

Grundkurs Theoretische Physik

Von Prof. Dr. phil. nat. Albrecht Lindner
Universität Hamburg

2., überarbeitete und erweiterte Auflage
Mit 73 Bildern



B. G. Teubner Stuttgart 1997

Inhalt

	Lehrbuchempfehlungen	14
	Symbole	16
	Wichtige Konstanten	22
1	Grundbedingungen der Erfahrung	23
1.1	Vektorrechnung	23
1.1.1	Raum und Zeit	23
1.1.2	Vektoralgebra	25
1.1.3	Bahnkurven	29
1.1.4	Vektorfelder	32
1.1.5	Gradient (Steigungsdichte)	33
1.1.6	Divergenz (Quelldichte)	34
1.1.7	Rotation (Wirbelldichte)	36
1.1.8	Umformung von Produkten, Laplace-Operator	37
1.1.9	Integralsätze für Vektorausdrücke	39
1.1.10	Deltafunktion	40
1.1.11	Fouriertransformation	45
1.1.12	Berechnung eines Vektorfeldes aus seinen Quellen und Wirbeln	47
1.1.13	Unstetigkeitsflächen von Vektorfeldern	50
1.2	Koordinaten	51
1.2.1	Orthogonale Transformationen und Eulerwinkel	51
1.2.2	Allgemeine Koordinaten und ihre Grundvektoren	53
1.2.3	Koordinatentransformationen	56
1.2.4	Begriff des Tensors	57
1.2.5	Gradient, Divergenz und Rotation in allgemeinen Koordinaten	61
1.2.6	Tensorerweiterung, Christoffel-Symbole	63
1.2.7	Umformung partieller Differentialquotienten	65
1.3	Physikalische Größen und ihre Fehlergrenzen	67
1.3.1	Einleitung	67
1.3.2	Mittelwert und mittlerer Fehler	69
1.3.3	Fehlerverteilung	70
1.3.4	Fehlerfortpflanzung	72
1.3.5	Endliche Meßreihen und ihre mittleren Fehler	73
1.3.6	Ausgleichsrechnung	74
1.3.7	Methode der kleinsten Quadrate	75

2	Mechanik	77
2.1	Grundbegriffe	77
2.1.1	Kraft und Gegenkraft	77
2.1.2	Arbeit und potentielle Energie	78
2.1.3	Zwangskräfte, virtuelle Verrückung und Prinzip der virtuellen Arbeit	80
2.1.4	Allgemeine Koordinaten und Kräfte	81
2.1.5	Lagrange-Parameter und Lagrangesche Gleichungen erster Art	83
2.1.6	Kepler-Problem	84
2.1.7	Zusammenfassung: Grundbegriffe	90
2.2	Newtonsche Mechanik	91
2.2.1	Kräftefreie Bewegung	91
2.2.2	Schwerpunktsatz	92
2.2.3	Stoßgesetze	95
2.2.4	Newtonsches Bewegungsgesetz	99
2.2.5	Erhaltungsgrößen und Mittelwerte über die Zeit	100
2.2.6	Planetenbewegung als Zweikörperproblem, Schwerkraft	102
2.2.7	Schwerebeschleunigung	103
2.2.8	Fallgesetze (auch bei Luftwiderstand)	106
2.2.9	Der starre Körper	107
2.2.10	Trägheitstensor	108
2.2.11	Hauptachsentransformation	110
2.2.12	Beschleunigte Bezugssysteme, Scheinkräfte	112
2.2.13	Zusammenfassung: Newtonsche Mechanik	114
2.3	Lagrangesche Mechanik	115
2.3.1	D'Alembertsches Prinzip	115
2.3.2	Nebenbedingungen	116
2.3.3	Lagrangesche Gleichungen (zweiter Art)	118
2.3.4	Geschwindigkeitsabhängige Kräfte und Reibung	119
2.3.5	Erhaltungsgrößen, kanonischer und mechanischer Impuls	121
2.3.6	Physikalisches Pendel	123
2.3.7	Gedämpfte Schwingung	128
2.3.8	Erzwungene Schwingung	130
2.3.9	Gekoppelte Schwingungen, Normalkoordinaten	134
2.3.10	Zeitabhängiger Schwinger, parametrische Resonanz	138
2.3.11	Zusammenfassung: Lagrangesche Mechanik	142
2.4	Hamiltonsche Mechanik	143
2.4.1	Hamiltonfunktion und Hamiltonsche Gleichungen	143
2.4.2	Poissonklammern	146
2.4.3	Kanonische Transformationen	147
2.4.4	Infinitesimale kanonische Transformationen, Liouville-Gleichung	150

2.4.5	Erzeugende Funktionen	152
2.4.6	Transformationen auf bewegte Bezugssysteme, Störungsrechnung	155
2.4.7	Hamilton-Jacobische Theorie	156
2.4.8	Integralprinzipien	160
2.4.9	Bewegung in einem Zentralfeld	164
2.4.10	Schwerer symmetrischer Kreisel und räumliches Pendel	165
2.4.11	Kanonische Transformation des zeitabhängigen Schwingers	170
2.4.12	Zusammenfassung: Hamiltonsche Mechanik	173
3	Elektrodynamik	175
3.1	Elektrostatik	175
3.1.1	Überblick Elektrodynamik	175
3.1.2	Coulombsches Gesetz – Fern- oder Nahwirkung?	178
3.1.3	Elektrostatisches Potential	181
3.1.4	Dipole	183
3.1.5	Polarisation und elektrische Flußdichte	186
3.1.6	Feldgleichungen der Elektrostatik	189
3.1.7	Rechenprobleme der Elektrostatik	191
3.1.8	Die Energie des elektrostatischen Feldes	194
3.1.9	Der Maxwellsche Spannungstensor in der Elektrostatik	195
3.1.10	Zusammenfassung: Elektrostatik	197
3.2	Stationäre Ströme, Magnetostatik	199
3.2.1	Elektrischer Strom	199
3.2.2	Ohmsches Gesetz	200
3.2.3	Kräfte zwischen Strömen	202
3.2.4	Flußdichte \vec{B} des Magnetfeldes	204
3.2.5	Magnetische Momente	205
3.2.6	Vektorpotential	207
3.2.7	Beschränkung auf makroskopisch meßbare Größen beim Magnetismus	209
3.2.8	Magnetische Wechselwirkung	213
3.2.9	Induktivität	213
3.2.10	Zusammenfassung: Stationäre Ströme, Magnetostatik	216
3.3	Das elektromagnetische Feld	217
3.3.1	Erhaltungssatz der Ladung und Maxwellscher Verschiebungsstrom	217
3.3.2	Induktionsgesetz von Faraday und Lenzsche Regel	218
3.3.3	Maxwellgleichungen	219
3.3.4	Zeitabhängige Potentiale	221
3.3.5	Poyntingscher Satz	224
3.3.6	Schwingkreis	226

3.3.7	Impuls des Strahlungsfeldes	227
3.3.8	Wellenfortpflanzung in Isolatoren	228
3.3.9	Spiegelung und Brechung an einer Ebene	232
3.3.10	Wellenfortpflanzung in Leitern	235
3.3.11	Zusammenfassung: Maxwellgleichungen	237
3.4	Lorentz-Invarianz	239
3.4.1	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	239
3.4.2	Lorentz-Transformation	240
3.4.3	Vierervektoren	243
3.4.4	Beispiele für Vierervektoren	246
3.4.5	Erhaltungssätze	249
3.4.6	Kovarianz der mikroskopischen Maxwellgleichungen	250
3.4.7	Kovarianz der makroskopischen Maxwellgleichungen	253
3.4.8	Transformationsverhalten elektromagnetischer Felder	255
3.4.9	Relativistische Dynamik freier Teilchen	256
3.4.10	Relativistische Dynamik mit äußeren Kräften	258
3.4.11	Energie-Impuls-Spannungs-Tensor	259
3.4.12	Zusammenfassung: Lorentz-Invarianz	260
3.4.13	Ergänzung: Hamilton-Formalismus für Felder	261
3.5	Strahlungsfelder	265
3.5.1	Lösungen der inhomogenen Wellengleichungen	265
3.5.2	Strahlungsfelder	268
3.5.3	Strahlungsenergie	270
3.5.4	Strahlungsfelder von Punktladungen	271
3.5.5	Strahlungsfelder schwingender Dipole	273
3.5.6	Strahlungsleistung bei Dipol-, Brems- und Synchrotronstrahlung	274
3.5.7	Zusammenfassung: Strahlungsfelder	278
4	Quantenmechanik I	279
4.1	Welle-Teilchen-Dualismus	279
4.1.1	Komplementäre Größen und Heisenbergs Unschärfebeziehungen	279
4.1.2	Welle-Teilchen-Dualismus	281
4.1.3	Wahrscheinlichkeitswellen	282
4.1.4	Reine Zustände und ihre Überlagerung (Superpositionsprinzip)	284
4.1.5	Der Hilbertraum (vier Axiome)	286
4.1.6	Darstellung von Hilbertvektoren	289
4.1.7	Uneigentliche Hilbertvektoren	291
4.1.8	Zusammenfassung: Welle-Teilchen-Dualismus	292
4.2	Operatoren und Observable	293
4.2.1	Lineare und antilineare Operatoren	293
4.2.2	Matrixelemente und Darstellung linearer Operatoren	295

4.2.3	Zugeordnete Operatoren	296
4.2.4	Eigenwerte und Eigenvektoren	299
4.2.5	Entwicklung nach einer Basis orthogonaler Operatoren	301
4.2.6	Observable – die grundlegenden Annahmen	303
4.2.7	Unschärfe	304
4.2.8	Feldoperatoren	306
4.2.9	Phasenoperatoren und Welle-Teilchen-Dualismus	309
4.2.10	Binäre Systeme, Pauli-Operatoren	312
4.2.11	Dichteoperator – reine Zustände und Gemische	315
4.2.12	Raumspiegelung und Zeitumkehr	318
4.2.13	Zusammenfassung: Operatoren und Observable	319
4.3	Korrespondenzprinzip	321
4.3.1	Vertauschbeziehungen	321
4.3.2	Orts- und Impulsdarstellung	322
4.3.3	Die Wahrscheinlichkeitsamplitude $\langle \vec{r} \vec{p} \rangle$	323
4.3.4	Wellenfunktionen	325
4.3.5	Wignerfunktion	327
4.3.6	Spin (Drall)	328
4.3.7	Korrespondenzprinzip	329
4.3.8	Drehimpulsoperator	332
4.3.9	Kugelfunktionen	336
4.3.10	Kopplung von Drehimpulsen	339
4.3.11	Zusammenfassung: Korrespondenzprinzip	341
4.4	Zeitabhängigkeit	343
4.4.1	Heisenberg-Gleichung und Satz von Ehrenfest	343
4.4.2	Zeitabhängigkeit: Heisenberg- und Schrödingerbild	344
4.4.3	Zeitabhängigkeit des Dichteoperators	347
4.4.4	Zeitabhängige Wechselwirkung, Dirac-Bild	350
4.4.5	Stromdichte	352
4.4.6	Zusammenfassung: Zeitabhängigkeit	354
4.5	Zeitunabhängige Schrödinger-Gleichung	355
4.5.1	Eigenwertgleichung für die Energie	355
4.5.2	Zurückführung auf gewöhnliche Differentialgleichungen	356
4.5.3	Freie Teilchen und Kastenpotential	357
4.5.4	Harmonischer Oszillator	362
4.5.5	Das Wasserstoffatom	365
4.5.6	Zeitunabhängige Störungstheorie	371
4.5.7	Variationsverfahren	373
4.5.8	Niveaufspaltung	374
4.5.9	Zusammenfassung: Zeitunabhängige Schrödingergleichung	376

4.6	Dissipation und Quantentheorie	377
4.6.1	Störungsrechnung	377
4.6.2	Kopplung an die Umgebung	380
4.6.3	Markow-Näherung	382
4.6.4	Herleitung der Ratengleichung, Fermis goldene Regel	385
4.6.5	Ratengleichung bei Entartung, Übergänge zwischen Multipletts	387
4.6.6	Der gedämpfte lineare harmonische Oszillator	389
4.6.7	Zusammenfassung: Dissipation und Quantentheorie	392
5	Quantenmechanik II	393
5.1	Streutheorie	393
5.1.1	Einführung	393
5.1.2	Grundlagen	396
5.1.3	Zeitverschiebungsoperatoren in der Störungstheorie	397
5.1.4	Zeitabhängige Greenfunktionen (Propagatoren)	399
5.1.5	Energieabhängige Greenfunktionen (Propagatoren): Resolventen	401
5.1.6	Darstellungen der Resolventen und der Kopplungen	402
5.1.7	Lippmann-Schwinger-Gleichungen	405
5.1.8	Möllersche Wellenoperatoren	406
5.1.9	Streu- und Übergangsoperator	407
5.1.10	Die Wellenfunktion $\langle \vec{r} \vec{k} \rangle^+$ für große Abstände r	409
5.1.11	Wirkungsquerschnitt	410
5.1.12	Zusammenfassung: Streutheorie	412
5.2	Zwei- und Dreikörperstreuprobleme	413
5.2.1	Zweipotentialformel von Gell-Mann & Goldberger	413
5.2.2	Streuphasen	414
5.2.3	Streuung geladener Teilchen	416
5.2.4	Der effektive Hamiltonoperator in der Feshbach-Theorie	417
5.2.5	Separable Wechselwirkung und Resonanzen	418
5.2.6	Zur Berechnung der Resonanzparameter	419
5.2.7	Mittelung über die Energie	421
5.2.8	Dreikörperprobleme: Besonderheiten	422
5.2.9	Das Verfahren von Kazaks & Greider	424
5.2.10	Faddeev-Gleichungen	425
5.2.11	Zusammenfassung: Zwei- und Dreikörperstreuprobleme	426
5.3	Mehrteilchen-Systeme	427
5.3.1	Ein- und Vielteilchenzustände	427
5.3.2	Austauschsymmetrie	428
5.3.3	Symmetrische und antisymmetrische Vielteilchenzustände	430
5.3.4	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren für Fermionen	432

5.3.5	Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren für Bosonen	434
5.3.6	Allgemeines über Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren . . .	436
5.3.7	Das Zweiteilchensystem als Beispiel	437
5.3.8	Darstellung von Einteilchenoperatoren	439
5.3.9	Darstellung von Zweiteilchenoperatoren	439
5.3.10	Zeitabhängigkeit	441
5.3.11	Welle-Teilchen-Dualismus	443
5.3.12	Zusammenfassung: Mehrteilchen-Systeme	444
5.4	Vielteilchenbeispiele	445
5.4.1	Fernigas im Grundzustand	445
5.4.2	Hartree-Fock-Gleichungen	447
5.4.3	Restwechselwirkung, Paarkraft	450
5.4.4	Quasiteilchen im BCS-Formalismus	451
5.4.5	Hartree-Fock-Bogoljubow-Gleichungen	452
5.4.6	Vorbemerkungen zur Quantisierung des elektromagnetischen Feldes	456
5.4.7	Photonen	460
5.4.8	Glauberzustände	464
5.4.9	Quetschzustände	467
5.4.10	Entwicklung nach Glauberzuständen	469
5.4.11	Atom im Laserlichtfeld	475
5.4.12	Zusammenfassung: Vielteilchenbeispiele	478
5.5	Dirac-Gleichung	479
5.5.1	Relativistische Invarianz	479
5.5.2	Quantentheorie	480
5.5.3	Die Dirac-Matrizen	481
5.5.4	Darstellung der Dirac-Matrizen	485
5.5.5	Verhalten der Dirac-Gleichung bei Lorentz-Transformationen .	487
5.5.6	Adjungierte Spinoren und bilineare Kovarianten	489
5.5.7	Raumspiegelung, Zeitumkehr und Ladungskonjugation	490
5.5.8	Dirac- und Klein-Gordon-Gleichung	494
5.5.9	Anwendungsbeispiele: Energiebestimmung für besondere Potentiale	496
5.5.10	Schwierigkeiten der Dirac-Theorie	500
6	Thermodynamik und Statistik	501
6.1	Statistik	501
6.1.1	Einleitung	501
6.1.2	Statistische Gesamtheiten und Wahrscheinlichkeitsbegriff . . .	503
6.1.3	Binomialverteilung	505
6.1.4	Gauß - und Poisson-Verteilung	507

6.1.5	Korrelationen und Teilsysteme	508
6.1.6	Informationsentropie	510
6.1.7	Klassische Statistik und Phasenraumzellen	512
6.1.8	Zusammenfassung: Statistik	514
6.2	Entropiesatz	515
6.2.1	Entropiesatz und Ratengleichung	515
6.2.2	Irreversible Zustandsänderungen und Relaxationszeitnäherung	517
6.2.3	Liouville- und stoßfreie Boltzmann-Gleichung	519
6.2.4	Boltzmann-Gleichung	521
6.2.5	Beweis des Entropiesatzes mit der Boltzmann-Gleichung	523
6.2.6	Molekularbewegung und Diffusion	524
6.2.7	Langevin-Gleichung	527
6.2.8	Verallgemeinerte Langevin-Gleichung, Fluktuations-Dissipations-Theorem	529
6.2.9	Fokker-Planck-Gleichung	533
6.2.10	Zusammenfassung: Entropiesatz	536
6.3	Gleichgewichtsverteilungen	537
6.3.1	Maxwell-Verteilung	537
6.3.2	Thermisches Gleichgewicht	538
6.3.3	Mikrokanonische Gesamtheit	540
6.3.4	Zustandsdichte im Einzelteilchenmodell	541
6.3.5	Mittelwerte und Maximum der Entropie	543
6.3.6	Kanonische und großkanonische Gesamtheiten	544
6.3.7	Austauschgleichgewichte	547
6.3.8	Temperatur, Druck und chemisches Potential	548
6.3.9	Zusammenfassung: Gleichgewichtsverteilungen	552
6.4	Allgemeine Sätze der Thermodynamik	553
6.4.1	Die Grundrelation der Thermodynamik	553
6.4.2	Mechanische Arbeit und Wärmemenge	554
6.4.3	Zustandsgrößen und vollständige Differentiale	556
6.4.4	Thermodynamische Potentiale, Legendre-Transformationen . .	557
6.4.5	Maxwellsche Integrabilitätsbedingungen und thermische Koeffizienten	559
6.4.6	Homogene Systeme, Gibbs-Duhem-Beziehung	562
6.4.7	Phasenumwandlungen und Clausius-Clapeyron-Gleichung . . .	564
6.4.8	Enthalpie und freie Energie als Zustandsgrößen	565
6.4.9	Irreversible Änderungen	568
6.4.10	Zusammenfassung: Allgemeine Sätze der Thermodynamik . .	568
6.5	Ergebnisse im Einzelteilchenmodell	569
6.5.1	Identische Teilchen und Symmetriebedingungen	569
6.5.2	Zustandssummen in der Quantenstatistik	570

6.5.3	Besetzung der Einteilchenzustände	572
6.5.4	Ideale Gase	574
6.5.5	Mischungsentropie und Massenwirkungsgesetz	578
6.5.6	Entartetes Fermigas: Leitungselektronen in Metallen	580
6.5.7	Elektromagnetische Strahlung im Hohlraum	584
6.5.8	Gitterschwingungen	587
6.5.9	Zusammenfassung: Ergebnisse im Einzelteilchenmodell	590
6.6	Phasenübergänge	591
6.6.1	Van-der-Waals-Gleichung	591
6.6.2	Folgerungen aus der van-der-Waals-Gleichung	593
6.6.3	Kritisches Verhalten	595
6.6.4	Paramagnetismus	597
6.6.5	Ferromagnetismus	599
6.6.6	Bose-Einstein-Kondensation	600
6.6.7	Zusammenfassung: Phasenübergänge	603
Sachverzeichnis		604