

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der mathematischen Hintergründe</b> . . . . .	XXIII
<b>Die Autoren</b> . . . . .	XXV

## Teil I Mechanik

<b>1 Die Newton'schen Axiome</b> . . . . .	3
1.1 Definitionen und Grundlagen . . . . .	4
1.2 Die Newton'schen Axiome . . . . .	8
1.3 Eindimensionale Bewegung im homogenen Schwerfeld . . . . .	14
1.4 Energiesatz in einer Dimension . . . . .	20
1.5 Bewegung in drei Dimensionen . . . . .	25
1.6 Energieerhaltung und konservative Kräfte . . . . .	30
Aufgaben . . . . .	38
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben . . . . .	41
Antworten zu den Selbstfragen . . . . .	47
Literatur . . . . .	48
<b>2 Koordinatentransformationen und beschleunigte Bezugssysteme</b> . . . . .	49
2.1 Drehungen von kartesischen Koordinatensystemen . . . . .	50
2.2 Galilei-Transformationen . . . . .	57
2.3 Beschleunigte Bezugssysteme . . . . .	61
2.4 Kräfte in rotierenden Bezugssystemen . . . . .	67
2.5 Nichtkartesische Koordinatensysteme . . . . .	73
Aufgaben . . . . .	79
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben . . . . .	81
Literatur . . . . .	85
<b>3 Systeme von Punktmassen</b> . . . . .	87
3.1 Allgemeine Aussagen und Erhaltungssätze . . . . .	88
3.2 Das Zweikörper-Zentralkraftproblem . . . . .	93
3.3 Das Kepler-Problem . . . . .	97
3.4 Elastische Stöße und Streuung . . . . .	103

3.5	Das reduzierte Dreikörperproblem	111
3.6	Gezeitenkräfte	114
3.7	Mechanische Ähnlichkeit und der Virialsatz	117
	Aufgaben	119
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	121
	Antworten zu den Selbstfragen	125
	Literatur	126
<b>4</b>	<b>Starre Körper</b>	<b>127</b>
4.1	Freiheitsgrade des starren Körpers	128
4.2	Kinetische Energie und Drehimpuls	131
4.3	Tensoren	133
4.4	Trägheitstensor und Trägheitsmomente	137
4.5	Kontinuierliche Massenverteilungen	143
4.6	Bewegungsgleichungen des starren Körpers	147
4.7	Rotation des Kreisel	149
	Aufgaben	156
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	158
	Antworten zu den Selbstfragen	163
	Literatur	164
<b>5</b>	<b>Lagrange-Formalismus und Variationsrechnung</b>	<b>165</b>
5.1	Systeme mit Zwangsbedingungen	166
5.2	Lagrange-Gleichungen erster Art	171
5.3	Lagrange-Gleichungen zweiter Art	176
5.4	Beispiele zur Anwendung des Lagrange-Formalismus	181
5.5	Variationsrechnung	186
5.6	Symmetrien und Erhaltungssätze	194
	Aufgaben	200
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	202
	Antworten zu den Selbstfragen	208
	Literatur	209
<b>6</b>	<b>Schwingungen</b>	<b>211</b>
6.1	Freie Schwingungen	212
6.2	Gedämpfte Schwingungen	219
6.3	Erzwungene Schwingungen und Resonanz	222
6.4	Kleine Schwingungen gekoppelter Systeme	225
6.5	Anwendungen gekoppelter Oszillatoren	231
	Aufgaben	235
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	237

<b>7</b>	<b>Hamilton-Formalismus</b>	243
7.1	Hamilton-Funktion und kanonische Gleichungen	244
7.2	Kanonische Transformationen	249
7.3	Grundlagen der Hamilton-Jacobi-Theorie	254
	So geht's weiter	259
	Aufgaben	262
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	264
	Literatur	269
<b>8</b>	<b>Kontinuumsmechanik</b>	271
8.1	Lineare Kette und Übergang zum Kontinuum	272
8.2	Schwingende Saite	277
8.3	Fourier-Reihen	281
8.4	Lagrange-Formalismus für Felder	287
8.5	Grundlagen der Elastizitätstheorie	290
8.6	Ideale Fluidodynamik	296
8.7	Viskosität und Navier-Stokes-Gleichung	303
	So geht's weiter	307
	Aufgaben	311
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	313
	Antworten zu den Selbstfragen	317
	Literatur	318
<b>9</b>	<b>Spezielle Relativitätstheorie</b>	319
9.1	Anfang und Ende der Äther-Vorstellung	321
9.2	Lorentz-Transformationen	325
9.3	Minkowski-Raum	330
9.4	Viererformalismus	337
	So geht's weiter	344
	Aufgaben	346
	Lösungen zu den Aufgaben	348
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	349
	Literatur	353
<b>10</b>	<b>Relativistische Mechanik</b>	355
10.1	Punktteilchen, Ruhemasse und Viererimpuls	356
10.2	Relativistische Bewegungsgleichungen	357
10.3	Relativistische Teilchenstöße	360
	Aufgaben	370
	Lösungen zu den Aufgaben	373
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	374
	Literatur	378

**Teil II Elektrodynamik**

<b>11 Die Maxwell-Gleichungen</b>	381
11.1 Aufstellung der fundamentalen Maxwell-Gleichungen	383
11.2 Die Lichtgeschwindigkeit in den Maxwell-Gleichungen	397
11.3 Maßsysteme	397
11.4 Energie- und Impulsbilanz	400
11.5 Elektrodynamische Potenziale	404
Aufgaben	408
Lösungen zu den Aufgaben	411
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	412
Literatur	417
<b>12 Elektrostatik</b>	419
12.1 Das elektrostatische Potenzial	420
12.2 Green'sche Funktionen und Randwertprobleme	422
12.3 Randbedingungen auf Leiteroberflächen	425
12.4 Bildladungsmethode	426
12.5 Elektrische Kapazität	431
12.6 Elektrostatische Energie	434
Aufgaben	437
Lösungen zu den Aufgaben	439
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	440
Literatur	443
<b>13 Vollständige Funktionensysteme: Fourier-Transformation und Multipolentwicklung</b>	445
13.1 Das Fourier-Integral	446
13.2 Integrale in der komplexen Ebene	450
13.3 Vollständige Funktionensysteme	458
13.4 Multipolentwicklung in kartesischen Koordinaten	462
13.5 Die Kugelflächenfunktionen	466
13.6 Multipolentwicklung in Kugelkoordinaten	469
Aufgaben	474
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	476
Literatur	484

<b>14</b>	<b>Elektrische Felder in Materie</b>	<b>485</b>
14.1	Makroskopische Elektrostatik	486
14.2	Anschlussbedingungen an Grenzflächen	490
14.3	Potenzialgleichung in Dielektrika	492
14.4	Elektrostatische Energie in linearen Medien	495
	Aufgaben	499
	Lösungen zu den Aufgaben	502
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	503
	Literatur	509
<b>15</b>	<b>Magnetismus und elektrische Ströme</b>	<b>511</b>
15.1	Magnetostatik im Vakuum	512
15.2	Makroskopische Magnetostatik	515
15.3	Lösungsmethoden der Magnetostatik	522
15.4	Magnetostatische Energie	526
15.5	Bewegung von geladenen Teilchen in Magnetfeldern	530
15.6	Elektromotorische Kräfte	533
15.7	Makroskopische Elektrodynamik	538
	Aufgaben	543
	Lösungen zu den Aufgaben	545
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	546
	Literatur	551
<b>16</b>	<b>Ausbreitung elektromagnetischer Wellen</b>	<b>553</b>
16.1	Ausbreitung im Vakuum	554
16.2	Ausbreitung in homogenen, linearen Medien	560
16.3	Ausbreitung in Hohlleitern	567
	So geht's weiter	571
	Aufgaben	575
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	578
	Literatur	584
<b>17</b>	<b>Optik</b>	<b>585</b>
17.1	Wellenoptik kontra geometrische Optik	586
17.2	Brechung und Reflexion an Grenzflächen	586
17.3	Die Eikonalgleichung	592
17.4	Beugung	596
	Aufgaben	605
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	607
	Literatur	612

<b>18</b>	<b>Relativistische Formulierung der Elektrodynamik</b>	613
18.1	Repetitorium: Spezielle Relativitätstheorie	614
18.2	Manifest Lorentz-kovariante Maxwell-Gleichungen	617
18.3	Lorentz-Transformation von Feldstärken	620
18.4	Elektromagnetische Viererkräfte	625
18.5	Relativistische Effekte in der Wellenausbreitung	627
18.6	Relativistische Elektrodynamik in Materie	629
	Aufgaben	636
	Lösungen zu den Aufgaben	638
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	639
	Literatur	643
<b>19</b>	<b>Abstrahlung elektromagnetischer Wellen</b>	645
19.1	Retardierte Potenziale	646
19.2	Bewegte Punktladung: Liénard-Wiechert-Potenziale	649
19.3	Der Hertz'sche Dipol	656
19.4	Multipolstrahlung	658
19.5	Abstrahlung durch relativistisch bewegte Teilchen	661
	Aufgaben	668
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	671
	Literatur	679
<b>20</b>	<b>Lagrange- und Hamilton-Formalismus in der Elektrodynamik</b>	681
20.1	Bewegtes Punktteilchen – auch relativistisch	682
20.2	Das elektromagnetische Feld	686
20.3	Das kovariante Noether-Theorem für Felder	690
	So geht's weiter	693
	Aufgaben	695
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	696
	Literatur	699
<b>Teil III Quantenmechanik</b>		
<b>21</b>	<b>Die Entstehung der Quantenphysik</b>	703
21.1	Probleme der klassischen Physik	704
21.2	Hohlraumstrahlung	706
21.3	Lichtquanten und Materiewellen	708
21.4	Quantisierungsregeln von Bohr und Sommerfeld	716
21.5	Emission, Absorption und Einstein-Koeffizienten	719
21.6	Der Spin	720

Aufgaben	723
Lösungen zu den Aufgaben	725
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	726
Literatur	728
<b>22 Wellenmechanik</b>	<b>729</b>
22.1 Unbestimmtheit für materielle Teilchen	730
22.2 Materiewellen für kräftefreie Teilchen	732
22.3 Wellenmechanik mit Kräften	740
22.4 Erhaltung der Wahrscheinlichkeit	746
So geht's weiter	749
Aufgaben	751
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	754
Literatur	759
<b>23 Formalismus der Quantenmechanik</b>	<b>761</b>
23.1 Hilbert-Räume	762
23.2 Lineare Operatoren	769
23.3 Spektralzerlegung von selbstadjungierten Operatoren	778
23.4 Inverse und unitäre Operatoren	782
Aufgaben	785
Lösungen zu den Aufgaben	788
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	789
Literatur	794
<b>24 Observablen, Zustände und Unbestimmtheit</b>	<b>795</b>
24.1 Die Kopenhagener Interpretation	796
24.2 Unbestimmtheitsrelationen	803
24.3 Ist die Quantenmechanik vollständig?	804
24.4 Gemischte Zustände	810
Aufgaben	815
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	818
Literatur	822
<b>25 Zeitentwicklung und Bilder</b>	<b>823</b>
25.1 Systeme mit wenigen Zuständen	824
25.2 Dyson-Reihe für den Zeitentwicklungsoperator	830
25.3 Die Bilder der Quantenmechanik	832
25.4 Zeitentwicklung von Gemischen	836
25.5 Pfadintegrale	836
Aufgaben	841
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	843
Literatur	847

<b>26</b>	<b>Eindimensionale Quantensysteme</b>	849
26.1	Potenzialprobleme und Potenzialstufe	850
26.2	Potenzialwall, Potenzialtopf und Tunneleffekt	857
26.3	Der harmonische Oszillator	863
26.4	Kohärente Zustände	867
26.5	Numerische Lösung der Schrödinger-Gleichung	872
	So geht's weiter	875
	Aufgaben	878
	Lösungen zu den Aufgaben	881
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	882
	Literatur	887
<b>27</b>	<b>Symmetrien und Erhaltungssätze</b>	889
27.1	Symmetrien und Erhaltungsgrößen	890
27.2	Raumspiegelungen	891
27.3	Translationen im Raum	894
27.4	Bandstruktur für gitterperiodische Potenziale	895
27.5	Drehungen und Drehimpuls	900
27.6	Eigenvektoren und Eigenwerte des Drehimpulses	903
27.7	Addition von Drehimpulsen	908
	So geht's weiter	911
	Aufgaben	912
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	914
	Literatur	918
<b>28</b>	<b>Zentralkräfte – das Wasserstoffatom</b>	919
28.1	Relativbewegung im Zweiteilchensystem	920
28.2	Kugelförmiger Potenzialtopf	925
28.3	Gebundene Zustände des Wasserstoffatoms	927
28.4	Algebraische Lösung des Wasserstoffatoms	934
	Aufgaben	937
	Lösungen zu den Aufgaben	939
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	940
	Literatur	946
<b>29</b>	<b>Elektromagnetische Felder und der Spin</b>	947
29.1	Beobachtbarkeit der Potenziale	948
29.2	Geladenes Teilchen im homogenen Magnetfeld	951
29.3	Der Spin des Elektrons	955
	Aufgaben	963
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	965
	Literatur	970



<b>30</b>	<b>Störungstheorie und Virialsatz</b>	<b>971</b>
30.1	Zeitunabhängige Störungen	972
30.2	Allgemeine Aussagen über Erwartungswerte	981
30.3	Zeitabhängige Störungen	985
	Aufgaben	992
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	995
<b>31</b>	<b>Mehrteilchensysteme und weitere Näherungsmethoden</b>	<b>1005</b>
31.1	Mehrteilchensysteme	1006
31.2	Das Variationsverfahren	1014
31.3	Die semiklassische Näherung	1016
	So geht's weiter	1026
	Aufgaben	1029
	Lösungen zu den Aufgaben	1032
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	1033
	Literatur	1043
<b>32</b>	<b>Streutheorie</b>	<b>1045</b>
32.1	Potenzialstreuung	1046
32.2	Partialwellenanalyse	1052
32.3	Resonanzen	1060
32.4	Elastische Streuung identischer Teilchen	1061
	So geht's weiter	1066
	Aufgaben	1069
	Lösungen zu den Aufgaben	1071
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	1072
	Literatur	1077
 <b>Teil IV Thermodynamik und statistische Physik</b>		
<b>33</b>	<b>Phänomenologische Begründung der Thermodynamik</b>	<b>1081</b>
33.1	Entwicklung der Thermodynamik	1082
33.2	Was ist Thermodynamik?	1088
33.3	Temperatur, Zustandsgrößen und Zustandsänderungen	1091
33.4	Arbeit und Wärme	1098
33.5	Die idealen Gasgesetze	1100
33.6	Der erste Hauptsatz	1102
33.7	Der zweite Hauptsatz (1. Teil)	1108
33.8	Der zweite Hauptsatz (2. Teil)	1118
	Aufgaben	1123
	Lösungen zu den Aufgaben	1126
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	1127
	Literatur	1133

<b>34</b>	<b>Statistische Begründung der Thermodynamik</b>	<b>.1135</b>
34.1	Das Grundpostulat der statistischen Physik	.1136
34.2	Statistische Definition der absoluten Temperatur	.1153
34.3	Statistische Definition der Entropie	.1157
34.4	Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung	.1161
	Aufgaben	.1171
	Lösungen zu den Aufgaben	.1174
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	.1175
	Literatur	.1181
<b>35</b>	<b>Einfache thermodynamische Anwendungen</b>	<b>.1183</b>
35.1	Thermodynamische Funktionen	.1184
35.2	Extremaleigenschaften, Gleichgewicht und Stabilität	.1193
35.3	Das ideale Gas	.1196
35.4	Das Van-der-Waals-Gas	.1201
35.5	Der Joule-Thomson-Effekt	.1204
35.6	Allgemeine Kreisprozesse und der Carnot'sche Wirkungsgrad	.1207
35.7	Chemisches Potenzial und Phasenübergänge	.1210
	Aufgaben	.1215
	Lösungen zu den Aufgaben	.1217
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	.1218
	Literatur	.1222
<b>36</b>	<b>Ensembles und Zustandssummen</b>	<b>.1223</b>
36.1	Ensembles	.1224
36.2	Die kanonische Zustandssumme	.1227
36.3	Großkanonische Zustandssumme und großkanonisches Potenzial	.1235
36.4	Ideales Gas im Schwerfeld	.1238
36.5	Chemische Reaktionen idealer Gasgemische	.1240
36.6	Einfache Modelle für magnetische Systeme	.1245
	So geht's weiter	.1249
	Aufgaben	.1252
	Lösungen zu den Aufgaben	.1254
	Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	.1255
	Literatur	.1259

<b>37 Quantenstatistik</b>	.1261
37.1 Grundlagen der Quantenstatistik	.1262
37.2 Besetzungszahldarstellung	.1264
37.3 Ideale Quantengase	.1266
37.4 Ideale Fermi-Gase	.1269
37.5 Ideale Bose-Gase	.1271
37.6 Relativistische ideale Quantengase	.1277
37.7 Wärmekapazität fester Körper	.1282
So geht's weiter	.1287
Aufgaben	.1289
Lösungen zu den Aufgaben	.1291
Ausführliche Lösungen zu den Aufgaben	.1292
Literatur	.1297
<b>Abbildungsnachweis</b>	.1299
<b>Sachverzeichnis</b>	.1301

---

## Verzeichnis der mathematischen Hintergründe

1.1	Vektorräume	6
1.2	Metrische und normierte Räume	8
1.3	Skalarprodukt, euklidische Räume	9
1.4	Differenzialgleichungen	15
1.5	Differenzialgleichungen – Lösungsverfahren	16
1.6	Vektorprodukt und Levi-Civita-Symbol	27
1.7	Differenzialoperatoren	31
1.8	Taylor'scher Satz	33
1.9	Der Satz von Stokes	35
2.1	Matrizen I – Definition und grundlegende Rechenregeln	52
2.2	Matrizen II – Determinanten	54
2.3	Matrizen III – Matrixinversion und Rechenregeln für Determinanten	59
2.4	Gruppen – Einführung in die Gruppentheorie	62
4.1	Tensoren	134
4.2	Diagonalisierbarkeit	140
5.1	Mannigfaltigkeiten – Eine Verallgemeinerung euklidischer Räume	168
5.2	Funktionale	187
6.1	Lineare Differenzialgleichungen – Homogene und inhomogene Differenzialgleichungen, Fundamentalsystem	214
6.2	Komplexe Zahlen – Definition und Rechenregeln	216
6.3	Lineare Differenzialgleichungen – Lösungsstrategien	218
7.1	Legendre-Transformationen – Grundlagen und anschauliche Bedeutung	246
8.1	Funktionenfolgen und Funktionenreihen – Punktweise und gleichförmige Konvergenz	282
9.1	Dualraum	340
11.1	Distributionen	386
11.2	Rechenregeln für Distributionen	387
11.3	Integralsätze der Vektoranalysis – Satz von Gauß und Satz von Stokes	388
13.1	Komplexe Funktionen I – Definition von holomorphen Funktionen und die Cauchy-Riemann'schen Differenzialgleichungen	452
13.2	Komplexe Funktionen II – Potenzreihen und Beispiele	454

13.3	Komplexe Funktionen III – Singularitäten und meromorphe Funktionen . . . .	455
13.4	Separationsansatz zum Lösen partieller Differenzial- gleichungen . . . . .	467
16.1	Bessel-Funktionen . . . . .	561
23.1	Operatoren – Hermitesche und selbstadjungierte Operatoren . . . . .	777
23.2	Spektralprojektoren . . . . .	783
26.1	Verzweigungspunkte komplexer Funktionen . . . . .	862
27.1	Lie-Gruppen und Lie-Algebren . . . . .	892
27.2	Darstellungen einer Lie-Gruppe und Lie-Algebra . . . . .	896
28.1	Frobenius-Sommerfeld-Methode – Verallgemeinerte Potenzreihenansätze . .	924
28.2	Laguerre-Polynome . . . . .	930
30.1	Asymptotische Reihen . . . . .	974
32.1	Gammafunktion . . . . .	1065
33.1	Homogene Funktionen . . . . .	1095
34.1	Symplektische Struktur . . . . .	1138
34.2	Differenzialformen – Ein Ausblick in die Differenzialgeometrie . . . . .	1139
34.3	Volumen und Oberfläche der $n$ -Sphäre . . . . .	1146
34.4	Kolmogorows Axiome und der Bayes'sche Satz . . . . .	1164
36.1	Gauß'sche Integrale . . . . .	1232
37.1	Riemann'sche Zetafunktion – Einige Eigenschaften . . . . .	1274

Theoretische Physik

Bartelmann, M.; Feuerbacher, B.; Krüger, T.; Lüst, D.;

Rebhan, A.; Wipf, A.

2015, XXVI, 1315 S. 486 Abb., 454 Abb. in Farbe.,

Hardcover

ISBN: 978-3-642-54617-4