

Universität

Potsdam



series of un-authorized lecture notes  
volume 10

theoretische physik V

# *Quantenmechanik II*

martin wilkens





# Inhalt

<b>1</b>	<b>W'hlg Prinzipien der QM</b>	<b>11</b>
1.1	Kinematik . . . . .	11
1.2	Dynamik . . . . .	17
1.3	Symmetrien und Erhaltungsgrößen . . . . .	18
1.4	Aus zwei mach eins – zusammengesetzte Systeme . . . . .	21
1.5	Gemische Zustände – Quantenmechanik 2.0 . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Mehrelektronen-Atome</b>	<b>29</b>
2.1	Atomare Einheiten (Atomic Units au) . . . . .	30
2.2	Breit-Pauli Hamiltonoperator . . . . .	31
2.3	Helium-artige . . . . .	34
2.4	Schalenmodell und Aufbauprinzip . . . . .	40
2.5	(L,S)-Terme bei Russel-Saunders Kopplung . . . . .	46

2.6	Schwere Atome und $jj$ -Kopplung . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Vielteilchentheorie in zweiter Quantisierung</b>	<b>51</b>
3.1	Identische Teilchen und Symmetrisierungspostulat . . . . .	51
3.2	Symmetrische und Antisymmetrische Zustände . . . . .	53
3.3	Leiteroperatoren . . . . .	55
3.4	Feldoperatoren . . . . .	60
3.5	Observable in Fockdarstellung . . . . .	61
3.6	Dynamik . . . . .	64
<b>4</b>	<b>Klein-Gordon Gleichung</b>	<b>67</b>
4.1	Freie Klein-Gordon-Gleichung . . . . .	69
4.1.1	Nichtrelativistischer Grenzfall . . . . .	70
4.1.2	Lösungen der freien Klein-Gordon-Gleichung . . . . .	71
4.1.3	Energiesatz . . . . .	73
4.1.4	Kontinuitätsgleichung . . . . .	74
4.2	Minimale Kopplung . . . . .	76
4.3	Zusammenfassung und Ausblick . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Dirac Gleichung</b>	<b>81</b>
5.1	Freie Diracgleichung . . . . .	81
5.2	Nichtrelativistischer Grenzfall, Pauligleichung . . . . .	86

---

5.3	$\gamma$ -Matrizen . . . . .	90
5.4	Lösungen der freien Diracgleichung . . . . .	93
5.5	Diracs Löchertheorie und Ladungskonjugation $\mathcal{C}$ . . . . .	97
5.6	Feynmans Positrontheorie und der Feynman-Propagator . . . . .	101
<b>6</b>	<b>Helizität, Chiralität und <math>\mathcal{PC}\mathcal{T}</math></b>	<b>107</b>
6.1	Helizität . . . . .	107
6.2	Parität $\mathcal{P}$ (Raumspiegelung) . . . . .	108
6.3	Chiralität und Weyl-Gleichungen . . . . .	110
6.4	Zeitumkehr $\mathcal{T}$ (Bewegungsumkehr) . . . . .	113
6.5	$\mathcal{CPT}$ . . . . .	114
<b>7</b>	<b>W'hlg: Klassische Feldtheorie</b>	<b>115</b>
7.1	Lagrange'sche Feldtheorie . . . . .	116
7.2	Energie-Impuls Tensor . . . . .	118
7.3	Noether . . . . .	120
7.4	Hamilton'sche Feldtheorie . . . . .	122
7.5	Ergänzung: Funktional und so . . . . .	124
<b>8</b>	<b>Kanonische Quantisierung</b>	<b>127</b>
8.1	Mikrokausalität . . . . .	130

<b>9 (Quanten-)Elektrodynamik</b>	<b>133</b>
9.1 W'hlg klassische Elektrodynamik . . . . .	133
9.2 Quantisierung des freien Strahlungsfeldes . . . . .	137
9.3 Quantisierung des freien Diracfeldes . . . . .	141
9.4 QED . . . . .	146
<b>10 Higgs</b>	<b>149</b>
<b>11 QCD</b>	<b>153</b>

# Vorwort

Vorgelegt werden hier Notizen zur Vorlesung “Quantenmechanik II” die als Kursvorlesung “Theoretische Physik V” im Format 3V1Ü in Potsdam im 7. Semester (1. Semester Master) angeboten wird.

Die Notizen spiegeln den Gang der Vorlesung wieder. An manchen Stellen sind sie ausführlicher, anderes ist in die Übungen verwiesen.

Die Inhalte des Kurses sind weniger “kanonisiert” als etwa im QM-I Kurs. Zunächst W’hlg, dann Atome und (nichtrelativistische) Vielteilchensysteme, gefolgt von relativistischer Quantenmechanik mit Klein-Gordon und Dirac Wellenmechanik als Auftakt, schließlich Elemente des Standardmodells incl. Quantisierung des Strahlungsfeldes, Diracfeldes usw ...



Die Notizen sind voller Fehler und erheben keinerlei Anspruch auf Originalität. Lehrbücher zur QM-II gibt es zuhauf, mehr als etwa zur klassischen Mechanik oder zur Elektrodynamik. Eine kurze kommentierte Auswahl:

**W’hlg QM-I** Unnötig zu sagen, aber geeignet ist jedes Lerhbuch der QM, z.B. Schwabel, Nolting, Greiner usw. Mein derzeitiger Favorit: “Quantenmechanik – Nichtrelativistische Quantentheorie” von Norbert Straumann. Schwei-

zer Präzisionsarbeit. Eher mathematisch orientiert, aber immer mit Bezug zur Physik. Auch der Nachfolgebund “Relativistische Quantentheorie – Eine Einführung in die Quantenfeldtheorie” folgt dieser Leitidee. Empfehlenswert – insbesondere wenn man eher theoretisch orientiert ist.

**Vielteilchensysteme** hier wird die Luft schon dünner (wenn es um “konkrete Anwendungen” geht), trotzdem

- Schwabl II: Solide. Empfehlenswert.
- Mahan “Many-Particle Systems” – so was wie der Jackson der Vielquantenphysik.
- Negele and Orland “Quantum Many-Particle Systems” – gut für den systematischen Aufstieg von Ein-Teilchen QM zur Vielteilchen-QM, aber nicht ganz so so breit wie Schwabl II.

**Relativistische Quantenmechanik** jedes Lehrbuch zur “Quantenmechanik II”, insbesondere aber

- Bjorken und Drell “Relativistische Quantenmechanik”: Der Klassiker. Wohltuend der Verzicht auf den formalen Schnick-Schnack der die heutige Generation von Lehrbüchern zur Quantenfeldtheorie prägt ...
- Schwabl II: Solide. Empfehlenswert.
- Itzykson und Zuber “Quantum Field Theory” (Kap. 1 und 2): Auch ein Buch der “klassischen Moderne”. Hart – aber für Aficionados durchaus empfehlenswert.

Allerdings muss gesagt werden, dass eigenständige Lehrbücher (mit Ausnahmen Bjorken-Drell) zur Relativistischen Quantenmechanik rar sind (Greiner ist zu verschwatzt). Der Grund ist einfach: die relativistische QM wird generell nur als “Durchgangsstation” zur Quantenfeldtheorie gesehen ...



**Quantenfeldtheorie** wie gesagt

- Itzykson und Zuber “Quantum Field Theory” ist ein Klassiker
- Mandl und Shaw “Quantum Field Theory” – etwas moderner als IZ

**Standardmodell** sollte jede Physikerin und jeder Physiker schon mal gesehen haben

- Griffiths “Introduction to Elementary Particle Physics” – cool, empfehlenswert.
- Cottingham und Greenwood “An introduction to the Standard Model of Particle Physics”, dito.

Abschließend eine Empfehlung für die Strandbar – oder einsame Abende unter dem Blue Moon: *Quantum Field Theory – in a nutshell* von A. Zee [Princeton University Press 2003; ISBN 0-691-01019-6]. Gewürzt mit Anekdoten zu den physikalischen Entdeckungen der Quantenfeldtheorie (QFT) vermittelt dieses Buch einen hervorragenden Überblick über die Konzepte der modernen QFT und ihre Genese ohne den Leser mit detaillierten Rechnungen zu traktieren.

