



Auf einen Blick

Einleitung	39
Teil I: Einführung: Was ist Physik? Warum Physik?	43
Kapitel 1: Was ist Physik?.....	45
Kapitel 2: Messen und Maßeinheiten.....	57
Teil II: Mechanik	67
Kapitel 3: Bewegung pur: Die Kinematik.....	69
Kapitel 4: Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm: Die Newton'schen Gesetze.....	81
Kapitel 5: Arbeit und Leistung.....	99
Kapitel 6: Impuls und Energie.....	113
Kapitel 7: Rundherum: Die Kreisbewegung.....	129
Kapitel 8: Rotation starrer Körper.....	143
Kapitel 9: Hinderlich und doch unverzichtbar: Die Reibung.....	163
Teil III: Viele Atome bilden ein Kontinuum: Die Kontinuumsmechanik	181
Kapitel 10: Die Form kehrt zurück: Die Elastizitätslehre.....	183
Kapitel 11: Wenn die Belastungen größer werden: Plastische Verformung und Bruch.....	199
Kapitel 12: Sie kann ziemlich turbulent sein: Die Hydrodynamik.....	223
Teil IV: Schwingungen und Wellen	247
Kapitel 13: Harmonische Schwingungen.....	249
Kapitel 14: Reale Schwingungen.....	275
Kapitel 15: Gemeinsam schwingt es sich leichter: Schwingungssysteme.....	287
Kapitel 16: Ein Surferparadies: Wellen.....	299
Kapitel 17: Wellen kann man auch hören: Die Akustik.....	321
Teil V: Die Optik sorgt für den Durchblick	339
Kapitel 18: Es werde Licht.....	341
Kapitel 19: Auch Licht kann gebeugt werden.....	359
Kapitel 20: Zwei grundlegende optische Effekte: Reflexion und Brechung.....	373
Kapitel 21: Spieglein, Spieglein an der Wand.....	397
Kapitel 22: Sie können sammeln oder zerstreuen: Linsen.....	411
Kapitel 23: Das Auge ist gut, aber es geht noch besser.....	429
Teil VI: Elektrisierend und magnetisierend zugleich: Der Elektromagnetismus	451
Kapitel 24: Ruhende Punktladung: Elektrostatik I.....	453
Kapitel 25: Ausgedehnte Ladungen: Elektrostatik II.....	469
Kapitel 26: Immer in die gleiche Richtung: Gleichstromkreise.....	489
Kapitel 27: Magnetismus.....	509





14 Auf einen Blick

Kapitel 28: Induktion.....	539
Kapitel 29: Es geht ständig auf und ab: Wechselstromkreise.....	555
Kapitel 30: Der ganze Elektromagnetismus in vier Gesetzen: Die Maxwell'schen Gleichungen.....	577
Kapitel 31: Halbleiterphysik und Halbleiterbauelemente.....	593
Teil VII: Thermodynamik.....	621
Kapitel 32: Leicht komprimierbar: Die Thermodynamik von Gasen.....	623
Kapitel 33: Temperaturphänomene und Wärmetransport.....	641
Kapitel 34: Das Fundament der Thermodynamik: Die Hauptsätze.....	663
Teil VIII: Eine Art von Revolution: Der Übergang von der klassischen zur modernen Physik.....	685
Kapitel 35: Die verflixte Lichtgeschwindigkeit: Die makroskopische Seite der Revolution.....	687
Kapitel 36: Gründe für die Quantenmechanik.....	699
Teil IX: Die moderne Physik der makroskopischen Welt.....	717
Kapitel 37: Alles ist nur relativ: Die Relativitätstheorie.....	719
Kapitel 38: Unvorstellbar groß: Das Weltall.....	739
Teil X: Die moderne Physik der mikroskopischen Welt.....	767
Kapitel 39: Die Welt wird klarer, aber auch unbestimmter: Die Quantenmechanik.....	769
Kapitel 40: Sie bilden die Elemente: Atome.....	793
Kapitel 41: Perfektion durch Zusammenschluss: Chemische Bindungen und die Bildung von Molekülen.....	817
Kapitel 42: Riesige Verbände von verbundenen Bausteinen: Festkörperphysik.....	841
Kapitel 43: Der Aufbau von Atomkernen.....	867
Kapitel 44: Es geht um gewaltige Energien: Kernspaltung und Kernfusion.....	883
Kapitel 45: Klein, aber oho!: Elementarteilchen.....	903
Teil XI: Der Top-Ten-Teil.....	919
Kapitel 46: Zehn spannende Nobelpreise aus den letzten 30 Jahren.....	921
Kapitel 47: Zehn wichtige Entdeckungen vor 1900.....	933
Kapitel 48: Zehn wichtige Entdeckungen nach 1900.....	943
Anhang	
Anhang A: Physikalische Konstanten und Größen.....	955
Anhang B: Ein klein wenig Mathematik: Mathematische Formelsammlung.....	971
Lösungen der Aufgaben in Teil I.....	995
Lösungen der Aufgaben in Teil II.....	997



**Auf einen Blick 15**

Lösungen der Aufgaben in Teil III.....	1015
Lösungen der Aufgaben in Teil IV.....	1021
Lösungen der Aufgaben in Teil V.....	1031
Lösungen der Aufgaben in Teil VI.....	1041
Lösungen der Aufgaben in Teil VII.....	1055
Lösungen der Aufgaben in Teil VIII.....	1061
Lösungen der Aufgaben in Teil IX.....	1065
Lösungen der Aufgaben in Teil X.....	1069
Abbildungsverzeichnis.....	1081
Stichwortverzeichnis.....	1095







Inhaltsverzeichnis

Einleitung	39
Über dieses Buch.....	39
Vereinbarungen in diesem Buch.....	39
Was Sie nicht lesen müssen.....	40
Annahmen über den Leser.....	40
Wie dieses Buch aufgebaut ist.....	41
Symbole in diesem Buch.....	41
Wie es weitergeht.....	42
TEIL I	
EINFÜHRUNG: WAS IST PHYSIK? WARUM PHYSIK?	43
Kapitel 1	
Was ist Physik?	45
Was ist Physik?.....	45
Klassische und moderne Physik.....	46
Ein kurzer Abriss der Geschichte der Physik.....	46
Die Anfänge reichen bis in das antike Griechenland zurück.....	47
Zeit des Stillstands: Das Mittelalter.....	47
Neuanfang im späten Mittelalter.....	47
Ein erster Höhepunkt: Die Renaissance.....	48
Entwicklung der Mechanik und der Optik im 17. Jahrhundert.....	49
Die Physik wird eine Wissenschaft: Das 18. Jahrhundert.....	50
Elektromagnetismus und Thermodynamik: Das 19. Jahrhundert.....	50
Kurz, aber wirkungsvoll: Die Revolution zu Beginn des	
20. Jahrhunderts.....	50
High-Life in der Physik: Die ersten Jahrzehnte	
des 20. Jahrhunderts.....	51
Seitdem: Stetiger Fortschritt ohne Augenöffner.....	51
Einteilung der Physik, Aufbau dieses Buches.....	52
Die Physik und die anderen Naturwissenschaften.....	54
Kapitel 2	
Messen und Maßeinheiten	57
Modelle, Theorien und Gesetze.....	57
Beobachtung und Experiment.....	58
Es kommt auf die Messgenauigkeit an: Messfehler.....	58
Darstellung von Messwerten.....	60
Einheitensysteme.....	61
Darstellung von physikalischen Ergebnissen.....	63





18 Inhaltsverzeichnis

TEIL II	
MECHANIK	67
Kapitel 3	
Bewegung pur: Die Kinematik	69
Bewegung schafft Raum und Zeit	69
Unendlich klein, aber oho! Der Massenpunkt	71
Drei Größen zur Beschreibung von Bewegungen: Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung	72
Bewegung bedeutet das Zurücklegen eines Weges	72
Geschwindigkeit ist keine Hexerei	73
Bleifuß oder Bremse: Die Beschleunigung	75
Bewegungen lassen sich addieren: Das Superpositionsprinzip	76
Runter kommen sie immer: Der Wurf	78
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	79
Kapitel 4	
Der Apfel fällt nicht weit vom Stamm: Die Newton'schen Gesetze	81
Die Kräfte sind entscheidend	81
Grundlagen der Mechanik: Die Newton'schen Gesetze	82
Sich Änderungen widersetzen: Das erste Newton'sche Gesetz	83
Je größer die Kraft, desto größer die Wirkung: Das zweite Newton'sche Gesetz	83
Zu jeder Kraft gibt es eine Gegenkraft: Das dritte Newton'sche Gesetz	84
Die Größen der Newton'schen Gesetze	85
Arbeiten mit Kräften	85
Jede Masse besitzt zwei Eigenschaften	88
Gleich und doch nicht gleich	93
Dichte	94
Auch Kräfte können träge sein: Das d'Alembert'sche Prinzip	94
Schein oder nicht Schein: Trägheitskräfte	95
Die Summe von Kräften und Trägheitskräften ist null	96
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	97
Kapitel 5	
Arbeit und Leistung	99
Arbeit	99
So viele Arbeiten	101
Leistung ist Arbeit pro Zeit	105
Wirkungsgrad	106
Etwas für Afficionados: Gravitationsfelder und Gravitationspotenziale	109
Überall im Raum definiert: Die Gravitationsfeldstärke	109
Arbeit im Gravitationsfeld: Das Gravitationspotenzial	111
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	112



Inhaltsverzeichnis 19

Kapitel 6	
Impuls und Energie	113
Eher unscheinbar: Der Impuls	113
Es geht nichts verloren: Die Energie	114
Gespeicherte Arbeit: Die Definition der Energie	115
Formen von Energie	116
Beispiele für Energien	116
Energie und Impuls sind konstant: Die Erhaltungssätze	117
Vollkommen autark: Abgeschlossene Systeme	118
Impulserhaltungssatz	119
Auch die Gesamtenergie ist konstant: Der Energieerhaltungssatz	120
Mitten ins Herz: Stöße	121
Was genau ist ein Stoß?	122
Klassifizierung von Stößen	122
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	126
Kapitel 7	
Rundherum: Die Kreisbewegung	129
Ständig beschleunigt: Die gleichförmige Kreisbewegung	129
Winkel pro Zeit gleich Winkelgeschwindigkeit	131
Winkelbeschleunigung	133
Jetzt geht es ab: Die Tangentialbeschleunigung	135
Die eine wirkt nach innen, die andere scheinbar nach außen: Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft	137
Zentripetalkraft	137
Zentrifugalkraft	138
Translationsbewegungen und Kreisbewegungen: Ein erster Vergleich	140
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	140
Kapitel 8	
Rotation starrer Körper	143
Die Form berücksichtigen: Drehmoment und Trägheitsmoment	144
Das Bewegungsgesetz für Rotationsbewegungen	144
Alle Punkte bewegen sich gleich	145
Der Abstand ist entscheidend: I. Das Drehmoment	146
Der Abstand ist entscheidend: II. Das Trägheitsmoment	148
Die Lage der Achse ist entscheidend: Der Satz von Steiner	150
Auch bei Drehbewegungen von Bedeutung: Impuls, Arbeit, Energie und Leistung	151
Drehimpuls	151
In jeder Bewegung steckt Energie: Die Rotationsenergie	153
Natürlich erfordert eine Drehbewegung Arbeit	155
Die Leistung bei Rotationsbewegungen	155
Vergleich Rotation und Translation	156
Tiefdruckgebiete drehen sich immer gegen den Uhrzeigersinn: Die Corioliskraft	156
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	160



20 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 9

Hinderlich und doch unverzichtbar: Die Reibung..... 163

Viele verschiedene Arten der Reibung.....	164
Sich großflächig reiben: Die Coulomb'sche Reibung.....	164
Wie festgeklebt: Die Haftreibung.....	165
Irgendwie hakt es immer noch: Die Gleitreibung.....	168
Weitere Reibungsarten.....	169
Rollreibung.....	169
Der Wind kommt immer von vorn: Der Luftwiderstand.....	171
Ein oder zwei Schlaufen reichen zum Festmachen: Die Seilreibung.....	174
Vor- und Nachteile der Reibung.....	175
Achtmal Reibung bei einem simplen Gerät: Das Fahrrad.....	176
Bremsen.....	177
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	178

TEIL III

VIELE ATOME BILDEN EIN KONTINUUM: DIE KONTINUUMSMECHANIK..... 181

Kapitel 10

Die Form kehrt zurück: Die Elastizitätslehre..... 183

Belastungen erzeugen Spannungen.....	183
Belastungen.....	184
Jetzt wird's spannend: Schieben, Ziehen und Drücken.....	184
Je größer die Belastung, umso größer die Verformung: Das Hooke'sche Gesetz.....	186
Die vier elastischen Konstanten.....	187
In die Länge gezogen: Der Elastizitätsmodul.....	187
Nicht nur längs, sondern auch quer: Die Poissonzahl.....	188
Ansturm von allen Seiten: Der Kompressionsmodul.....	189
Und noch ein Modul: Der Schubmodul.....	190
Relative Volumenänderung.....	191
Nicht völlig unabhängig: Beziehungen zwischen den elastischen Konstanten.....	193
Diskussion der elastischen Konstanten.....	194
Auch in der Verformung steckt Energie.....	196
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	197

Kapitel 11

Wenn die Belastungen größer werden: Plastische Verformung und Bruch..... 199

Jenseits des elastischen Bereichs.....	200
Verformbar oder nicht?.....	200
Spannungs-Dehnungs-Kurven.....	200
Eine Kurve und eine Vielzahl von Parametern.....	203
Plastische Verformung und Bruch.....	205





Inhaltsverzeichnis 21

Beschreibung der plastischen Verformung.....	205
Mechanismen der plastischen Verformung.....	207
Gegenmittel.....	209
»Plink!« Der spröde Bruch.....	210
Das Griffith-Modell des spröden Bruchs.....	211
Zähigkeit: Widerstand gegen spröden Bruch.....	212
Betrachtung von Oberflächen.....	217
Das ist die Härte.....	217
Einritzen: Das Mohs-Verfahren.....	217
Verschleiß.....	219
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	221

Kapitel 12

Sie kann ziemlich turbulent sein: Die Hydrodynamik..... 223

Aggregatzustände.....	223
Ruhende Flüssigkeiten und Gase.....	224
Der Druck lastet schwer.....	225
Auftrieb.....	230
Oberflächen und Grenzflächen.....	232
Nur Luft und Wasser: Oberflächenspannung und -energie.....	232
Es geht an die Grenzen: Grenzflächenenergie und Grenzflächenspannung.....	233
Flüssigkeitsoberflächen können gewölbt sein: Die Kapillarität.....	234
Und wieder einmal die Reibung: Viskosität und Zähigkeit.....	236
Zäh wie Honig: Die Viskosität.....	237
Flüssigkeiten und Gase strömen sehr ähnlich: Bewegte Fluide.....	239
Welche Kräfte greifen an?.....	240
Laminare und turbulente Strömung.....	240
Einige Beispiele von Strömungsproblemen.....	241
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	244

TEIL IV

SCHWINGUNGEN UND WELLEN 247

Kapitel 13

Harmonische Schwingungen..... 249

Der Idealfall: Harmonische Schwingungen.....	250
Die Rückstellkraft ist entscheidend: Die Definition einer harmonischen Schwingung.....	250
Eine ganz einfache Differenzialgleichung: Die Schwingungsgleichung.....	251
Größen zur Beschreibung einer harmonischen Schwingung.....	255
Harmonische Schwingungen ganz konkret.....	257
Der Klassiker: Das Federpendel.....	257
Auf den Punkt gebracht: Das mathematische Pendel oder Fadenpendel.....	260
Ziemlich ausgedehnt: Das physikalische Pendel oder Brettpendel.....	265
Ziemlich verdreht: Das Torsionspendel.....	266





22 Inhaltsverzeichnis

Hätten Sie gedacht, dass das eine harmonische Schwingung ist?.....	267
Richtgrößen und Systemgrößen.....	269
Konstruktiv oder destruktiv: Überlagerung von Schwingungen.....	269
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	272

Kapitel 14

Reale Schwingungen..... 275

Nichts währt ewig: Gedämpfte Schwingungen.....	276
Nur geringe Einflüsse: Der Schwingfall.....	276
Die Saloontür: Der aperiodische Grenzfall.....	277
Ziemlich langsam: Kriechfall.....	279
Größen zur Beschreibung der Dämpfung.....	279
Dieser Rhythmus, dass jeder mit muss: Erzwungene Schwingungen.....	280
Das Pohl'sche Pendel.....	280
An einer Stelle knallt es: Das Amplitudenverhältnis und die Resonanz.....	282
Nicht ganz im Takt: Die Phasenverschiebung.....	284
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	286

Kapitel 15

Gemeinsam schwingt es sich leichter:

Schwingungssysteme..... 287

Gekoppelte Schwingungen.....	287
Wichtige Begriffe.....	290
Längs oder quer: Transversale und longitudinale Schwingungen.....	291
Bewegungsmöglichkeiten: Freiheitsgrade.....	291
Eigenschwingungen.....	292
Stabschwingungen.....	292
Longitudinalschwingungen.....	293
Transversalschwingungen.....	295
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	296

Kapitel 16

Ein Surferparadies: Wellen..... 299

Der Swing geht auf die Reise: Wellen.....	300
Definition einer Welle.....	300
Ausbreitung von Wellen.....	301
Die Differenzialgleichung schlechthin: Die Wellengleichung.....	303
Sie enthalten die Ortsabhängigkeit: Wellenlänge und Wellenzahl.....	304
Eine Größe fehlt noch: Die Ausbreitungsgeschwindigkeit.....	306
Interferenz und Beugung.....	309
Wenn zwei sich treffen: Interferenz.....	309
Viele Einzelne bilden ein Ganzes: Das Huygens'sche Prinzip.....	311
Wellen können um die Ecke gehen: Die Beugung.....	312
Ein Engpass kann Wellen nichts anhaben: Die Beugung am Spalt.....	312
Stehende Wellen.....	317
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	320

Inhaltsverzeichnis 23

Kapitel 17	
Wellen kann man auch hören: Die Akustik	321
Schallwellen	321
Eine mathematische Betrachtung des Schalls	325
Schallschnelle und Druckamplitude	325
Die Schallgeschwindigkeit hängt vom Material ab	326
Laut und leise: Die Intensität einer Schallwelle	328
Eher subjektiv: Die Klangqualität	330
Dopplereffekt und Überschallknall	332
Immer wieder an der Bahnschranke: Der Dopplereffekt	332
Durch die Wand: Der Überschallknall	336
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	337

TEIL V	
DIE OPTIK SORGT FÜR DEN DURCHBLICK	339

Kapitel 18	
Es werde Licht	341
Licht ist eine Welle	341
Der Doppelspaltversuch	342
Was schwingt beim Licht?	342
Lichtgeschwindigkeit	344
Frequenz und Wellenlänge	344
Das elektromagnetische Spektrum	345
Die verschiedenen Gestalten des Lichts	347
Vorwärts wie rückwärts: Licht als Strahl	347
Licht als Welle	348
Licht als Teilchenstrom	348
Licht quantitativ: Intensität, Strahlungsleistung und Lichtmenge	350
Rein physikalisch: Energetische Größen	351
Das Auge misst mit: Fotometrische Größen	352
Polarisation	355
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	358

Kapitel 19	
Auch Licht kann gebeugt werden	359
Interferenz von Licht	359
Eine notwendige Bedingung: Die Kohärenz	359
Beispiele	360
Beugung von Licht	364
Beugung an Spalten	365
Eine Vielzahl von Spalten: Die Beugung am Gitter	365
Arten der Beugung von Licht	367
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	371



24 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 20

Zwei grundlegende optische Effekte: Reflexion und

Brechung	373
Wechselwirkung von Licht mit Materie.....	373
Es geht wieder zurück: Die Reflexion.....	375
Reflexionsgesetz.....	375
Eine neue Richtung einschlagen: Die Brechung.....	376
Der Winkel ändert sich: Das Brechungsgesetz.....	376
Ursache der Brechung.....	376
Der Brechungsindex und weitere wichtige Größen.....	377
Beispiele für Brechungseffekte.....	381
Totalreflexion.....	385
Licht kann auch verloren gehen: Die Absorption.....	389
Es wird langsam dunkler: Der Absorptionskoeffizient.....	389
Sie decken alle Fälle ab: Die Fresnel'schen Formeln.....	390
Abbildungen in der Optik.....	394
Reelle und virtuelle Bilder.....	394
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	395

Kapitel 21

Spieglein, Spieglein an der Wand	397
Arten von Spiegeln.....	397
Die Welt hinter dem Spiegel: Ebene Spiegel.....	398
Einsammeln von Licht: Hohlspiegel.....	400
Das Spiegelgesetz.....	400
Konstruktion mittels Hauptstrahlen.....	403
Wichtig für Straßenverkehr und Make-up: Der gewölbte Spiegel.....	407
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	408

Kapitel 22

Sie können sammeln oder zerstreuen: Linsen	411
Arten von Linsen.....	412
Analog zur Spiegelgleichung: Die Linsengleichung.....	413
Annäherung durch Prismen.....	413
Gar nicht so kompliziert: Die Herleitung der Linsengleichung.....	414
Charakteristika einer Linse: Brennweite und Brechkraft.....	416
Konstruktion des Bildes einer Sammellinse mittels der Hauptstrahlen.....	417
Und wiederum: Die Hauptstrahlen.....	417
Zerstreuungslinsen.....	420
Nobody is perfect: Linsenfehler.....	420
Chromatische Aberration.....	421
Sphärische Aberration.....	422
Kein Tiefschlaf, sondern ein Linsenfehler: Die Koma.....	422
Bildwölbungsfehler.....	424
Linsenkombinationen.....	424
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	426





Inhaltsverzeichnis 25

Kapitel 23	
Das Auge ist gut, aber es geht noch besser	429
Das menschliche Auge	429
Aufbau und Funktionsweise	430
Eine Brille muss her: Sehfehler	432
Einige nützliche Definitionen	433
Das einfachste Instrument: Die Lupe	435
Blick ins Innere des Lebens: Das Mikroskop	436
Aufbau eines Mikroskops	436
Vergrößerung	437
Es gibt Grenzen: Das Auflösungsvermögen	438
Blick in die Ferne und ins Weltall: Fernrohre	443
Linsenfernrohre	443
Spiegelteleskope	444
Vergrößerung und andere Kennwerte	446
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	448
TEIL VI	
ELEKTRISIEREND UND MAGNETISIEREND ZUGLEICH: DER ELEKTROMAGNETISMUS	451
Kapitel 24	
Ruhende Punktladung: Elektrostatik I	453
Sie können gewaltige Kräfte hervorrufen: Elektrische Ladungen	453
Plötzlich kriegt man einen gewischt! Elektrostatische Phänomene	454
Reibung setzt Ladung frei	454
Eine erste Zusammenfassung	455
Die Trennung von Ladungen	456
Ladungstrennung durch Reibung	456
Die Kräfte zwischen Ladungen werden ausgenutzt: Die Influenz	457
Unteilbar: Die Elementarladung	459
Es regelt die Kraft zwischen Punktladungen: Das Coulomb'sche Gesetz	462
Wirkung auf eine Probeladung: Das elektrische Feld	463
Felder sichtbar machen: Feldlinien	465
Schon wieder: Das Superpositionsprinzip	465
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	466
Kapitel 25	
Ausgedehnte Ladungen: Elektrostatik II	469
Geladene Wolken: Ladungsverteilungen	470
Radiale Felder	470
Homogene Felder	471
Auch in der Elektrizitätslehre allgegenwärtig: Arbeit und Energie	473
Sie komplettieren die Liste: Potenzial und Spannung	476
Zusammenfassung der elektrischen Feldgrößen	480
Kondensatoren können Ladungen speichern: Die Kapazität	481





26 Inhaltsverzeichnis

Kondensatoren können auch ein Dielektrikum enthalten.....	481
Dipole richten sich aus.....	482
Realisierung von Kondensatoren.....	483
Ein Schaltkreis kann mehrere Kondensatoren enthalten.....	485
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	487

Kapitel 26

Immer in die gleiche Richtung: Gleichstromkreise 489

Die erste von zwei wichtigen Größen: Die Stromstärke.....	490
Strom ist Ladung pro Zeit.....	490
Meistens sind es Elektronen: Der Ladungstransport.....	490
Die zweite wichtige Größe: Die Spannung.....	492
Sie geben Ladungsträgern einen Kick: Spannungsquellen.....	492
Widerstand auf elektrisch.....	496
Der Widerstand ist streng geregelt: Das Ohm'sche Gesetz.....	496
Ein Widerstand bedingt einen Spannungsabfall.....	497
Der Widerstand kann sehr spezifisch sein.....	497
Gleichstromkreise.....	500
Ein Widerstand kommt selten allein.....	500
Knoten und Maschen: Die Kirchhoffschen Regeln.....	503
Elektrizität bedeutet Leistung.....	505
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	506

Kapitel 27

Magnetismus..... 509

Magnetische Phänomene.....	509
Sie sind immer magnetisch: Permanentmagnete.....	510
Stromdurchflossene Leiter sind auch magnetisch.....	511
Zwei Größen zur Beschreibung magnetischer Felder.....	515
Feldgröße 1: Die magnetische Induktion.....	515
Feldgröße 2: Die Magnetfeldstärke.....	516
Immer mehr Windungen: Spulen.....	519
Bewegte Ladungen in elektromagnetischen Feldern.....	523
Immer geradeaus: Ladungen im elektrischen Feld.....	523
Im Kreis herum: Bewegte Ladungen im magnetischen Feld.....	525
Eine Vielzahl technischer Anwendungen: Bewegte Ladungen in kombinierten Feldern.....	527
Der Hall-Effekt.....	527
Alle Materialien sind magnetisch, aber es gibt gewaltige Unterschiede.....	529
Berücksichtigung des Materials: Permeabilität und Suszeptibilität.....	530
Der Ursache entgegengesetzt: Der Diamagnetismus.....	531
Alle richten sich aus: Der Paramagnetismus.....	531
Drastische Effekte: Der Ferromagnetismus.....	533
Vergleich der Materialien.....	536
Abarten: Ferrimagnetismus und Antiferromagnetismus.....	537
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	538



Inhaltsverzeichnis 27

Kapitel 28	
Induktion	539
Magnetische Felder erzeugen Spannungen: Die Induktion.....	539
Eine einfache Leiterschaukel.....	539
Entscheidend ist die Änderung des magnetischen Flusses	541
Der Ursache entgegenwirken: Die Lenz'sche Regel	542
Es passiert auch im eigenen Leiterkreis: Die Selbstinduktion.....	545
Die Induktion: Ein Effekt mit vielen Anwendungen.....	548
Die einfache Erzeugung von Wechselstrom: Der Generator.....	548
Die Umkehrung des Generatorprinzips: Der Elektromotor	550
Rauf und runter: Der Transformator	552
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	553
Kapitel 29	
Es geht ständig auf und ab: Wechselstromkreise	555
Es lebe die Veränderung: Wechselströme	556
Es kommt auf die Effektivität an: Die Leistung eines Wechselstromkreises.....	556
Gleichstrom vs. Wechselstrom.....	558
Jede Menge Widerstände	560
Strom und Spannung im Gleichtakt: Der Ohm'sche Widerstand.....	560
Kondensatoren müssen geladen werden: Der kapazitive Widerstand.....	561
Ein zögerlicher Beginn: Der induktive Widerstand	564
Meist treten sie vereint auf: Widerstandskombinationen.....	566
Bezeichnung der Widerstände	567
Einer ist zumeist vorn: Der Phasenwinkel	568
Leistung kann auch blind sein	569
Eine einfache und elegante Darstellung: Zeigerdiagramme	572
It Don't Mean a Thing if You Ain't Got That Swing: Schwingkreise	574
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	576
Kapitel 30	
Der ganze Elektromagnetismus in vier Gesetzen: Die Maxwell'schen Gleichungen	577
Stand der Dinge: Elektrische und magnetische Felder	577
Elektrostatische Felder	577
Magnetostatische Felder	578
Elektromagnetische Felder.....	578
Beschreibung durch Feldgrößen.....	579
Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen elektrischen und magnetischen Feldern.....	581
Ihr Auftritt, Herr Maxwell!.....	581
Der ganze Schlamassel auf einen Blick.....	581
Symmetrie und Asymmetrie der Maxwell'schen Gleichungen	582



28 Inhaltsverzeichnis

Maxwell #1: Das Gauß'sche Gesetz	582
Maxwell #2: Das Gauß'sche Gesetz für Magnetfelder	583
Maxwell #3: Das Induktionsgesetz	583
Maxwell #4: Das Durchflutungsgesetz	584
Monopole, Dipole und Quadrupole	585
Elektrische Mono- und Multipole	585
Magnetische Dipole	587
Zum Schluss ein Augenöffner: Elektromagnetische Wellen	588
Die Vorhersage durch Maxwell	588
Die Realisierung durch Hertz	590
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	592

Kapitel 31

Halbleiterphysik und Halbleiterbauelemente 593

Weder Leiter noch Isolatoren: Halbleiter	594
Die Eigenleitung: Elektronen und Löcher	594
Banddiagramme	597
Materialien	599
Die Dotierung: Elektronen oder Löcher	600
Sie bestimmen die Eigenschaften eines Halbleiters:	
Die Ladungsträgerkonzentrationen	602
Halbleiterbauelemente	605
Mit n- und p-Gebieten: Bipolar-Bauelemente	606
Feldeffekt-Bauelemente	610
Schottky-Bauelemente	615
Halbleitertechnologie	616
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel	619

TEIL VII

THERMODYNAMIK

621

Kapitel 32

Leicht komprimierbar: Die Thermodynamik

von Gasen 623

Die vier Zustandsgrößen	623
Je geringer das Volumen, umso höher der Druck: Das Gesetz von Boyle-Mariotte	624
Je wärmer, desto größer: Das Gesetz von Gay-Lussac	625
Steigt die Temperatur, steigt auch der Druck: Das Gesetz von Amontons	626
Vorläufige Zusammenfassung	626
Gase enthalten sehr viele Teilchen: Die Avogadrozahl	629
Ideal oder real: Gasgesetze	630
Perfekt: Das ideale Gasgesetz	630
Einige Korrekturen sind notwendig: Das reale Gasgesetz	632
Auch Gase besitzen eine Energie: Die Kinematik von Gasteilchen	634
Wie viel Freiheit?	634



Inhaltsverzeichnis 29

Gasteilchen sind nicht gerade langsam	636
Betrachtung der Gesamtenergie.....	637
Nicht alle sind gleich schnell: Die Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung	637
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	639

Kapitel 33 Temperaturphänomene und Wärmetransport..... 641

Hitze in Zahlen: Die Temperatur	641
Die Messung der Temperatur	641
Temperaturskalen.....	642
Umrechnungen	643
Kälter geht's nicht: Der absolute Nullpunkt.....	644
Mit der Temperatur nimmt auch die Größe zu: Die Wärmeausdehnung.....	646
Eindimensional: Die Längenausdehnung.....	646
Ausdehnung in alle Dimensionen: Die Volumenausdehnung.....	648
Man kann Wärme auch quantitativ messen	649
Eine quantitative Größe: Die Wärmemenge	650
Wärme kann gespeichert werden: Die Wärmekapazität	650
Ein Stoff in verschiedenen Zuständen: Phasen	651
Zwei Aggregatzustände zugleich: Phasenübergänge	651
Nicht gerade offensichtlich: Die latente Wärme.....	652
Phasendiagramme.....	654
Es gibt eine große Anzahl von Phasen	656
Langsam, aber stetig: Der Wärmetransport.....	656
Es läuft auf einen Temperatenausgleich hinaus: Die Wärmeleitung	657
Immer im Kreis: Die Konvektion	660
In der Sonne ist es warm: Die Wärmestrahlung.....	661
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	661

Kapitel 34 Das Fundament der Thermodynamik: Die Hauptsätze 663

Null, aber wichtig: Der nullte Hauptsatz.....	663
Wärme ist eine Form von Energie: Der erste Hauptsatz.....	664
Wichtige Prozesse mit seltsamen Namen	665
Es geht um Maschinen: Der zweite Hauptsatz	673
Wärme wird in Kraft umgewandelt: Wärmekraftmaschinen.....	673
Der Wirkungsgrad ist stets kleiner als eins.....	674
Ideal, aber nicht 100 %: Der Carnot-Prozess.....	676
Eine nicht ganz einfache Größe: Die Entropie.....	679
Dritter Hauptsatz	683
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	683



30 Inhaltsverzeichnis

TEIL VIII

EINE ART VON REVOLUTION: DER ÜBERGANG VON DER KLASSISCHEN ZUR MODERNEN PHYSIK **685**

Kapitel 35

Die verflixte Lichtgeschwindigkeit: Die makroskopische Seite der Revolution **687**

Sie geben den Rahmen: Bezugssysteme	687
Ruhesysteme	688
Inertialsysteme.....	689
Beschleunigte Systeme.....	690
Von einem System zum anderen: Transformationen	691
Galilei-Transformationen	691
Die Lichtgeschwindigkeit ist schuld an der Relativitätstheorie	692
Nicht einfach zu messen: Die Lichtgeschwindigkeit.....	692
Die Lichtgeschwindigkeit ist konstant.....	694
Die Schlussfolgerungen und die Konsequenzen.....	695
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	696

Kapitel 36

Gründe für die Quantenmechanik **699**

Schwarzkörperstrahlung	700
Was ist ein schwarzer Körper?.....	700
Die Farbe hängt von der Temperatur ab: Beobachtungen.....	701
Klassische Erklärungsversuche.....	701
Lösung durch Quantisierung: Das Planck'sche Strahlungsgesetz	705
Rayleigh-Jeans – Wien – Planck: Ein Vergleich	707
Der Fotoeffekt.....	708
Die experimentellen Tatsachen.....	708
Klassische Erklärungsversuche.....	709
Die Erklärung Einsteins.....	709
Photon schiebt Elektron: Der Compton-Effekt.....	712
Der Compton-Versuch.....	712
Die Erklärung	712
Die moderne Physik schlägt zurück.....	713
Welle oder Teilchen? Beides!	713
Nicht jeder Wert ist erlaubt: Die Quantisierung.....	714
Die Schlussfolgerungen	714
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	714

TEIL IX

DIE MODERNE PHYSIK DER MAKROSKOPISCHEN WELT **717**

Kapitel 37

Alles ist nur relativ: Die Relativitätstheorie **719**

Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.....	720
Ein Gedankenexperiment	720



Inhaltsverzeichnis 31

Der Ausgangspunkt der Relativitätstheorie: Einsteins Postulate	721
Das erste Postulat.....	721
Das zweite Postulat.....	721
Das Ende der Galilei-Transformationen und die Geburt der Lorentz-Transformation	722
Alles ist relativ.....	724
Zeit ist nicht länger absolut: Die Zeitdilatation	724
Addition von Geschwindigkeiten.....	728
Längenkontraktion.....	728
Massenzunahme	729
Nun endlich: $E = mc^2$	730
Vom Speziellen zum Allgemeinen.....	733
Das Äquivalenzprinzip.....	733
Relativität ist ein Prinzip	735
Die Raumzeit wird gekrümmt.....	735
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	737

Kapitel 38

Unvorstellbar groß: Das Weltall 739

Ein Nachbarschaftsbesuch: Das Planetensystem	740
Wenn Jupiter auf Mars zugeht: Die Planeten.....	740
Was sonst noch so rumschwirrt.....	743
The Moon of Alabama oder der Mond von Wanne-Eickel?.....	744
Die Welt war eine Scheibe: Die Entstehung des Sonnensystems	746
Sie ist der Chef: Die Sonne	746
Groß und hell: Aufbau und Eigenschaften der Sonne.....	746
Aus Wasserstoff wird Helium: Die Wirkungsweise der Sonne.....	748
Nur einer von vielen: Die Sterne	748
Größen zur Beschreibung von Sternen.....	749
Das Hertzsprung-Russel-Diagramm	753
Von der Wolke bis zum Kollaps: Der Lebenszyklus der Sterne.....	755
Unvorstellbar groß: Das Universum.....	758
Die Milchstraße ist nur eine von vielen Galaxien.....	758
Das Universum und der ganze Rest.....	760
The Big Bang Theory: Der Urknall.....	761
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	764

TEIL X

DIE MODERNE PHYSIK DER MIKROSKOPISCHEN WELT 767

Kapitel 39

Die Welt wird klarer, aber auch unbestimmter: Die Quantenmechanik..... 769

Die Quantenmechanik löst offene Fragen, wirft aber auch neue auf.....	770
Sie regelt alles: Die Schrödingergleichung.....	770
Beschreibung durch Wellenfunktionen.....	771



32 Inhaltsverzeichnis

Eigentlich nur Rechenvorschriften: Operatoren.....	772
Konkrete Zahlen: Die Eigenwerte.....	773
Ein Topf mit besonderem Inhalt: Die Vorgehensweise der Quantenmechanik.....	773
Darstellungsweisen in der Quantenmechanik.....	778
Die wichtigsten Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Quantenmechanik.....	778
Ein Phänomen, zwei Beschreibungen: Der Welle-Teilchen- Dualismus.....	779
Quantisierung.....	781
Bestimmt unbestimmt.....	781
Sie kommen im Paket: Quantenobjekte.....	783
Voll durch die Wand: Der Tunneleffekt.....	785
Die Zukunft auf den Schultern der Quantenmechanik.....	788
Einfach Nano: Die Nanowelt.....	788
Auch in der Quantenwelt: Neue Technologien.....	790
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	791

Kapitel 40

Sie bilden die Elemente: Atome..... 793

118 Elemente aus nur drei Bausteinen.....	793
Atome sind weitgehend leer: Das Rutherford-Experiment.....	795
Atommodelle.....	796
Erste Erklärungsversuche: Frühe Modelle.....	796
Das Linienspektrum des Wasserstoffatoms.....	797
Nicht ganz richtig und dennoch von großer Bedeutung: Das Bohrsche Atommodell.....	798
Einfacher geht's nicht: Das Wasserstoffatom.....	801
Nicht nur eine, sondern gleich vier Quantenzahlen.....	801
Aufteilung der Wellenfunktion.....	801
Keine Kreisbahnen, sondern Wahrscheinlichkeitswolken: Orbitale.....	806
Vielgestaltige Orbitale: Atome mit vielen Elektronen.....	810
Ein jedes an seinem Platz: Das Pauliprinzip.....	810
Die Hund'schen Regeln.....	811
Sieht kompliziert aus, ist aber eigentlich ganz einfach: Das Periodensystem.....	813
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	816

Kapitel 41

Perfektion durch Zusammenschluss: Chemische Bindungen und die Bildung von Molekülen..... 817

Verschiedene Methoden, sich zu verbinden: Die chemische Bindung.....	818
Primäre Bindungen.....	818
Vereint lebt es sich besser: Moleküle.....	819
Arten von Molekülen.....	819



Inhaltsverzeichnis 33

Nur die Edelgase sind zufrieden: Gründe für die Bildung von Molekülen.....	819
Wem gehört das Elektron? Die Elektronegativität	822
Aufenthaltswahrscheinlichkeiten: Molekülorbitale	823
Ein Spezialfall: Das Kohlenstoffatom	824
Sekundäre Bindungen.....	830
Makromoleküle.....	833
Molekülspektren.....	837
Molekülschwingungen	837
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	839

Kapitel 42

Riesige Verbände von verbundenen Bausteinen:

Festkörperphysik..... 841

Eine regelmäßige Anordnung: Das Kristallgitter	842
Kristalline und amorphe Festkörper.....	842
Basis + Gitter: Definition einer Kristallstruktur	843
Es kann nur 14 geben: Die Bravaisgitter	845
In einen anderen Raum wechseln: Das reziproke Gitter.....	847
Drei Zahlen zur Beschreibung von Richtungen und Flächen: Die Miller'schen Indizes	848
Röntgenbeugung.....	849
Die chemische Bindung ist ausschlaggebend: Arten von Festkörpern	850
Ein Gas aus Elektronen: Metallische Festkörper	851
Ionische Festkörper	852
Kovalente Festkörper	853
Betreten verboten: Das Bändermodell.....	854
Das Gitter ist entscheidend: Festkörpereigenschaften.....	859
Auch Gitter können schwingen	859
Ein Gas aus Elektronen: Elektrische Leitfähigkeit von Metallen.....	862
Wärmeleitung.....	863
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	865

Kapitel 43

Der Aufbau von Atomkernen..... 867

Äußerst kompakt: Der Aufbau von Atomkernen.....	867
Nur Protonen und Neutronen: Die Bausteine von Atomkernen.....	868
Chemisch gleich, physikalisch verschieden: Isotope.....	869
Die starke Wechselwirkung	869
Kerne halten zusammen: Die Bindungsenergie.....	871
Atomkerne können einfach zerfallen: Die natürliche Radioaktivität.....	873
Irgendwie stimmt es nicht: Der radioaktive Zerfall.....	873
Nur noch die Hälfte.....	875
Radioaktive Strahlung.....	879
Gray und Sievert: Die Strahlungsdosis.....	880
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	882



34 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 44

Es geht um gewaltige Energien: Kernspaltung und

Kernfusion	883
Die Mitte ist begünstigt: Die Weizsäcker'sche Massenformel	884
Von oben nach unten: Kernspaltung.....	888
Die physikalischen Grundlagen	888
Kernwaffen	890
Kernenergie	893
Was passieren kann, wenn alles schiefgeht: Die Kernschmelze	895
Von unten nach oben: Kernfusion	897
Das Prinzip.....	897
Die Sonne im Herzen: Fusionsreaktoren.....	898
Die Wasserstoffbombe.....	900
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	901

Kapitel 45

Klein, aber oho!: Elementarteilchen 903

Erzeugung und Beobachtung von Elementarteilchen	904
Elementarteilchenphysik ist Hochenergiephysik.....	904
Zoo der Elementarteilchen.....	905
Antimaterie	906
Paarvernichtung.....	907
Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik.....	909
Klassen von Teilchen	909
Von schwach bis stark: Die vier fundamentalen Wechselwirkungen.....	910
Ein Zoo mit ziemlich vielen Teilchen.....	911
Starker Auftritt: Hadronen	911
Nicht immer leichte Teilchen: Leptonen.....	914
Rot, Grün und Blau: Die »Farben« und weitere Eigenschaften der Quarks.....	915
Drei Generationen von Fundamentarteilchen.....	916
Übungsaufgaben zu diesem Kapitel.....	918

TEIL XI

DER TOP-TEN-TEIL **919**

Kapitel 46

Zehn spannende Nobelpreise aus den letzten

30 Jahren	921
Der Nobelpreis 1995: Die Faszination der Neutrinos oder neue Entdeckungen im Teilchenzoo.....	921
Der Nobelpreis 1996 (Chemie): Fullerene oder die Entdeckung der ersten Kohlenstoffnanostrukturen	922
Der Nobelpreis 2002: Ein 100.000-Gallonen-Tank in einer Goldmine oder das Problem der fehlenden Sonnenneutrinos.....	923





Inhaltsverzeichnis 35

Der Nobelpreis 2004: Die asymptotische Freiheit oder das Leben in der Ursuppe.....	925
Der Nobelpreis 2010: Graphen oder die wundersame Welt im Zweidimensionalen.....	926
Der Nobelpreis 2012: Die Manipulation von Quantensystemen oder der Einstieg in neue Quantentechnologien.....	927
Der Nobelpreis 2013: Der Ursprung der Masse subatomarer Teilchen oder auf der Jagd nach dem Higgs-Boson.....	928
Der Nobelpreis 2015: Die Suche nach den fehlenden Sonnenneutrinos oder die Oszillationen der Neutrinos.....	929
Der Nobelpreis 2022: Einstein und die verborgenen Parameter oder die Quantenverschränkung.....	930
Der Nobelpreis 2023 (Chemie): Quantenpunkte oder Nanokristalle aus der Zwischenwelt.....	931

Kapitel 47

Zehn wichtige Entdeckungen vor 1900 933

Im freien Fall: Galileis Fallrinne.....	933
Selbst 30 Pferde reichten nicht: Die Magdeburger Halbkugeln.....	934
Die Zustandsgleichung idealer Gase.....	935
Von Bernstein und Froschschenkeln: Die Ursprünge der Elektrizitätslehre.....	936
Der Ørsted-Versuch.....	937
Faradays Untersuchungen zur Induktion.....	938
Die Entdeckung der großen Jupitermonde durch Galilei.....	939
Das Doppelspaltexperiment von Young.....	940
Es gibt keinen Äther: Der Michelson-Morley-Versuch.....	941
Strahlende Aussichten: Die Entdeckung der Radioaktivität.....	942

Kapitel 48

Zehn wichtige Entdeckungen nach 1900 943

Aufspaltung im Magnetfeld: Der Zeeman-Effekt.....	944
Der Franck-Hertz-Versuch (1911–1914).....	944
Das Bohrsche Atommodell (1913).....	946
Die Entwicklung der Quantenmechanik Mitte der 20er-Jahre.....	946
Der Nachweis der Elektronenbeugung (1927).....	947
Die Entdeckung von Neutron und Positron (1932).....	948
Das Neutrino: 1933 postuliert, 1956 gefunden.....	949
Die Entdeckung der Kernspaltung durch Otto Hahn, Lise Meitner und Fritz Straßmann (1938).....	951
Die Erfindung des Transistors (1947).....	952
Die Entwicklung des Raster-Tunnelmikroskops (1981).....	953

Anhang A

Physikalische Konstanten und Größen 955

Unveränderbar: Physikalische Konstanten.....	955
Wichtige physikalische Größen und ihre Einheiten.....	956





36 Inhaltsverzeichnis

Die Grundgrößen.....	957
Wichtige mechanische Einheiten	957
Immer noch verwirrend: Druckeinheiten.....	959
Radiant oder nicht?.....	959
Wichtige optische Einheiten.....	960
Wichtige elektromagnetische Einheiten.....	960
Wichtige thermodynamische Einheiten.....	961
Wichtige Strahlungseinheiten.....	963
Ohne Sie geht es nicht: Wichtige Tabellen.....	963

Anhang B

Ein klein wenig Mathematik: Mathematische

Formelsammlung..... **971**

Es kommt auf die Richtung an: Die Vektorrechnung.....	972
Vektoren besitzen einen Betrag und eine Richtung.....	972
Darstellung durch Pfeile oder Zahlen.....	972
Addition und Subtraktion von Vektoren.....	973
Multiplikation.....	974
Geometrie.....	979
Auf den Winkel kommt es an: Trigonometrie.....	980
Mein Hut, der hat drei Ecken: Dreiecke.....	980
Sinus und Co: Definitionen.....	981
Jenseits der 90°.....	983
Wichtige trigonometrische Formeln.....	984
Differentialrechnung.....	985
Ableitungen: Motivation und Definitionen.....	986
Die wichtigsten Ableitungen.....	987
Die wichtigsten Regeln beim Ableiten.....	987
Nabla und Delta: Zwei spezielle Ableitungen.....	988
Eigentlich gar nicht so kompliziert: Die Integralrechnung.....	989
Warum Integralrechnung?.....	989
Die Integration ergibt eine Funktion: Unbestimmte Integrale.....	990
Die Integration liefert eine Zahl: Bestimmte Integrale.....	991
Rechenregeln.....	992
Linien- und Flächenintegrale.....	992
Noch einige wichtige Formeln zum Schluss.....	993

Lösungen der Aufgaben in Teil I..... **995**

Kapitel 2.....	995
----------------	-----

Lösungen der Aufgaben in Teil II..... **997**

Kapitel 3.....	997
Kapitel 4.....	999
Kapitel 5.....	1002
Kapitel 6.....	1003
Kapitel 7.....	1006



**Inhaltsverzeichnis 37**

Kapitel 8.....	1008
Kapitel 9.....	1011
Lösungen der Aufgaben in Teil III.....	1015
Kapitel 10.....	1015
Kapitel 11.....	1017
Kapitel 12.....	1019
Lösungen der Aufgaben in Teil IV.....	1021
Kapitel 13.....	1021
Kapitel 14.....	1022
Kapitel 15.....	1025
Kapitel 16.....	1027
Kapitel 17.....	1028
Lösungen der Aufgaben in Teil V.....	1031
Kapitel 18.....	1031
Kapitel 19.....	1032
Kapitel 20.....	1033
Kapitel 21.....	1035
Kapitel 22.....	1037
Kapitel 23.....	1039
Lösungen der Aufgaben in Teil VI.....	1041
Kapitel 24.....	1041
Kapitel 25.....	1043
Kapitel 26.....	1044
Kapitel 27.....	1046
Kapitel 28.....	1048
Kapitel 29.....	1049
Kapitel 30.....	1052
Kapitel 31.....	1053
Lösungen der Aufgaben in Teil VII.....	1055
Kapitel 32.....	1055
Kapitel 33.....	1056
Kapitel 34.....	1058
Lösungen der Aufgaben in Teil VIII.....	1061
Kapitel 35.....	1061
Kapitel 36.....	1061
Lösungen der Aufgaben in Teil IX.....	1065
Kapitel 37.....	1065
Kapitel 38.....	1066
Lösungen der Aufgaben in Teil X.....	1069
Kapitel 39.....	1069
Kapitel 40.....	1071





38 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 41.....	1073
Kapitel 42.....	1074
Kapitel 43.....	1076
Kapitel 44.....	1078
Kapitel 45.....	1079
Abbildungsverzeichnis.....	1081
Stichwortverzeichnis.....	1095

