

Inhaltsverzeichnis

A	Mechanik starrer Körper	1
1	Grundbegriffe der Kinematik	3
1.1	Zeit	3
1.2	Länge	6
1.3	Winkel	9
2	Abgeleitete Begriffe der Kinematik: Geschwindigkeit und Beschleunigung	11
2.1	Vorbemerkungen	11
2.2	Geradlinige Bewegung	12
2.3	Kreisbewegung	15
2.4	Überlagerung von Bewegungen	19
2.5	Zusammenstellung und Vergleich der wichtigsten Beziehungen	21
3	Grundbegriffe der Dynamik: Masse und Kraft	23
3.1	Eigenschaften von Masse und Kraft	23
3.2	Das statische Gleichgewicht: Kräfte und Drehmomente	24
3.3	Verknüpfung zwischen Kraft und Masse (Einheiten und Meßmethoden)	25
3.4	Körpereigenschaften: Dichte und Massenmittelpunkt	27
3.5	Reibung zwischen festen Körpern	30
3.6	Zusammenfassung	32
4	Dynamisches Gleichgewicht	33
4.1	Die Trägheitskraft	33
4.2	Das d'Alembertsche Prinzip	34
4.3	Beispiele	35
4.4	Zusammenfassung	38
5	Übergeordnete Begriffe: Arbeit und Energie	39
5.1	Arbeit und Leistung	39
5.2	Beispiele für Arbeiten	40
5.3	Energie und Energiesatz	42
5.4	Beispiele	44
5.5	Lösung physikalischer Probleme mit dem Energiesatz	46
5.6	Zusammenfassung	49

6 Impuls	51
6.1 Kraftstoß und Impuls: Impulssatz	51
6.2 Der Impulserhaltungssatz	53
6.3 Schwerpunktsatz	54
6.4 Zusammenfassung	55
7 Anwendungen von Impuls- und Energiesatz: Stöße	57
7.1 Vorbemerkungen	57
7.2 Zentrischer inelastischer Stoß	58
7.3 Zentrischer elastischer Stoß	59
7.4 Dezentraler elastischer Stoß	61
7.5 Systeme mit veränderlicher Masse	63
7.6 Zusammenfassung	69
8 Drehbewegungen	71
8.1 Arbeit und Leistung bei Drehbewegungen	71
8.2 Rotationsenergie, Erweiterung des Energiesatzes	73
8.3 Drehimpuls: Momentenstoß und Drehimpulssatz	75
8.4 Bahndrehimpuls und Eigendrehimpuls	77
8.5 Drehschemelexperimente zum Drehimpuls	78
8.6 Gegenüberstellung der wichtigsten Beziehungen	80
9 Trägheitsmoment	81
9.1 Vorbemerkungen	81
9.2 Experimentelle Bestimmung von Trägheitsmomenten	81
9.3 Berechnung von Trägheitsmomenten	83
9.4 Trägheitsmoment als Tensor	87
9.5 Geometrische Darstellung des Trägheitstensors	92
9.6 Beispiel: Hantel, Bedeutung der Zentrifugalmomente	93
9.7 Zusammenfassung	95
10 Anwendungen des Drehimpulssatzes	97
10.1 Momentane Drehachse	97
10.2 Beispiele	99
10.2.1 Kugel oder Zylinder auf einer schiefen Ebene	99
10.2.2 Stoßprobleme	101
10.3 Nutation des symmetrischen momentenfreien Kreisel	103
10.4 Präzession des symmetrischen Kreisel	106
10.5 Beispiele zur Kreiselbewegung	107
10.6 Zusammenfassung	109
11 Bezugssysteme	111
11.1 Vorbemerkungen	111
11.2 Bezugssysteme mit konst. Relativgeschwindigkeit ($u \ll c$)	112
11.3 Linear beschleunigte Bezugssysteme	114
11.4 Rotierende Bezugssysteme	116
11.4.1 Die Zentrifugalkraft	116
11.4.2 Die Coriolis-Kraft	117
11.5 Die Erde als rotierendes Bezugssystem	120
11.5.1 Zentrifugalbeschleunigung	120

11.5.2	Coriolis-Beschleunigung	121
11.5.3	Der Kreiselkompaß	122
11.6	Zusammenfassung	123
12	Relativistik (Systeme mit hoher Relativgeschwindigkeit) .	125
12.1	Vorbemerkungen: der Konflikt	125
12.2	Geometrische Darstellung	127
12.3	Der Bondische k -Faktor	129
12.4	Messung von Entfernungen und Geschwindigkeiten	129
12.5	Die Zeitdilatation und das Zwillingsparadoxon	131
12.6	Die Längenkontraktion	133
12.7	Die Lorentz-Transformationen	135
12.8	Transformation von Geschwindigkeiten	137
12.9	Absolut und relativ: Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft .	139
12.10	Masse, Impuls, Energie	141
12.11	Zusammenfassung	145
13	Gravitation	147
13.1	Das Gravitationsgesetz	147
13.1.1	Einleitende Bemerkungen	147
13.1.2	Die Gravitationskonstante	148
13.2	Die Gravitationsfeldstärke	149
13.3	Potentielle Energie und Gravitationspotential	151
13.4	Die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung	153
13.4.1	Formulierung der Gesetze	153
13.4.2	Einfache Erklärung der Gesetze	154
13.4.3	Physikalische Daten von Sonne und Planeten	155
13.5	Ergänzungen	156
13.5.1	Satellitenbahnen	156
13.5.2	Zentralbewegungen	158
13.6	Zusammenfassung	160
B	Mechanik deformierbarer Körper	161
14	Aufbau der Körper	163
14.1	Vorbemerkungen	163
14.2	Feste Körper	164
14.2.1	Allgemeines zur Bindung	164
14.2.2	Bindungstypen	165
14.2.3	Idealkristalle – Realkristalle	167
14.3	Flüssige Körper	169
14.4	Gasförmige Körper	170
15	Körper unter äußeren Spannungen	171
15.1	Definitionen	171
15.2	Feste Körper unter äußeren Spannungen	172
15.2.1	Normalspannung	172
15.2.2	Tangentialspannung und allseitiger Zug/Druck	173
15.2.3	Zusammenhang zwischen den elastischen Konstanten .	175

15.3	Anwendungsbeispiele: Biegung und Torsion: Experimentelle Bestimmung der elastischen Konstanten	177
15.3.1	Biegung eines Balkens	177
15.3.2	Torsion eines zylindrischen Stabes	180
15.4	Flüssigkeiten unter Druck	182
15.4.1	Kolbendruck, Kompressibilität von Flüssigkeiten	182
15.4.2	Schweredruck in Flüssigkeiten	183
15.4.3	Auftrieb	183
15.5	Gase unter Druck	184
15.5.1	Kompressibilität von Gasen	184
15.5.2	Schweredruck in Gasen	185
15.6	Grundgleichungen der kinetischen Gastheorie	187
15.6.1	Wirkungsquerschnitt und mittlere freie Weglänge	187
15.6.2	Gaskinetische Deutung des Drucks	188
15.7	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen	193
16	Oberflächen und Grenzflächen	195
16.1	Vorbemerkungen	195
16.2	Oberflächenspannung und Oberflächenenergie	196
16.3	Spezifische Oberflächenenergie fester Körper	200
16.4	Grenzflächen zwischen festen und flüssigen Körpern	201
16.4.1	Benetzbarkeit und Randwinkel	201
16.4.2	Kapillarität	203
16.5	Zusammenfassung	206
17	Strömungen in Flüssigkeiten und Gasen	207
17.1	Vorbemerkungen und Definitionen	207
17.2	Reibungsbehaftete Strömung - Innere Reibung und Grenzschicht	209
17.3	Beispiele zur reibungsbehafteten Strömung	211
17.3.1	Experimente mit dem Stromfädenapparat	211
17.3.2	Schlichte Strömung zwischen parallelen Platten	211
17.3.3	Schlichte Strömung durch ein Rohr	213
17.3.4	Laminare Umströmung einer Kugel	215
17.3.5	Zahlenwerte und Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit	217
17.4	Laminare und turbulente Strömungen	218
17.5	Die ideal reibungsfreie Flüssigkeitsströmung	220
17.5.1	Bernoullische Gleichung	220
17.5.2	Anwendungsbeispiele der Bernoullischen Gleichung	223
17.6	Reale Strömungen	227
17.7	Zusammenfassung	230
C	Elektrik	231
18	Strom, Spannung, Ladung	233
18.1	Vorbemerkungen	233
18.2	Strom und Ladung	234
18.2.1	Merkmale des elektrischen Stroms	234

18.2.2	Einheit des elektrischen Stromes – Definition der Ladung	235
18.2.3	Strommeßgeräte	237
18.3	Die elektrische Spannung	238
18.3.1	Merkmale der elektrischen Spannung	238
18.3.2	Einheit der elektrischen Spannung	238
18.3.3	Spannungsmeßgeräte	240
19	Der elektrische Widerstand	241
19.1	Definition und Einheit	241
19.2	Charakterisierung von Leitertypen durch Strom-Spannungs-Kennlinien	241
19.2.1	Ohmsche Leiter	242
19.2.2	Nicht-ohmsche Leiter	242
19.3	Klassifizierung ohmscher Leiter	244
19.3.1	Klassifizierung nach Größe	244
19.3.2	Klassifizierung nach Temperaturverhalten	245
19.4	Gleichstromkreise – Kirchhoffsche Regeln	246
19.4.1	Knoten- und Maschenregel	246
19.4.2	Einfache Schaltkreise	248
19.5	Der elektrodynamische Strom-Spannungsmesser – das Galvanometer	250
19.5.1	Spannungs- und Stromfehlerschaltung	250
19.5.2	Galvanometer als Strom-Spannungsmesser	251
19.5.3	Das Galvanometer als Ladungsmeßgerät	251
19.6	Zusammenfassung	253
20	Das elektrische Feld	255
20.1	Der Feldbegriff	255
20.1.1	Skalare und vektorielle Felder	255
20.1.2	Beispiele für elektrische Felder	256
20.2	Das homogene elektrische Feld	257
20.2.1	Beobachtungen und Messungen im homogenen Feld	257
20.2.2	Definition der Feldgrößen E und D	258
20.2.3	Influenz: die Verschiebungsdichte als Feldgröße	259
20.3	Das inhomogene elektrische Feld	261
20.3.1	Zusammenhang zwischen Spannung und Feldstärke	261
20.3.2	Das elektrostatische Potential	262
20.4	Zusammenfassung	265
21	Beispiele: Potentiale und elektrische Felder	267
21.1	Das homogene Feld zwischen zwei ebenen geladenen Platten	267
21.2	Potential einer geladenen Kugel (Coulomb-Potential)	269
21.3	Potential einer beliebigen Ladungsverteilung	270
21.4	Potential und Feld eines elektrischen Dipols	271
21.5	Feld und Potential eines unendlich langen geraden Drahtes	273
21.6	Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen	275

22 Der elektrische Fluß	277
22.1 Definition des elektrischen Flusses – Gaußscher Satz	277
22.2 Anwendungen des Gaußschen Satzes	279
22.2.1 Feld einer linearen Ladungsverteilung	280
22.2.2 Elektrisches Feld einer Punktladung	280
22.2.3 Feld einer kugelförmigen Ladungsverteilung	281
22.2.4 Feld einer ebenen Ladungsverteilung	282
22.3 Zusammenfassung	283
23 Materie im elektrischen Feld (I. Leiter)	285
23.1 Vorbemerkungen	285
23.2 Leiter als Ladungsträger	285
23.3 Der Kondensator	287
23.3.1 Definition der Kapazität	287
23.3.2 Der Plattenkondensator	288
23.3.3 Der Kugelkondensator	289
23.3.4 Der Zylinderkondensator	290
23.4 Schaltkreise	291
23.4.1 Knoten- und Maschenregel	291
23.4.2 Hintereinanderschaltung von Kondensatoren	292
23.4.3 Parallelschaltung von Kondensatoren	293
23.4.4 Ladevorgang eines Kondensators	293
23.5 Zusammenfassung	295
24 Kräfte und Drehmomente im elektrischen Feld	297
24.1 Kraft und Arbeit	297
24.2 Energie des elektrischen Feldes	299
24.3 Kraftwirkung zwischen Ladungen	300
24.4 Kraftwirkung zwischen Kondensatorplatten	301
24.5 Dipole in elektrischen Feldern	303
24.5.1 Dipol im homogenen Feld	303
24.5.2 Dipol im inhomogenen Feld	305
24.6 Zusammenfassung	306
25 Materie im elektrischen Feld (II. Isolatoren)	307
25.1 Polarisierung – Plattenkondensator mit Dielektrikum (experimentelle Feststellungen)	307
25.2 Deutung des experimentellen Befunds (Dielektrika in der Form paralleler Platten)	310
25.3 Geometrische Gestalt des Dielektrikums	314
25.4 Mikroskopische Betrachtungen	315
25.4.1 Übersicht	315
25.4.2 Dielektrische Stoffe	316
25.4.3 Paraelektrische Stoffe	318
25.5 Zusammenfassung	321
26 Kräfte auf Dielektrika in elektrischen Feldern	323
26.1 Kraftwirkung in Richtung der Feldlinien	323
26.2 Kraftwirkung senkrecht zu den Feldlinien	325

26.3	Experimentelle Bestimmung der Dielektrizitätskonstanten mit der Steighöhenmethode	328
26.4	Drehmomente auf dielektrische Stäbchen im elektr. Feld	328
26.5	Brechungsgesetz für Feldlinien	330
26.6	Kondensatoren mit mehreren Dielektrika	333
26.6.1	Hintereinanderschaltung zweier Dielektrika	333
26.6.2	Parallelschaltung zweier Dielektrika	333
26.7	Zusammenfassung	334
27	Magnetisches Feld und Induktion	335
27.1	Beispiele für homogene und inhomogene magnetische Felder	335
27.2	Das homogene Magnetfeld einer langen Spule	336
27.3	Die elektromagnetische Induktion	338
27.3.1	Qualitative Befunde zum Induktionsgesetz	338
27.3.2	Eichung des ballistischen Galvanometers	339
27.3.3	Quantitative Herleitung des Induktionsgesetzes	339
27.4	Weitere Formen des Induktionsgesetzes – Magnetischer Fluß und magnetische Flußdichte	341
27.5	Das Induktionsgesetz in Feldgrößen	344
27.6	Zusammenfassung	347
28	Inhomogene Magnetfelder – das Durchflutungsgesetz	349
28.1	Linienintegral der magnetischen Feldstärke	349
28.1.1	Vorbemerkung	349
28.1.2	Der magnetische Spannungsmesser	349
28.1.3	Eichung des magnetischen Spannungsmessers	351
28.2	Anwendungen des magnetischen Spannungsmessers	352
28.2.1	Lange Spule	352
28.2.2	Stromführender Draht	353
28.3	Das Durchflutungsgesetz	354
28.3.1	Leitungsströme	354
28.3.2	Verschiebungsströme	355
28.3.3	Durchflutungsgesetz als Verknüpfung zwischen Feldern	356
28.4	Anwendungen des Durchflutungsgesetzes (Magnetische Felder einfacher Stromverteilungen)	358
28.4.1	Magnetische Feldstärke eines geraden Leiters	358
28.4.2	Magnetisches Feld im Innern eines dicken Kabels	358
28.4.3	Magnetisches Feld eines Flächenstroms	359
28.4.4	Magnetisches Feld einer langen Spule	360
28.4.5	Magnetisches Feld einer Toroidspule	360
28.5	Zusammenfassung	362
29	Kräfte und Drehmomente im magnetischen Feld	363
29.1	Kraft auf einen stromführenden Leiter im homogenen Feld	363
29.2	Weitere Formen des Lorentz-Gesetzes	365
29.2.1	Exakte vektorielle Formulierung	365
29.2.2	Kraft auf eine bewegte Punktladung im magnetischen Feld	365

29.3	Drehmoment auf eine stromdurchflossene Leiterschleife . . .	367
29.4	Potentielle Energie eines magnetischen Dipols im magnetischen Feld	368
29.5	Dipol im inhomogenen Feld	369
29.6	Kraft zwischen parallelen stromdurchflossenen Leitern	370
29.7	Zusammenfassung	371
30	Magnetfelder beliebiger Stromverteilungen	373
30.1	Das Biot-Savartsche Gesetz	373
30.2	Magnetfeld eines geraden Drahtes	374
30.3	Magnetisches Feld auf der Achse einer kreisförmigen Stromschleife	375
30.4	Magnetische Feldstärke auf der Achse eines Solenoids	376
30.5	Helmholtz-Spulen	379
30.6	Rayleighsche Stromwaage	380
30.7	Zusammenfassung	381
31	Ergänzungen zum Induktionsgesetz	383
31.1	Selbstinduktion und Gegeninduktion	383
31.1.1	Die Selbstinduktion	383
31.1.2	Die Gegeninduktion	384
31.2	Schaltkreis mit Spule: Wirkung der Selbstinduktion	385
31.3	Energiedichte des magnetischen Feldes	387
31.4	Erweiterung des Induktionsgesetzes	388
31.5	Einige Induktionsexperimente	390
31.5.1	Zur Lageänderung der Induktions-Leiterschleife	390
31.5.2	Das Heringsche Paradoxon	391
31.5.3	Bewegung eines Leiters im konstanten B -Feld	391
31.5.4	Zur Relativbewegung zwischen Leiter und magnetischem Feld	392
31.6	Wirbelströme: Experimente zur Lenzschen Regel	393
31.6.1	Die fallende Münze im magnetischen Feld	393
31.6.2	Die Induktionskanone	394
31.7	Zusammenfassung	395
32	Relativbewegungen – die elektromagnetische Kraft	397
32.1	Die allgemeine Lorentz-Kraft	397
32.2	Gedankenexperiment zur Lorentz-Kraft	398
32.3	Transformation der Felder	398
32.4	Zum Gesetz von Biot-Savart	401
32.5	Zusammenfassung	402
33	Materie im magnetischen Feld	403
33.1	Vorbemerkungen	403
33.2	Experimentelle Befunde: Spule mit Materie	403
33.3	Magnetisierung	405
33.4	Klassifikation der magnetischen Materialien	407
33.4.1	Meßmethoden der Permeabilität	407
33.4.2	Klassifikation der Materialien	408

33.5	Mikroskopische Betrachtungen	411
33.5.1	Diamagnetismus	411
33.5.2	Paramagnetismus	411
33.5.3	Ferromagnetismus	412
33.6	Zusammenfassung und Gegenüberstellung	414
34	Wechselstrom und Wechselstrom-Widerstände	415
34.1	Wechselstromquellen Rotierende Spulen – Zeigerdarstellung .	415
34.2	Dreiphasenstrom	416
34.3	Wechselstromwiderstände: Qualitative Experimente	417
34.4	Wechselstromwiderstände: Quantitative Behandlung	418
34.4.1	Ohmscher Widerstand	418
34.4.2	Induktiver Widerstand	418
34.4.3	Kapazitiver Widerstand	420
34.5	Schaltungsbeispiel	421
34.6	Komplexe Wechselstromrechnung	422
34.7	Beispiele zur komplexen Wechselstromrechnung	425
34.7.1	Hintereinanderschaltung von Spule und ohmschem Widerstand	425
34.7.2	Hintereinanderschaltung von Spule, ohmschem Widerstand und Kondensator	426
34.7.3	Parallelschaltung von Spule und Kondensator	427
34.8	Effektivwerte von Strom und Spannung	429
34.9	Der Transformator	430
34.10	Zusammenfassung	432
35	Wechselströme: Ergänzungen	433
35.1	Messung von Wechselstromwiderständen	433
35.1.1	Prinzipielles	433
35.1.2	Wechselstrom-Meßbrücken	433
35.2	Quantitative Behandlung des Transformators	435
35.2.1	Schaltung und Grundgleichungen	435
35.2.2	Auflösung der Transformatorgleichungen und Diskussion von Spezialfällen	437
35.2.3	Leistungsübertragung	439
35.3	Zusammenfassung	441
36	Gleichstrom: Leitungsmechanismen	443
36.1	Experimentelle Befunde	443
36.2	Quantitative Behandlung ohmscher Leiter	444
36.2.1	Leitfähigkeit – Beweglichkeit der Ladungsträger	445
36.2.2	Der Hall-Effekt	447
36.3	Diskussion der wichtigsten Leitertypen	448
36.3.1	Metallische Leiter	448
36.3.2	Halbleiter	453
36.3.3	Supraleiter	457
36.3.4	Elektrolytische Leiter	460
36.4	Zusammenfassung	465

37 Gleichstromquellen	467
37.1 Chemische Stromquellen (Umwandlung von chemischer in elektrische Energie)	467
37.1.1 Sekundäre Elemente (Akkumulatoren)	467
37.1.2 Primäre Elemente (galvanische Elemente, Batterien)	469
37.2 Mechanische Stromquellen (Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie)	472
37.3 Thermische Stromquellen (Umwandlung von thermischer in elektrische Energie)	474
37.4 Optische Stromquellen (Umwandlung von optischer in elektrische Energie)	477
37.5 Zusammenfassung	479
 D Kalorik	 481
38 Temperatur und Nullter Hauptsatz	483
38.1 Vorbemerkungen	483
38.2 Thermodynamische Systeme	484
38.3 Der Druck	485
38.4 Die Stoffmenge	486
38.5 Die Temperatur	487
38.5.1 Empirische Temperaturskala	487
38.5.2 Die absolute Gastemperatur	490
38.5.3 Praktische Temperaturmessung	491
38.6 Zusammenfassung	493
 39 Thermische Zustandsgleichungen	495
39.1 Das ideale Gasgesetz	495
39.2 Reale Gase: Experimentelle Befunde	498
39.2.1 Das (p, T) -Diagramm	498
39.2.2 Das (p, V) -Diagramm	500
39.3 Zustandsgleichungen realer Gase	503
39.4 Zusammenfassung	505
 40 Der erste Hauptsatz	507
40.1 Die Wärme Q	507
40.1.1 Spezifische Wärmen	507
40.1.2 Experimentelle Bestimmung spezifischer Wärmen	509
40.1.3 Beispiele für spezifische Wärmen	509
40.2 Spezifische Umwandlungswärmen	512
40.3 Die Arbeit W	513
40.4 Die innere Energie U	514
40.5 Formulierung des ersten Hauptsatzes	516
40.6 Beispiele zum ersten Hauptsatz	517
40.6.1 Isochore Prozesse	517
40.6.2 Isobare Prozesse	518
40.6.3 Isotherme Prozesse	519
40.6.4 Adiabatische Prozesse	521
40.6.5 Experiment von Clément-Desormes	522

40.7	Der Gay-Lussacsche Drosselversuch	523
40.8	Der Joule-Thomson-Effekt	525
40.9	Zusammenfassung	528
41	Wärmekraftmaschinen	529
41.1	Vorbemerkungen	529
41.2	Prinzip von Wärmekraftmaschinen und Wärmepumpen . . .	529
41.2.1	Wärmekraftmaschinen	529
41.2.2	Wärmepumpen	531
41.3	Praktische Beispiele für Wärmekraftmaschinen	532
41.3.1	Der Otto-Motor	532
41.3.2	Der Diesel-Motor	534
41.4	Ideale Wärmekraftmaschinen	535
41.4.1	Vorbemerkungen	535
41.4.2	Der Heißluftmotor	535
41.4.3	Experimente mit der Stirling-Maschine	537
41.4.4	Die Carnot-Maschine	538
41.5	Die thermodynamische Temperaturskala	540
41.6	Zusammenfassung	541
42	Die Entropie und der zweite Hauptsatz	543
42.1	Reversible und irreversible Prozesse	543
42.2	Hinführung zum Begriff der Entropie	544
42.3	Die Entropie als Zustandsgröße	546
42.4	Die Entropieänderung als quantitatives Maß für die Irreversibilität von Prozessen	548
42.5	Beispiele	552
42.5.1	Reversible adiabatische Prozesse	552
42.5.2	Reversible isotherme Prozesse	552
42.5.3	Isochore Prozesse	553
42.5.4	Isobare Prozesse	555
42.5.5	Die Entropiefläche des idealen Gases	555
42.5.6	Entropieänderungen bei Zustandsänderungen realer Stoffe	556
42.5.7	Der Gay-Lussacsche Drosselversuch	558
42.5.8	Mischungsentropie von Gasen	559
42.6	Zusammenfassung	561
43	Statistisch-mikroskopische Betrachtungen	563
43.1	Innere Energie eines idealen Gases	563
43.2	Mikroskopische Deutung der spezifischen Wärmen idealer Gase	566
43.3	Spezifische Wärme fester Körper	567
43.4	Statistische Deutung der Entropie	569
43.4.1	Ein erster Hinweis	569
43.4.2	Entropieänderung beim Gay-Lussac-Versuch	571
43.4.3	Mischungsentropie	572
43.4.4	Thermische Entropie	573
43.5	Zusammenfassung	576

44 Transportvorgänge	577
44.1 Charakteristische Größen und Beziehungen	577
44.2 Diffusion – Transport von Materie	578
44.2.1 Diffusionsgesetze	578
44.2.2 Beziehung zu mikroskopischen Größen	579
44.3 Wärmeleitung – Transport von Energie	580
44.3.1 Wärmeleitungsgleichungen	580
44.3.2 Beziehung der Wärmeleitfähigkeit zu mikroskopischen Größen	582
44.4 Innere Reibung – Transport von Impuls	583
44.4.1 Newtonsches Gesetz der inneren Reibung	583
44.4.2 Mikroskopische Deutung der Zähigkeit	584
44.5 Elektrizitätsleitung – Transport von Ladung	585
44.5.1 Das Ohmsche Gesetz	585
44.5.2 Mikroskopische Interpretation der elektrischen Leitfähigkeit	586
44.6 Zusammenfassung	588
 E Schwingungen und Wellen	 589
45 Freie Schwingungen	591
45.1 Einleitende Bemerkungen	591
45.2 Beispiele für ungedämpfte Schwingungen	592
45.2.1 Federpendel	592
45.2.2 Torsionspendel	593
45.2.3 Schwerependel	593
45.2.4 Elektrischer Schwingkreis	594
45.3 Experimentelle Realisierung ungedämpfter Schwingungen	595
45.4 Mathematische Behandlung harmonischer Schwingungen	596
45.4.1 Bewegungsgleichungen	596
45.4.2 Lösung der Bewegungsgleichungen	599
45.4.3 Diskussion der Lösungen	603
45.5 Zusammenstellung der wichtigsten Beziehungen	605
46 Gekoppelte Schwingungen	607
46.1 Erzwungene Schwingungen	607
46.1.1 Aufstellung der Bewegungsgleichung	607
46.1.2 Lösung der Bewegungsgleichung	608
46.1.3 Diskussion der Lösungen	609
46.1.4 Beispiele und Experimente	610
46.1.5 Energieübertragung	611
46.2 Schwingungen gekoppelter Systeme	612
46.2.1 Gekoppelte Pendel: Beispiele und Experimente	612
46.2.2 Die Bewegungsgleichungen und ihre Lösungen	613
46.2.3 Diskussion der Lösungen	614
46.3 Systeme mit mehreren Freiheitsgraden	616
46.3.1 Ein schwingender Körper	616
46.3.2 Zwei schwingende Körper	617

46.3.3	Drei schwingende Körper	617
46.4	Schwingende elastische Kontinua	619
46.4.1	Lineares elastisches Kontinuum	619
46.4.2	Ebenes und räumliches elastisches Kontinuum	620
46.5	Harmonische Analyse	621
46.5.1	Fourier-Reihen: periodische Vorgänge	621
46.5.2	Fourier-Integrale: nicht periodische Vorgänge	623
46.6	Zusammenfassung	625
47	Wellen – allgemeine Eigenschaften	627
47.1	Einleitung	627
47.2	Wellenfunktion und Wellengleichung	628
47.3	Intensität einer Welle	631
47.4	Superposition von Wellen	632
47.4.1	Die Gruppengeschwindigkeit	632
47.4.2	Stehende Wellen	634
47.4.3	Interferenz	635
47.5	Modulation	636
47.6	Zusammenfassung	638
48	Mechanische und akustische Wellen	639
48.1	Wellen auf einer Pendelkette	639
48.2	Seilwellen	641
48.2.1	Bewegungsgleichung	641
48.2.2	Verhalten von Seilwellen am Seilende	642
48.3	Elastische Wellen in festen Körpern	643
48.4	Schallwellen in Flüssigkeiten und Gasen	645
48.4.1	Phasengeschwindigkeiten	645
48.4.2	Schallwellenfunktion	646
48.4.3	Schallintensität	647
48.4.4	Der Doppler-Effekt	649
48.5	Wasserwellen	652
48.5.1	Schwerewellen	652
48.5.2	Kapillarwellen	653
48.5.3	Experimente mit Wasserwellen	654
48.6	Zusammenfassung	656
49	Elektromagnetische Wellen	657
49.1	Historische Bemerkungen und Übersicht	657
49.2	Experimentelle Einführung	658
49.3	Abstrahlung des Hertzschen Dipols	661
49.4	Ebene elektromagnetische Wellen	664
49.4.1	Die Wellengleichung	665
49.4.2	Energiestrom	668
49.5	Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit Leitern	669
49.5.1	Experimente mit Mikrowellen	669
49.5.2	Reflexion von Mikrowellen	670
49.5.3	Impulsstrom und Strahlungsdruck	671

49.6	Wechselwirkung von elektromagnetischen Wellen mit Isolatoren	674
49.7	Zusammenfassung	676
F	Wellenoptik	677
50	Lichtwellen	679
50.1	Allgemeine Bemerkungen zur Optik	679
50.2	Lichterzeugung und Lichtdetektion	680
50.2.1	Lichtquellen	680
50.2.2	Lichtdetektoren	681
50.3	Prinzipien der Wellenfeldkonstruktion	682
50.4	Polarisiertes Licht	683
50.5	Reflexion und Brechung	684
50.5.1	Das Reflexionsgesetz	684
50.5.2	Das Brechungsgesetz	684
50.6	Experimente zum Reflexions- und Brechungsgesetz	685
50.7	Die Fresnelschen Formeln	688
50.7.1	Herleitung	688
50.7.2	Diskussion	690
50.8	Zusammenfassung	692
51	Interferenz	693
51.1	Monochromasie und Kohärenz	693
51.2	Der Pohlische Interferenzversuch	694
51.3	Interferenzen an dünnen Schichten	696
51.3.1	Dünne Filme	696
51.3.2	Entspiegelung und Antireflexbeschichtung	696
51.3.3	Interferenzfilter	697
51.3.4	Keilinterferenz	698
51.3.5	Newton-Ringe	699
51.4	Interferometer	699
51.4.1	Das Michelson-Interferometer	699
51.4.2	Das Fabry-Pérot-Interferometer	701
51.4.3	Fabry-Pérot-Interferometer als Spektrometer	703
51.5	Zusammenfassung	707
52	Beugung an einfachen Strukturen	709
52.1	Beugung an runden Hindernissen	709
52.1.1	Beugung an einer runden Scheibe	709
52.1.2	Beugung an einer runden Lochblende	710
52.2	Beugung am Spalt	712
52.2.1	Experimenteller Befund	712
52.2.2	Einfache Erklärung	712
52.2.3	Quantitative Behandlung	713
52.3	Beugung am Doppelspalt	715
52.4	Beugung am Strichgitter	716
52.4.1	Interferenzbedingung	716
52.4.2	Die Gitterinterferenzfunktion	717

52.4.3	Das Gitter als dispersives Element	718
52.4.4	Spektrales Auflösungsvermögen	719
52.4.5	Nutzbarer Wellenlängenbereich	719
52.4.6	Blaze	720
52.4.7	Abschlußbemerkung	721
52.5	Holographische Gitter	721
52.6	Zusammenfassung	725
53	Beugung und Streuung	727
53.1	Beugung am ebenen Flächengitter	727
53.2	Beugung am Raumgitter	728
53.2.1	Die Laue-Gleichungen	728
53.2.2	Röntgen-Strukturanalyse	729
53.3	Übersicht über Streuprozesse	731
53.3.2	Inelastische Streuprozesse	732
53.4	Die Rayleigh-Streuung	733
53.4.1	Streukonstante und Streuquerschnitt	733
53.4.2	Experimente zur Rayleigh-Streuung	735
53.5	Zusammenfassung	737
54	Dispersion und Absorption	739
54.1	Experimenteller Befund	739
54.2	Anschauliche Deutung der Dispersion	741
54.2.1	Grundgedanke	741
54.2.2	Ein einzelnes Atom im Lichtfeld	741
54.2.3	Ebene mit Atomen im Lichtfeld	742
54.2.4	Darstellung der Felder im Zeigerdiagramm	743
54.2.5	Wellenlänge der Lichtwelle im Medium	745
54.3	Quantitative Behandlung der Dispersion	746
54.4	Experimente zur Absorption und Dispersion	750
54.4.1	Absorption	750
54.4.2	Dispersion	750
54.5	Licht-Signalgeschwindigkeit	751
54.6	Zusammenfassung	752
55	Doppelbrechung	753
55.1	Experimentelle Feststellungen	753
55.2	Erklärung der Doppelbrechung	754
55.2.1	Phänomenologische Erklärung	754
55.2.2	Tiefergehende Betrachtungen	755
55.3	Anwendungen	757
55.3.1	Linear polarisiertes Licht	757
55.3.2	Zirkular polarisiertes Licht	758
55.3.3	Spannungsdoppelbrechung	760
55.4	Zirkulare Doppelbrechung	760
55.5	Schlußbemerkung	761
55.6	Zusammenfassung	762

G Strahlenoptik	763
56 Bauelemente der geometrischen Optik	765
56.1 Vorbemerkungen – Prinzip von Fermat	765
56.2 Sphärische Spiegel	767
56.3 Das Prisma	769
56.4 Dünne Linsen	770
56.4.1 Die Linsenmacher-Formel	770
56.4.2 Bildkonstruktion bei einer Sammellinse	772
56.4.3 Bildkonstruktion bei einer Zerstreuungslinse	773
56.4.4 Linsenformen und Linsensysteme	773
56.5 Abbildungsfehler	775
56.5.1 Sphärische Aberration	775
56.5.2 Koma	775
56.5.3 Astigmatismus	775
56.5.4 Verzeichnung	776
56.5.5 Chromatische Aberration	776
56.6 Dicke Linsen und Linsensysteme	776
56.7 Zusammenfassung	780
57 Optische Instrumente	781
57.1 Das Auge	781
57.1.1 Aufbau des Auges	781
57.1.2 Sehschärfe und Sehfehler	782
57.1.3 Strahlungsgrößen und photometrische Größen	782
57.2 Die Lupe	785
57.3 Photokamera	786
57.4 Projektionsapparat	787
57.5 Mikroskop	787
57.5.1 Aufbau des Mikroskops	787
57.5.2 Geometrisches Auflösungsvermögen des Mikroskops	788
57.6 Fernrohr	789
57.6.1 Bauformen	789
57.6.2 Geometrisches Auflösungsvermögen	791
57.7 Spektralapparat	792
57.7.1 Aufbau	792
57.7.2 Spektrales Auflösungsvermögen	793
57.8 Zusammenfassung	795
H Quantenoptik	797
58 Die Quantennatur des Lichts	799
58.1 Vorbemerkungen: Lichtquanten	799
58.2 Photoeffekt	800
58.2.1 Experimenteller Befund	800
58.2.2 Deutung und Erklärung des Photoeffekts	801
58.2.3 Anwendung des Photoeffekts	802
58.3 Röntgen-Bremsstrahlung	804

58.3.1	Aufbau einer Röntgenröhre	804
58.3.2	Experimenteller Befund	804
58.3.3	Erklärung des Effekts	805
58.4	Der Photonenimpuls	806
58.5	Der Compton-Effekt	807
58.5.1	Experimenteller Befund	807
58.5.2	Deutung des Effekts	808
58.6	Zusammenfassung	810
59	Der Schwarze Strahler	811
59.1	Absorptions- und Emissionsvermögen	811
59.2	Experimentelle Ergebnisse	812
59.3	Energiedichte der Strahlung im Hohlraum	814
59.4	Strahlungsgesetze	817
59.5	Vergleich mit dem Experiment	819
59.6	Messung hoher Temperaturen	820
59.7	Das Photonengas	821
59.7.1	Gerichtete Bewegung der Photonen	821
59.7.2	Ungerichtete Bewegung der Photonen	822
59.8	Zusammenfassung	825
60	Materiewellen	827
60.1	Die de Broglie-Hypothese und ihre experimentelle Bestätigung	827
60.2	Eigenschaften von Materiewellen	830
60.3	Dualismus der Beschreibungen	832
60.4	Wellenfunktion und Wellengleichung	834
60.4.1	Wellenfunktion einer ebenen Welle	834
60.4.2	Die Wellengleichung	836
60.4.3	Die Schrödinger-Gleichung	838
60.4.4	Ein Beispiel	839
60.5	Zusammenfassung	842
I	Atomistik	843
61	Bausteine der Atome	845
61.1	Übersicht	845
61.1.1	Größe der Atome	845
61.1.2	Größe der Atomkerne	846
61.1.3	Energien	846
61.2	Das Elektron	847
61.2.1	Ladung	847
61.2.2	Masse	848
61.2.3	Größe	849
61.2.4	Spin und magnetisches Moment	850
61.3	Der Kern	852
61.4	Zusammenstellung der Zahlenwerte	854

62 Atome: Spektren und Energieniveaus	855
62.1 Experimentelles	855
62.2 Deutung der Wasserstoff-Linien	856
62.3 Das Bohrsche Atommodell	857
62.4 Grenzen des Bohrschen Atommodells	860
62.5 Stehende Elektronenwellen	861
62.6 Experiment	865
62.7 Alkaliatome	867
62.7.1 Spektrum des Natriumatoms	867
62.7.2 Das Termschema	867
62.8 Physikalische Bedeutung der Quantenzahlen	868
62.9 Experimenteller Nachweis des Spin-Drehimpulses	870
62.9.1 Stern-Gerlach-Versuch	870
62.9.2 Feinstruktur	871
62.10 Zusammenfassung	873
63 Atome: Übergänge und Hüllenstruktur	875
63.1 Gebote und Verbote in der Atomistik	875
63.2 Erwartungswerte	876
63.2.1 Wellenfunktion und Wahrscheinlichkeitsverteilung	876
63.2.2 Symmetrie der Wellenfunktionen	877
63.2.3 Beispiele für Erwartungswerte	878
63.3 Übergangsmomente	879
63.4 Spontane Übergänge	881
63.5 Induzierte Übergänge	882
63.6 Prinzip des Lasers	883
63.7 Struktur der Atomhülle, Periodisches System der Elemente	884
63.7.1 Übersicht	884
63.7.2 Aufbauprinzipien der Atomhülle	884
63.7.3 Aufbau der Hülle	886
63.8 Zusammenfassung	894
64 Der Atomkern	897
64.1 Masse der Kerne	897
64.1.1 Bezeichnungen	897
64.1.2 Relative Massen	898
64.1.3 Massenspektrometer	898
64.1.4 Atom- und Kernmassen	899
64.2 Größe und Ladung der Kerne	902
64.2.1 Streuung von α -Teilchen	902
64.2.2 Streuung von Neutronen	902
64.2.3 Streuung von Elektronen	905
64.3 Systematik der Nuklide	905
64.4 Kernmodelle	907
64.4.1 Tröpfchenmodell	907
64.4.2 Potentialtopfmodell	909
64.4.3 Schalenmodell	910
64.5 Zusammenfassung	911

65 Instabile Kerne	913
65.1 Radioaktivität	913
65.2 Das Zerfallsgesetz	914
65.3 Der γ -Zerfall	916
65.4 Der α -Zerfall	917
65.4.1 Die natürlichen Zerfallsreihen	917
65.4.2 Zahlenbeispiel zum α -Zerfall	920
65.4.3 Erklärung des α -Zerfalls	922
65.5 Der β -Zerfall	923
65.5.1 Elektronen im Kern?	923
65.5.2 β^- -Zerfall	923
65.5.3 β^- -Zerfall des freien Neutrons	925
65.5.4 β^+ -Zerfall	925
65.5.5 Der Elektronen-Einfang	927
65.6 Zusammenfassung	928
66 Wechselwirkungen, Meßgeräte, Energien	929
66.1 Wechselwirkungen von Kernstrahlung mit Materie	929
66.1.1 Allgemeine Bemerkungen	929
66.1.2 α -Strahlen	930
66.1.3 β -Strahlen	931
66.1.4 γ -Strahlen	931
66.1.5 Neutronen	935
66.2 Detektoren und Spektrometer	937
66.2.1 Gasionisationsdetektoren	937
66.2.2 Szintillationszähler	938
66.2.3 Halbleiterdetektoren	939
66.2.4 Spektrometer	939
66.2.5 Spurdetektoren	941
66.3 Dosimetrie	942
66.3.1 Dosismeißgrößen	942
66.3.2 Dosis-Meißgeräte	944
66.4 Kernenergie	946
66.4.1 Energiegewinnung	946
66.4.2 Kernspaltung	947
66.4.3 Potentialmodell der Kernspaltung	949
66.4.4 Kettenreaktion und Kernreaktor	950
66.4.5 Kernfusion	952
66.5 Zusammenfassung	953

Mathematische Hilfsmittel 955

1 Vektoren	957
1.1 Der Vektorbegriff	957
1.1.1 Multiplikation eines Vektors mit einem Skalar	957
1.1.2 Addition und Subtraktion zweier Vektoren	958
1.1.3 Komponentenerlegung – Definition einer Basis	958
1.1.4 Die Richtungskosinus	959

1.2	Produkte von Vektoren mit Vektoren	959
1.2.1	Vorbemerkungen	959
1.2.2	Skalarprodukt zweier Vektoren	960
1.2.3	Vektorprodukt zweier Vektoren	962
1.2.4	Spatprodukt zwischen drei Vektoren	966
1.2.5	Das doppelte Vektorprodukt	967
2	Tensoren	969
2.1	Dyadisches Produkt zwischen zwei Vektoren	969
2.2	Summen, Differenzen und Produkte von Tensoren	969
2.3	Produkte von Tensoren mit Vektoren	971
2.4	Diagonalisierung symmetrischer Tensoren	974
2.4.1	Vorbemerkungen	974
2.4.2	Eigenwerte und Eigenvektoren	975
2.4.3	Zugehörige orthogonale Transformation	976
2.4.4	Zweidimensionales Beispiel	977
3	Ableitungen und Reihenentwicklungen	982
3.1	Ableitungen	982
3.2	Reihenentwicklungen	982
4	Koordinatensysteme	984
4.1	Vorbemerkungen	984
4.2	Kugelkoordinaten	984
4.3	Zylinderkoordinaten	988
5	Komplexe Zahlen	990
5.1	Definitionen – Rechenregeln	990
5.2	Die Gaußsche Zahlenebene	991
6	Wahrscheinlichkeiten, Permutationen, Kombinationen	994
6.1	Wahrscheinlichkeiten	994
6.2	Permutationen	994
6.3	Kombinationen	995
6.3.1	Beliebig viele Bälle pro Box	995
6.3.2	Nur ein Ball pro Box	996
6.4	Die Stirling-Formel	997
7	Vektor-Operatoren	998
7.1	Der Gradient	998
7.2	Die Divergenz	999
7.3	Die Rotation	1001
	Ergänzende und weiterführende Literatur	1005
	Fundamentalkonstanten	1013
	Register	1017