Physikergruppe, die im Rahmen ihrer Studienordnung und auch nicht zuletzt wegen des hohen Anspruchsniveaus mit der Quantentheorie des elektromagnetischen Feldes ernsthaft nicht in Berührung gekommen ist. Die Folgen dieser bedauerlichen Situation sind nicht unbekannt. So wird immer noch die falsche Behauptung vertreten, zur theoretischen Deutung des Photoeffektes sei ein teilchenhaftes Photon notwendig. Wenn Lehrer gelegentlich in Fortbildungskursen erfahren, das Photon sei als Anregungszustand des elektromagnetischen Feldes zu deuten, dann sagt ihnen dies nur dann etwas, wenn sie die Grundgedanken der Quantentheorie auch in einem elementaren mathematischen Kontext kennen, der sie mit diesem Hintergrundwissen davor bewahrt, in der Schule Falsches zu lehren. Ebenso ist das Buch auch für die Studenten, die sich speziell mit der Quantentheorie befassen, z.B. im Rahmen der Hochenergiephysik, als Grundlage für ein weiterführendes Studium von nicht zu unterschätzendem Nutzen.

Obwohl es sich um ein Theorie-Buch handelt, wird in der Darstellung die Verbindung von Theorie und Experiment besonders herausgestellt. Dazu wurden auch neue Experimente mit einbezogen. Dadurch bekommt der interpretierte mathematische Formalismus noch mehr Farbe.

Um sich einen schnellen Überblick zu verschaffen, können beim ersten Durchgang des Buches längere Rechnungen, die durch Zeichen

markiert sind, zunächst überschlagen werden.

Die Gleichungen sind abschnittsweise numeriert. So bedeutet im gleichen Kapitel z.B. (1.3) die dritte Gleichung im ersten Abschnitt und im anderen Kapitel z.B. (2.1.3) die entsprechende Gleichung aus dem zweiten Kapitel.

Wir danken dem Deutschen Akademischen Austauschdienst, der mit mehreren Stipendien für J.S. unsere gemeinsame Arbeit an dem vorliegenden Buch am Institut für Didaktik der Physik der Justus-Liebig-Universität Gießen besonders förderte.

Gießen, 1994

Wilfried Kuhn

Janez Strnad

Inhaltsverzeichnis

Methodisches Konzept	1
1 Klassische Mechanik	5
1.1 Grundbegriffe	5
1.2 Harmonischer Oszillator	7
2 Quantenmechanik	10
2.1 Grundbegriffe	10
2.2 Schrödinger-Gleichung	12
2.3 Vertauschbarkeit von Operatoren	15
2.4 Harmonischer Oszillator	16
2.5 Hermite-Polynome	19
2.6 Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	22
2.7 Orthogonalität und Normierung	27
2.8 Entwicklung nach Eigenfunktionen	29
2.9 Erwartungswerte und Unschärfen	31
2.10 Matrizen	34
2.11 Selbstadjungierte Operatoren	38
2.12 Unschärfebeziehung	42
2.13 Kohärente Zustände	44
2.14 Heisenberg-Bild	54
2.15 Teilchenzahldarstellung und Dirac-Schreibweise	58
2.16 Gequetschte Zustände	63
2.17 Phase	67
2.18 Quantenmechanik und klassische Mechanik	78
3 Klassische Elektrodynamik	81
3.1 Grundlagen	81
3.2 Laufende und stehende Wellen	85
3.3 Schwingungen und Wellen	89
3.4 Modendichte	91
3.5 Dipolstrahlung	93
4 Theorie der Photonen	96
4.1 Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	96
4.2 Feldquantisierung mit stehenden Wellen	98

4.3	Feldquantisierung mit laufenden Wellen	104
4.4	Was sind eigentlich Photonen?	108
4.5	Kohärente Zustände	112
4.6	Quantentheorie und klassische Elektrodynamik	116
4.7	Vielmodenzustände	117
4.8	Statistische Gemische	122
4.9	Thermisches monochromatisches Licht	125
4.10	Thermisches Vielmoden-Licht	128
4.11	Strahlung des schwarzen Körpers	131
4.12	Strahlungsübergänge	133
4.13	Matrizelemente für Strahlungsübergänge	138
4.14	Spontane und stimulierte Emission und Absorption	139
4.15	Halbklassische Näherung	143
4.16	Einstein-Koeffizienten	145
4.17	Spontane Emission	148
4.18	Gibt es eine Photonen-Wellenfunktion?	150
4.19	Photonen und Elektronen	154
5	Effekte und Experimente	161
5.1	Laser	161
5.2	Intensitätsmessung	167
5.3	Interferenz	168
5.4	Photoionisation	178
5.5	Casimir-Kraft	183
5.6	Lamb-Verschiebung	189
5.7	Photonenkorrelationen erster Ordnung	193
5.8	Photonenkorrelationen zweiter Ordnung	197
5.9	Hohlraum-Quantenelektrodynamik und Mikromaser	205
5.10	Experiment mit einzelnen Photonen	210
5.11	Photonenzählung	216
5.12	Nichtklassisches Licht	218
5.13	Compton-Effekt	221
5.14	Photoeffekt	226
	Schlußwort	235
	Literatur	238
	Sachwortverzeichnis	239