

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 Zusammenfassung</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2 Einleitung</b>  | <b>5</b>  |
| 2.1 Messung und Kollaps . . . . .  | 6         |
| 2.2 Die Entstehung der Bohmschen Mechanik . . . . .  | 8         |
| 2.2.1 Die Rolle des Messproblems für die Entstehung der<br>de Broglie-Bohm Theorie . . . . . | 9         |
| 2.3 Rezeption der Bohmschen Theorie . . . . .  | 11        |
| 2.4 Die Debatte um die Quantenmechanik . . . . .   | 14        |
| 2.5 John Bell und die Bohmsche Mechanik . . . . .  | 16        |
| <b>3 Quantenmechanik</b>   | <b>19</b> |
| 3.1 Grundlagen . . . . .   | 20        |
| 3.2 Das Messproblem . . . . .  | 21        |
| 3.3 Interpretation der Quantenmechanik . . . . .   | 23        |
| 3.3.1 Die Kopenhagener Deutung . . . . .   | 23        |
| 3.3.2 Die Ensemble-Interpretation . . . . .  | 26        |
| 3.4 Schlussfolgerungen . . . . .   | 29        |
| <b>4 Bohmsche Mechanik</b>   | <b>31</b> |
| 4.1 Motivation 1: Hamilton-Jacobi . . . . .  | 32        |
| 4.1.1 Anmerkung zur 1. Motivation . . . . .  | 33        |
| 4.2 Motivation 2: Wahrscheinlichkeitsstrom . . . . .   | 34        |
| 4.2.1 Anmerkung zur 2. Motivation . . . . .  | 35        |
| 4.3 Motivation 3: Symmetriebetrachtung . . . . .   | 35        |
| 4.3.1 Anmerkung zur 3. Motivation . . . . .  | 36        |
| 4.4 Die Quantengleichgewichtshypothese . . . . .   | 36        |
| 4.4.1 Herleitungen der Quantengleichgewichtshypothese . . . . .                              | 37        |
| 4.5 Die Nicht-Eindeutigkeit der Bohmschen Mechanik . . . . .                                 | 40        |
| 4.6 Die verschiedenen Schulen der de Broglie-Bohm Theorie . . . . .                          | 40        |
| 4.6.1 Das Quantenpotential . . . . .   | 41        |
| 4.6.2 Teilcheneigenschaften in der de Broglie-Bohm Theorie . . . . .                         | 43        |
| 4.7 Die Wellenfunktion . . . . .   | 44        |
| 4.8 Spin in der Bohmschen Mechanik . . . . .   | 46        |
| 4.9 Beweise über die Unmöglichkeit einer Theorie verborgener<br>Variablen . . . . .          | 47        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>5</b> | <b>Messung und »Observable« in der Bohmschen Mechanik</b>                         | <b>51</b> |
| 5.1      | Die Messung in der Bohmschen Mechanik . . . . .                                   | 52        |
| 5.1.1    | Effektive Wellenfunktion und Kollaps . . . . .                                    | 54        |
| 5.2      | Interpretation des Messprozesses: Kontextualität . . . . .                        | 54        |
| 5.2.1    | »Naiver Realismus« über Operatoren . . . . .                                      | 56        |
| 5.2.2    | Das Kochen-Specker-Theorem . . . . .  | 57        |
| <b>6</b> | <b>Lokalität, Realität, Kausalität and all that ...</b>                           | <b>61</b> |
| 6.1      | Das EPR-Experiment . . . . .  | 61        |
| 6.1.1    | Bohrs Erwiderung . . . . .  | 65        |
| 6.1.2    | Umformulierung des EPR-Experimentes nach Bohm . . . . .                           | 66        |
| 6.2      | Die Bellsche Ungleichung . . . . .  | 67        |
| 6.2.1    | Spinkorrelationen in einer lokalen Theorie verborgener<br>Variablen . . . . .     | 68        |
| 6.2.2    | Spinkorrelationen in der Quantenmechanik . . . . .                                | 70        |
| 6.2.3    | Experimentelle Bestätigung der Quantenmechanik . . . . .                          | 71        |
| 6.2.4    | Exkurs: Problembewusstsein . . . . .  | 72        |
| 6.3      | Folgerungen aus der Verletzung von Bells Ungleichung . . . . .                    | 72        |
| 6.3.1    | Determinismus . . . . .   | 74        |
| 6.3.2    | Lokalität und Separabilität . . . . .   | 74        |
| 6.3.3    | Realität . . . . .  | 76        |
| 6.3.4    | Widerspricht die Quantenmechanik der speziellen<br>Relativitätstheorie? . . . . . | 78        |
| 6.3.5    | Schlussfolgerungen . . . . .  | 79        |
| 6.4      | Das EPR-Experiment in der Bohmschen Mechanik . . . . .                            | 80        |
| <b>7</b> | <b>Anwendungen</b>  | <b>83</b> |
| 7.1      | Allgemeine Eigenschaften der Bohmschen Trajektorien . . . . .                     | 83        |
| 7.1.1    | Existenz und Eindeutigkeit der Lösung . . . . .                                   | 83        |
| 7.1.2    | Bohmsche Trajektorien können sich nicht schneiden . . . . .                       | 83        |
| 7.1.3    | Bohmsche Trajektorien reeller Wellenfunktionen . . . . .                          | 84        |
| 7.2      | Der harmonische Oszillator . . . . .  | 84        |
| 7.2.1    | Bohmsche Trajektorien beim harmonischen Oszillator . . . . .                      | 85        |
| 7.2.2    | Die Kritik Einsteins . . . . .  | 86        |
| 7.3      | Das Wasserstoffatom . . . . .   | 87        |
| 7.3.1    | Bohmsche Trajektorien beim Wasserstoff . . . . .                                  | 88        |
| 7.4      | Das Doppelspaltexperiment . . . . .   | 88        |
| 7.4.1    | Doppelspaltexperiment mit verzögerter Wahl . . . . .                              | 89        |
| 7.5      | Der Tunneleffekt . . . . .  | 94        |
| 7.5.1    | Tunneleffekt in der Quantenmechanik . . . . .                                     | 94        |
| 7.5.2    | Bohmsche Trajektorien beim Tunneleffekt . . . . .                                 | 96        |
| 7.5.3    | Das Tunnelzeit-Problem . . . . .  | 96        |
| 7.6      | Schrödingers Katze . . . . .  | 102       |
| 7.6.1    | Lösungsversuche . . . . .   | 102       |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 7.6.2     | Schrödingers Katze in der Bohmschen Mechanik . . . . .                       | 104        |
| 7.7       | Mehrteilchensysteme . . . . .  | 104        |
| 7.7.1     | Verschränkte und nichtverschränkte Zustände . . . . .                        | 105        |
| <b>8</b>  | <b>Verallgemeinerungen</b>   | <b>107</b> |
| 8.1       | Was ist eine »Bohm-artige« Theorie . . . . .                                 | 108        |
| 8.2       | Die Bohm-Dirac Theorie . . . . .   | 109        |
| 8.3       | Quantenfeldtheoretische Verallgemeinerungen . . . . .                        | 110        |
| 8.3.1     | Feld-beables für Bosonen und<br>Teilchen-beables für Fermionen . . . . .     | 110        |
| 8.3.2     | Feld-beables für Bosonen und<br>keinen beable-Status für Fermionen . . . . . | 111        |
| 8.3.3     | Fermionanzahl als beable . . . . .   | 112        |
| 8.4       | Verallgemeinerungen von Theorien . . . . .                                   | 114        |
| 8.5       | Zusammenfassung . . . . .  | 115        |
| <b>9</b>  | <b>Kritik an der Bohmschen Mechanik</b>                                      | <b>117</b> |
| 9.1       | Der Metaphysikvorwurf . . . . .  | 117        |
| 9.2       | Ockham's Razor . . . . .   | 119        |
| 9.3       | Rückkehr zur klassischen Physik? . . . . .                                   | 120        |
| 9.4       | Leere Wellenfunktionen . . . . .   | 120        |
| 9.5       | Die Asymmetrie der Bohmschen Mechanik . . . . .                              | 121        |
| 9.6       | Das ESSW-Experiment . . . . .  | 122        |
| 9.6.1     | Erwiderungen auf ESSW . . . . .  | 123        |
| 9.7       | Nichtlokalität . . . . .   | 124        |
| <b>10</b> | <b>Schlussbemerkungen</b>  | <b>127</b> |
| <b>A</b>  | <b>Hamilton-Jacobi-Theorie</b>   | <b>129</b> |
| <b>B</b>  | <b>Reine und gemischte Zustände</b>  | <b>131</b> |
| B.1       | Beschreibung gemischter Ensemble: Die Dichtematrix . . . . .                 | 133        |
| <b>C</b>  | <b>Signal-Lokalität und Kausalität</b>                                       | <b>135</b> |
|           | <b>Literaturverzeichnis</b>  | <b>141</b> |
|           | <b>Namens- und Sachverzeichnis</b>   | <b>153</b> |