

Inhalt

1	Einleitung (*)	23
1.1	Warum habe ich dieses Lehrbuch geschrieben? (*)	23
1.2	Was möchte ich mit diesem Lehrbuch erreichen? (*)	24
1.3	Für wen habe ich dieses Lehrbuch geschrieben? (*)	26
1.4	Nach welchen Kriterien habe ich die Inhalte ausgewählt? (*)	27
1.5	Hinweise zum Umgang mit diesem Lehrbuch (*)	28
1.6	Danksagungen (*)	33
1.7	Kennzeichnungen (-)	35
1.8	Abkürzungen (-)	42
2	Die besondere Denkweise des Physikers (*)	45
2.1	Größen und Einheiten (*)	45
2.2	Gesetze und Modelle (*)	52
2.3	Das Experiment: Zentrum wissenschaftlicher Arbeit (*)	57
2.4	Bilanzen und Erhaltungssätze (*)	60
2.5	Mathematik - die Muttersprache des Physikers (*)	62
2.6	Systeme und deren Umgebungen (*)	66
2.6.1	Begriffs-Definitionen (*)	66
2.6.2	Rückgekoppelte Systeme (*)	68
2.7	Tipps, Tricks und Spezialitäten (*)	70
2.7.1	Der Umgang mit dimensionsbehafteten Gleichungen (*)	71
2.7.2	Richtiges Publizieren und Patentieren (*)	72
2.7.3	Die Arbeitsteilung von öffentlicher und industrieller Forschung (-)	77
2.7.4	Fehlerrechnung (*)	82
2.8	Aufgaben (-)	89
2.9	Zahlenwerte (-)	90
2.10	Literatur (-)	90
3	Mechanik - aller Anfang ist schwer (-)	93
3.1	Mathematische Grundlagen der Mechanik (-)	94
3.1.1	Elementare Geometrie (-)	95

3.1.2	Die Fundamente der modernen Mathematik (-)	110
3.1.3	Der konstruktive Aufbau der reellen Zahlen (*)	120
3.1.4	Auf dem \mathfrak{R}^1 definierte Funktionen (*)	126
3.1.5	Die Ableitung einer Funktion (*)	127
3.1.6	Die Integration einer Funktion (*)	129
3.1.7	Reihenentwicklung von Funktionen (-)	133
3.1.8	Analysis von Funktionen mehrerer Veränderlicher (-)	141
3.1.9	Vektoralgebra (-)	143
3.1.10	Vektoranalysis (-)	145
3.1.11	Tensoren (-/-)	160
3.1.12	Die Berechnung von Extremwerten (-)	160
3.1.13	Koordinatensysteme (-)	163
3.2	Geometrische Mechanik (-)	169
3.2.1	Ort und Bewegung von Körpern (-)	169
3.2.2	Bewegung starrer Körper (-)	171
3.2.3	Periodische Bewegungen (-)	173
3.2.4	Ebene periodische Bewegungen (-)	174
3.2.5	Zentralbewegungen (-)	177
3.2.6	Die Keplerschen Gesetze (-)	178
3.2.7	Die Ursache von Bewegungen (*)	180
3.2.8	Die Relativitätsprinzipien des Anschauungsraums (*)	186
3.2.9	Die Vereinheitlichung von Raum und Zeit (*)	189
3.2.10	Die wichtigsten Aussagen der speziellen Relativitätstheorie (-)	194
3.2.11	Die Gravitation (-)	212
3.2.12	Beschleunigte Bezugssysteme (-/-)	226
3.2.13	Grundzüge der allgemeinen Relativitätstheorie (-)	227
3.3	Dynamische Mechanik (-)	231
3.3.1	Systeme, Variablen, Zustände (*)	231
3.3.2	Energie, Energieformen (*)	232
3.3.3	Die Energieform Translationsenergie (*)	233
3.3.4	Die Energieform Rotationsenergie (-)	237
3.3.5	Die Energieform Lageenergie (*)	239
3.3.6	Die Energieform Ladungsenergie (-)	241
3.3.7	Die Energieform Volumenenergie (-)	243
3.3.8	Erhaltungssätze (-)	244
3.3.9	Stoßprozesse (-/-)	245
3.3.10	Die Gravitationsenergie (-)	245
3.3.11	Energie-Reservoirs / Gibbs-Funktionen / Homogenität (*)	249
3.3.12	Austauschprozesse / Gleichgewicht (-)	252
3.3.13	Die Bewegungsgleichungen physikalischer Systeme (-)	254
3.3.14	Relativistische Mechanik (-)	255
3.3.15	Hydrostatik (-)	262

3.3.16	Strömungsmechanik (-/-)	264
3.4	Messung mechanischer Größen (-)	266
3.4.1	Die Längenmessung (-)	266
3.4.2	Die Zeitmessung (-)	271
3.4.3	Die Messung von Winkeln und Richtungen (-)	274
3.4.4	Die Messung von Geschwindigkeiten (-)	275
3.4.5	Messung von Energie und Impuls (-/-)	277
3.4.6	Die Massenbestimmung (-)	277
3.4.7	Die Messung der Massendichte (-/-)	278
3.5	Mechanik des täglichen Lebens (-)	278
3.5.1	Die astronomischen Grundlagen unseres Kalenders (-)	279
3.5.2	Die Gesetzmäßigkeiten des Sonnenstands (-)	282
3.5.3	Die Mondphasen (-)	290
3.5.4	Transit-Konstellationen von Himmelsobjekten (-)	291
3.5.5	Navigation (-)	296
3.5.6	Die Gesetzmäßigkeiten von Ebbe und Flut (-)	301
3.5.7	Mechanische Maschinen (-)	304
3.5.8	Die Verteilung von Gasen in der Atmosphäre (-)	306
3.5.9	Windkraftanlagen (-/-)	307
3.5.10	Segeln (-)	307
3.5.11	Musik, Musikinstrumente (-)	315
3.6	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	330
3.6.1	Umgang mit partiellen Ableitungen (*)	330
3.6.2	Der Vektorbegriff in der Mathematik und in der Physik (-/-)	331
3.6.3	Parameterdarstellung von Funktionen (-/-)	331
3.6.4	Unser Planetensystem (-)	331
3.6.5	Extensive Größen und deren Ströme in der Ökonomie (-)	334
3.7	Aufgaben (-)	338
3.8	Zahlenwerte (-/-)	341
3.9	Literatur (-)	341
4	Elektrostatik - Basis von Blitz und Fax (-)	345
4.1	Komplexe Zahlen und Funktionen (-)	346
4.1.1	Algebra der komplexen Zahlen (*)	346
4.1.2	Die Ableitung komplexer Funktionen (*)	352
4.1.3	Die Integration komplexer Funktionen (*)	355
4.1.4	Die Singularitäten komplexer Funktionen (-/-)	359
4.2	Mathematische Grundlagen des System-Response (-)	360
4.2.1	Linear Response, Suszeptibilität (*)	360
4.2.2	Nicht-instantaner Linear Response (*)	362
4.2.3	Frequenzabhängigkeit der linearen Suszeptibilität (*)	363
4.2.4	Suszeptibilität einfacher Modellsysteme (-)	367

4.2.5	Systemantwort auf eine Sprungfunktion (-)	369
4.2.6	Nichtlineare Response-Funktionen (-/-)	370
4.2.7	Komplexwertige physikalische Größen (-)	370
4.3	Grundfakten der Elektrostatik (-)	376
4.3.1	Die Energieform elektrische Energie (*)	377
4.3.2	Das elektrische Feld einer Punktladung (-)	381
4.3.3	Elektrostatische Felder beliebiger Ladungsverteilungen (-)	384
4.3.4	Die elektrische Feldenergie (-)	387
4.3.5	Gasentladungen (-/-)	389
4.4	Materie im elektrischen Feld (-)	389
4.4.1	Ladungsverteilung in leitenden Materialien (-)	389
4.4.2	Das Gesamtsystem aus Materie und elektrischem Feld (-)	395
4.4.3	Dielektrische Materialien (-)	403
4.4.4	Ferro-elektrische Materialien (-/-)	406
4.4.5	Die dielektrische Funktion (-)	407
4.4.6	Nichtlineare Polarisation (-/-)	407
4.5	Nicht-elektrisch induzierte Polarisation (-)	407
4.5.1	Der Piezo-Effekt (-)	408
4.5.2	Die Pyro-Elektrizität (-/-)	409
4.6	Reibungselektrizität (-)	410
4.6.1	Experimentelle Grundphänomene der Reibungselektrizität (-)	410
4.6.2	Physikalische Deutung der Reibungselektrizität (-)	411
4.7	Messung elektrostatischer Größen (-/-)	413
4.7.1	Elektrostatische Spannungsgeneratoren (-/-)	413
4.7.2	Elektrostatische Kondensatoren (-/-)	413
4.7.3	Das Elektrometer (-/-)	413
4.7.4	Die Bestimmung der Elementarladung (-)	414
4.8	Elektrostatik des täglichen Lebens (-/-)	415
4.8.1	Der elektrostatische Kopierer (-)	415
4.8.2	Elektrostatik der Erdatmosphäre (-)	417
4.8.3	Elektrostatische Probleme in Produktionsbetrieben (-/-)	420
4.9	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	421
4.9.1	Nutzen und Grenzen der Fourier-Darstellung von Suszeptibilitätsfunktionen (-/-)	421
4.9.2	Verhalten im Freien bei Gewitter (-)	421
4.10	Aufgaben (-)	422
4.11	Zahlenwerte (-/-)	423
4.12	Literatur (-)	423
5	Magnetostatik - das Kraftpaket (-)	425
5.1	Die Grundfakten der Magnetostatik (-)	425
5.1.1	Die Energieform magnetische Energie (-)	426

5.1.2	Das magnetische Feld (-)	428
5.1.3	Die magnetische Feldenergie (-)	431
5.2	Materie im magnetischen Feld (-)	431
5.2.1	Das Gesamtsystem aus Materie und magnetischem Feld (-)	432
5.2.2	Diamagnetische Materialien (-)	436
5.2.3	Paramagnetische Materialien (-/-)	437
5.2.4	Ferromagnetische Materialien (-/-)	437
5.3	Messung magnetischer Größen (-/-)	437
5.4	Magnetostatik des täglichen Lebens (-/-)	437
5.5	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	438
5.6	Aufgaben (-/-)	438
5.7	Zahlenwerte (-/-)	438
5.8	Literatur (-/-)	438
6	Elektrodynamik - Maxwells Lebenswerk (-)	439
6.1	Die Verknüpfung von elektrischen und magnetischen Effekten (*)	439
6.1.1	Die magnetische Erzeugung elektrischer Felder (*)	440
6.1.2	Die elektrische Erzeugung magnetischer Felder (-)	441
6.1.3	Selbstinduktion / Induktivität (-)	446
6.1.4	Die Lorentz-Kraft (-)	448
6.1.5	Feldtheoretische Formulierung der elektrodynamischen Gesetze (-)	450
6.1.6	Relativistische Elektrodynamik (-/-)	455
6.2	Die periodischen Lösungen der Maxwell-Gleichungen (-/-)	455
6.2.1	Die Wellengleichung des elektromagnetischen Feldes (-/-)	456
6.2.2	Die Lösungen der Wellengleichung (-/-)	456
6.3	Messung elektrodynamischer Größen (-/-)	456
6.4	Elektrodynamik des täglichen Lebens (-/-)	456
6.5	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	457
6.6	Aufgaben (-/-)	457
6.7	Zahlenwerte (-/-)	457
6.8	Literatur (-/-)	457
7	Quantenmechanik - Revolution des physikalischen Weltbildes (-)	459
7.1	Teilchen und Wellen im Bild der klassischen Physik (*)	460
7.2	Die entscheidenden experimentellen Fakten (*)	462
7.2.1	Quantisierung ruhemasseloser Strahlung (*)	462
7.2.2	Interferenz ruhemasse-behafteter Teilchen (*)	464
7.2.3	Die Stabilität der Atome (*)	465
7.2.4	Die statistische Natur physikalischer Messergebnisse (*)	467
7.2.5	Die Unschärfe-Relation (-)	468
7.2.6	Der Tunneleffekt (*)	469

7.2.7	Die Ununterscheidbarkeit identischer Teilchen (*)	471
7.2.8	Das Korrespondenzprinzip (*)	472
7.3	Die Grundstruktur der Quantenmechanik (*)	472
7.4	Mathematische Strukturen der Quantenmechanik (*)	485
7.4.1	Vektorräume (*)	486
7.4.2	Lineare Unabhängigkeit / Definition einer Basis (*)	487
7.4.3	Die Determinante einer Matrix (-/-)	490
7.4.4	Untervektorräume (-)	491
7.4.5	Norm / Skalarprodukt / Vollständigkeit / Orthogonalität (*)	492
7.4.6	Funktionen-Räume (-)	495
7.4.7	Operatoren / Eigenvektoren / Hermitezität (-)	498
7.4.8	Verknüpfung von Operatoren (-)	502
7.4.9	Diagonalisierung von Operatoren (-/-)	503
7.4.10	Maßtheorie und Wahrscheinlichkeitsrechnung (-)	503
7.5	Die konsistente Formulierung der Quantenmechanik (-)	520
7.6	Darstellungsarten der Quantenmechanik (-/-)	522
7.6.1	Darstellung der Zustände als Funktionen im Ortsraum (Schrödinger-Darstellung) (-/-)	522
7.6.2	Darstellung der Zustände über die Eigenzustände einer diskret verteilten Observablen (Heisenberg-Darstellung) (-/-)	522
7.7	Die wichtigsten Operatoren (-/-)	522
7.7.1	Der Orts-Operator (-/-)	522
7.7.2	Der Impuls-Operator (-/-)	523
7.7.3	Der Drehimpuls-Operator (-/-)	523
7.7.4	Der Energie-Operator (-/-)	523
7.7.5	Der Operator für das magnetische Moment (-/-)	523
7.7.6	Der Spin-Operator (-/-)	523
7.7.7	Der Teilchenzahl-Operator (-/-)	523
7.7.8	Die Operatoren für Ströme extensiver Größen (-/-)	523
7.7.9	Äußere und innere Variablen (-/-)	524
7.8	Anwendungsbeispiele (-/-)	524
7.8.1	2-Zustands-Systeme (-/-)	524
7.8.2	Der harmonische Oszillator (-/-)	524
7.8.3	Das wechselwirkungsfreie Teilchen (-/-)	524
7.8.4	Das Teilchen im Potenzialtopf (-/-)	525
7.8.5	Das Elektron im Coulombfeld (-/-)	525
7.8.6	Das elektromagnetische Strahlungsfeld (-/-)	525
7.9	Der quasi-klassische Grenzfall (-/-)	525
7.10	Faktorisierende Systeme / 2. Quantisierung (-)	525
7.10.1	Wechselwirkungsfreie Untersysteme (-)	525
7.10.2	Systeme aus identischen Teilchen (-)	526
7.10.3	Die 2. Quantisierung (-)	531

7.11	Quantenmechanische Störungstheorie (-)	533
7.11.1	Die zeitunabhängige Störung eines nicht entarteten Systems (-)	534
7.11.2	Die Störungstheorie eines entarteten Systems (-/-)	537
7.11.3	Die Theorie zeitabhängiger Störungen (-/-)	538
7.11.4	Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten (-/-)	538
7.11.5	Streuprozesse (-/-)	538
7.12	Anwendungen der Störungstheorie (-/-)	538
7.12.1	Das Elektronensystem der Atome (-/-)	538
7.12.2	Quantenmechanik der chemischen Bindung (-/-)	538
7.12.3	Strahlungs-Emission und -Absorption (-/-)	539
7.12.4	Der Raman-Effekt (-/-)	539
7.13	Quantenfeldtheorie (-/-)	539
7.14	Makroskopische quantenmechanische Systeme (-)	539
7.14.1	Elementare Anregungen / Quantenkondensation (-)	540
7.14.2	Das Bose-Einstein-Kondensat (-/-)	541
7.14.3	Die Supraleitung (-/-)	542
7.14.4	Die Suprafluidität (-/-)	542
7.15	Offene Fragen der Quantenmechanik (-/-)	542
7.16	Quantenmechanik des täglichen Lebens (-)	542
7.16.1	Physik der Atomkerne (-)	543
7.16.2	Physik der H-Bombe u. des Kernfusions-Reaktors (-)	547
7.16.3	Physik der Kernspaltungs-Bombe u. des Kernspaltungs-Reaktors (-)	549
7.16.4	Die Lagerung radioaktiver Abfälle (-/-)	551
7.16.5	Einheiten für die Messung radioaktiver Strahlung (-)	553
7.16.6	Wechselwirkung zwischen Kommunikations-Strahlung und Materie (-/-)	555
7.17	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	556
7.17.1	Der Umgang mit Wahrscheinlichkeitsgrößen (-)	556
7.17.2	Abschätzungen mit Hilfe von Mittelwerten (-)	557
7.17.3	Natürliche Kernspaltungs-Reaktoren (-/-)	558
7.18	Aufgaben (-)	558
7.19	Zahlenwerte (-)	559
7.20	Literatur (-)	561
8	Thermodynamik - Verknüpfung von Mikro- und Makro-Kosmos (*)	563
8.1	Phänomenologische Gleichgewichts-Thermodynamik (*)	564
8.1.1	Die Energieform thermische Energie (*)	565
8.1.2	Die Energieform chemische Energie (-)	566
8.1.3	Energie-Umwandlungen (*)	568
8.1.4	2 Hauptsätze der Thermodynamik (*)	571
8.1.5	Energieartige Gibbs-Funktionen (*)	573

8.1.6	Entropieartige Gibbs-Funktionen (*)	575
8.1.7	Isotherme Austauschprozesse (-)	575
8.1.8	Materialparameter (*)	577
8.1.9	Zustandsgleichungen (*)	585
8.1.10	Ideale Gase (*)	589
8.1.11	Reale Gase / van-der-Waals-Gleichung (-)	594
8.1.12	Chemische Reaktionen (-)	596
8.1.13	Phasen, Phasengrenzen, Stabilität (*)	605
8.1.14	Koexistenz von Phasen (*)	610
8.1.15	Phasendiagramme, Phasenübergänge (*)	616
8.1.16	Innere Variablen, Phasenübergänge 2. Art (-)	621
8.1.17	Lösungen (*)	624
8.1.18	Die Energieform Grenzflächenenergie (-)	628
8.2	Thermodynamik der dissipativen Ströme (-)	633
8.2.1	Der Nichtgleichgewichtszustand (-)	633
8.2.2	Verallgemeinerte Ströme und thermodynamische Kräfte (-/-)	634
8.2.3	Transportkoeffizienten (-/-)	635
8.2.4	Teilchen-Diffusion (-/-)	635
8.2.5	Wärmeleitung (-/-)	635
8.2.6	Irreversible Strömungsmechanik (-/-)	635
8.2.7	Stationäre elektrische Ströme (-/-)	635
8.3	Elektrochemie (-)	635
8.3.1	Die Energieform elektrochemische Energie (-)	637
8.3.2	Elektrolyt, Dissoziation (-)	638
8.3.3	Das abgeschirmte Coulomb-Feld (-)	639
8.3.4	Einige Elektrolyt-Systeme (-)	640
8.3.5	Elektrochemische Kontakte (-/-)	642
8.3.6	Stationäre Ströme in Elektrolyten (-/-)	642
8.4	Statistische Thermodynamik (*)	643
8.4.1	Mikro- und Makrozustände (*)	644
8.4.2	Thermischer Kontakt / Gleichgewicht / Entropie (*)	647
8.4.3	Der Nullpunkt der Entropie (*)	649
8.4.4	Weitere Austauschprozesse (*)	651
8.4.5	Entropie-Reservoir / Boltzmannfaktor / Zustandssumme (*)	653
8.4.6	Die großkanonische Zustandssumme (*)	656
8.4.7	Vielteilchen-Systeme aus wechselwirkungsfreien Teilchen (*)	658
8.4.8	Statistische Thermodynamik der Phasenübergänge (-)	662
8.4.9	Theorie der Fluktuationen (-/-)	664
8.5	Thermodynamik der elektromagnetischen Strahlung (-)	664
8.5.1	Das Photonengas im thermodynamischen Gleichgewicht (*)	665
8.5.2	Strahlungsemission und -absorption (*)	668
8.5.3	Aktuelle Fragen der Strahlungs-Thermodynamik (-/-)	675

8.6	Messung thermodynamischer Größen (-/-)	675
8.6.1	Temperaturmessung (-/-)	675
8.6.2	Messung der Grenzflächenenergie (-/-)	675
8.6.3	Messung von Reaktions-Enthalpien (-/-)	675
8.6.4	Messung elektrochemischer Kontaktpotenziale (-/-)	675
8.7	Thermodynamik des täglichen Lebens (-)	676
8.7.1	Wärmetransport durch Leitung, Konvektion und Strahlung (-)	676
8.7.2	Das Wasser (-)	678
8.7.3	Das Feuer (-)	680
8.7.4	Die Gebäudetemperierung (-)	682
8.7.5	Elektrochemie des täglichen Lebens (-/-)	684
8.7.6	Wärmekraftmaschinen (-)	684
8.7.7	Kühlmaschinen und Wärmepumpen (-)	698
8.7.8	Thermodynamik der Energieversorgung (-)	703
8.7.9	Technische Verfahren zur Herstellung chemischer Produkte (-/-)	713
8.8	Das Klima der Erde (-)	714
8.8.1	Strahlungsbilanz der Planeten / Treibhauseffekt (-)	715
8.8.2	Ein einfaches Modell des globalen Klimas (-)	724
8.8.3	Globale thermische Ausgleichsströme / das globale Klima (-)	739
8.8.4	Globale Klimaveränderungen (-)	762
8.8.5	Eine Deutungs-Hypothese des globalen Klimas (-)	783
8.9	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	795
8.9.1	Alltags-Probleme beim Umgang mit thermischen Begriffen (-)	795
8.9.2	Die Analogie von Wärmestrom und elektrischem Strom (-/-)	797
8.9.3	Einige energietechnische Vorurteile (-)	797
8.9.4	Meerwasser-Entsalzung (-/-)	801
8.9.5	Das Klima im Grand Canyon und der Treibhauseffekt (-)	801
8.9.6	Das Klima im Walde (-/-)	803
8.10	Aufgaben (-)	803
8.11	Zahlenwerte (-/-)	806
8.12	Literatur (-)	808
9	Kristallphysik - Dominanz der Symmetrie (-/-)	811
9.1	Der 3D-symmetrische Festkörper (-/-)	812
9.1.1	Die wichtigsten Kristallklassen (-/-)	812
9.1.2	Langreichweitige und kurzreichweitige Ordnung (-/-)	812
9.2	Anregungen des Gittersystems (-/-)	812
9.3	Anregungen des Elektronensystems (-/-)	812
9.4	Metalle (-/-)	812
9.5	Kristall-Kontakte (-/-)	813
9.6	Wechselwirkungen zwischen Gitter- und Elektronensystem (-/-)	813
9.7	Ungeordnete makroskopische Systeme (-/-)	813

9.8	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	813
9.9	Aufgaben (-/-)	813
9.10	Zahlenwerte (-/-)	813
9.11	Literatur (-/-)	813
10	Elementarteilchen, Kosmologie - Physik ganz klein und ganz groß	
	(-)	815
10.1	Physik der Elementarteilchen (-/-)	815
10.1.1	Der Elementarteilchen-Zoo (-)	816
10.1.2	Die Ruhemasse der Elementarteilchen (-/-)	817
10.1.3	Das Quark-Modell (-/-)	817
10.1.4	Das Grundkonzept der Quantenchromodynamik (-/-)	817
10.2	Astronomie (-/-)	818
10.2.1	Physik der Stern-Entwicklung (-/-)	818
10.2.2	Das Entstehen von Planetensystemen (-/-)	820
10.2.3	Physik der Planeten (-/-)	822
10.2.4	Physik unserer Erde (-)	822
10.2.5	Exotische Himmelskörper (-/-)	839
10.2.6	Galaxien (-/-)	839
10.3	Kosmologie (-/-)	839
10.3.1	Die Unsymmetrie von Materie und Antimaterie (-/-)	839
10.3.2	Die Raum-Zeit-Entwicklung des Kosmos (-)	844
10.3.3	Die $3 \cdot K$ -Hintergrundstrahlung (-/-)	846
10.3.4	Dunkle Materie und dunkle Energie (-)	846
10.3.5	Offene Fragen der Kosmologie (-/-)	848
10.4	Elementarteilchenphysik und Kosmologie des täglichen Lebens	848
10.4.1	Die kosmische Strahlung (-/-)	848
10.5	Messung von Kenndaten der Elementarteilchen (-/-)	848
10.5.1	Teilchenbeschleuniger (-/-)	848
10.6	Messung astronomischer und kosmologischer Größen (-/-)	849
10.6.1	Entfernungsmessungen (-/-)	849
10.6.2	Geschwindigkeitsmessungen (-/-)	849
10.6.3	Altersbestimmungen (-)	849
10.6.4	Spezielle Verfahren zur Bestimmung weiterer Kenndaten (-/-)	852
10.6.5	Der Seismograph (-/-)	852
10.6.6	Der Nachweis exasolarer Planeten (-/-)	852
10.7	Aufgaben (-/-)	852
10.8	Zahlenwerte (-/-)	852
10.9	Literatur (-/-)	853

11 Optik - Schwerpunkt aktueller Forschung (-)	855
11.1 Grundfakten der Ausbreitung elektromagnetischer Strahlung (-)	857
11.1.1 Das Superpositionsprinzip (-)	858
11.1.2 Beugung und Interferenz (-/-)	858
11.1.3 Die Polarisation (-)	858
11.1.4 Die Prinzipien von Huygens und Fermat (-)	861
11.1.5 Die Kohärenz elektromagnetischer Strahlung (-)	862
11.1.6 Die Näherung der geometrischen Optik (-/-)	863
11.2 Lineares optisches Materialverhalten (-)	864
11.2.1 Reflexion und Brechung (*)	864
11.2.2 Absorption, Streuung, Fluoreszenz (*)	873
11.2.3 Reflexion und Brechung in absorbierenden Medien (-/-)	877
11.3 Polarisations-spezifisches Materialverhalten (-)	878
11.3.1 Dichroismus (-)	878
11.3.2 Doppelbrechung (-/-)	879
11.3.3 Die Response-Funktion polarisationsverändernder Materialien (-/-)	879
11.3.4 Optische Drehung (-)	880
11.4 Feld-induziertes polarisationsabhängiges Verhalten (-/-)	881
11.4.1 Kerr-Effekt (-/-)	882
11.4.2 Faraday-Effekt (-/-)	882
11.4.3 Pockels-Effekt (-/-)	882
11.5 Nichtlineares optisches Materialverhalten (-/-)	882
11.6 Passive optische Elemente (-)	883
11.6.1 Materialien für optische Elemente (-)	883
11.6.2 Linsen (*)	884
11.6.3 Spiegel (-)	892
11.6.4 Prismen (-/-)	894
11.6.5 Gitter (-/-)	894
11.6.6 Optische Fasern (-)	894
11.6.7 Blenden (*)	896
11.6.8 Filter (-)	896
11.6.9 Die Ulbricht-Kugel (-)	898
11.6.10 Optisch-diffraktive Elemente (-/-)	898
11.6.11 Polarisations-spezifische Elemente (-/-)	899
11.6.12 Mikrostrukturierte Oberflächen (-/-)	900
11.7 Messgrößen der optischen Strahlung (-)	901
11.7.1 Messgrößen der Strahlungsemission (*)	902
11.7.2 Messgrößen der Bestrahlung (-)	906
11.7.3 Messgrößen des Strahlungsfeldes (-)	907

11.7.4	Spektrale Gewichtung optischer Strahlung (*)	909
11.7.5	Zusammenfassende Darstellung (-)	911
11.8	Optische Strahlungsquellen (-)	912
11.8.1	Strahlungsquellen mit vereinfachtem Abstrahlungsverhalten (*)	914
11.8.2	Thermische Strahler (*)	916
11.8.3	Gasentladungslampen (-/-)	920
11.8.4	Licht emittierende Dioden (LEDs) (-/-)	920
11.8.5	Laser (-/-)	920
11.9	Strahlungsdetektoren (-)	921
11.9.1	Empfindlichkeit, Signaldynamik (*)	922
11.9.2	Lineare und logarithmische Strahlungsdetektion (*)	924
11.9.3	Halbleiter-Photodioden (-/-)	926
11.9.4	CCD-Chips (-)	926
11.9.5	Photomultiplier / Multichannel Plates (-)	927
11.9.6	Avalanche-Photodioden (-/-)	930
11.10	Grundlagen des optischen Gerätebaus (*)	930
11.10.1	Das Zusammenspiel von Beleuchtung und Abbildung (*)	932
11.10.2	Geometrische Abbildung und Fouriertransformation (-/-)	935
11.10.3	Gesetzmäßigkeiten des Strahlungsstroms (*)	935
11.10.4	Kontrastmechanismen abbildender optischer Geräte (-)	937
11.10.5	Die formgebende Bearbeitung optischer Bauelemente (-/-)	941
11.10.6	Die Signaldynamik optischer Systeme (*)	941
11.10.7	Zuverlässigkeit von Messgeräten (*)	943
11.11	Einige geometrisch-optische Geräte (-)	945
11.11.1	Relais-Optik / Diapositiv-Projektor (*)	945
11.11.2	Die sequentielle Relais-Optik (*)	946
11.11.3	Das Teleskop (-/-)	946
11.11.4	Das Photometer (*)	946
11.11.5	Scannende Abbildungsgeräte (-)	950
11.11.6	Tomographische Verfahren der Bilderzeugung (-/-)	954
11.11.7	Bildanalyse (-)	956
11.11.8	Solar-Konzentratoren (-/-)	962
11.12	Wellenoptische Geräte (-/-)	962
11.12.1	Interferometer (-/-)	962
11.12.2	Optische Kurzzeitkohärenz-Mikroskopie (-/-)	962
11.12.3	Holographische Abbildungssysteme (-/-)	962
11.13	Optik des täglichen Lebens (-)	963
11.13.1	Beleuchtungsquellen (-)	963
11.13.2	Der konventionelle photographische Film (-)	965
11.13.3	Die Kamera (*)	968
11.13.4	Das optische System des Auges (*)	971
11.13.5	Die Retina (-)	977

11.13.6	Geräte zur Unterstützung des Augensystems (*)	979
11.13.7	Der Sextant (-)	984
11.13.8	Die optische Datenspeicherung (-/-)	986
11.14	Die Detektion von Farben (*)	987
11.14.1	Grundkonzept eines farbselektiven Strahlungsmesssystems (*)	988
11.14.2	Topologische Eigenschaften der Farbortmenge (*)	992
11.14.3	Aktiv und passiv strahlende Objekte - die Farbe weiß (*) . .	994
11.14.4	Dimension und Qualität eines Farbmesssystems (*)	998
11.14.5	Das menschliche Farbmesssystem - die DIN-Farbkoordinaten (-)	1002
11.14.6	Der Glanz (*)	1003
11.14.7	Der Farbabstand (*)	1005
11.14.8	Die Theorie deckender Anstriche (*)	1008
11.14.9	Wiedergabe von Farbbildern - Farbkorrektur (-)	1016
11.15	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1018
11.15.1	Optimierung der Abbildungsqualität (-)	1019
11.15.2	Falschlichtminimierung (-)	1019
11.15.3	Ausleuchtung größerer Flächen (*)	1021
11.15.4	Stabilisierung von Strahlungsquellen (-/-)	1024
11.15.5	Kalibrierung von Strahlungsdetektoren (*)	1024
11.15.6	Das Spektralprodukt optischer Geräte (*)	1026
11.15.7	Retroreflektoren (-/-)	1028
11.15.8	Messung des Streuvermögens (*)	1028
11.15.9	Messung des Absorptionsvermögens streuender Proben (*) .	1029
11.15.10	Qualitätstests an Spektralphotometern (-/-)	1030
11.15.11	Apparative Trennung von Fluoreszenz und Ramanstreuung (*)	1030
11.15.12	Messung des Brechungsindex von Pulvern (-/-)	1034
11.15.13	Aktive und passive Anzeigen (*)	1034
11.15.14	Warum sind die Pflanzenblätter grün? (-/-)	1035
11.15.15	Die Farbe des Himmels und der Meere (-)	1035
11.16	Aufgaben (-)	1038
11.17	Zahlenwerte (-)	1039
11.18	Literatur (-)	1040
12	Materialwissenschaft - Basis technischen Wirkens (-)	1043
12.1	Drei Grundfragen der Materialwissenschaft (*)	1045
12.1.1	Warum sind Festkörper verformbar? (*)	1045
12.1.2	Warum sind Festkörper schadenstolerant? (*)	1047
12.1.3	Warum sind Konstruktionskonzepte größenabhängig? (-) . . .	1048
12.2	Die Energieform Deformationsenergie (-)	1053
12.2.1	Verformung, Deformation (-)	1054
12.2.2	Der linear-elastische Festkörper (-)	1058
12.2.3	Einfache Spannungszustände (-/-)	1060

12.2.4	Elastische Schwingungen (-/-)	1060
12.3	Linear-visko-elastische Materialien (-)	1060
12.3.1	Das periodische Belastungsexperiment (DMA) (*)	1060
12.3.2	Relaxationsprozesse in visko-elastischen Materialien (*)	1062
12.3.3	DMA-Spektren einiger typischer Polymere (-)	1066
12.3.4	Das dielektrische Relaxationsverhalten visko-elastischer Materialien (-/-)	1068
12.4	Nichtlineares Materialverhalten (-)	1069
12.4.1	Nichtlineare Materialkennlinie, inhomogene Verformung (*)	1069
12.4.2	Irreversible Verformung, Zähigkeit und Duktilität (*)	1073
12.4.3	Nichtlinearität und Geometrieabhängigkeit (-/-)	1075
12.4.4	Zerstörende Belastungsexperimente / Zähigkeitsdefinitionen (-/-)	1076
12.4.5	Nichtelastische Wechselbelastungen / Schadenstoleranz / Ermüdung (-/-)	1076
12.4.6	Die Härte von Materialien (*)	1076
12.5	Die Aggregatzustände fest/flüssig/gasförmig (*)	1078
12.5.1	Thermodynamische Definition der Aggregatzustände	1078
12.5.2	Eigentliche Festkörper (-)	1080
12.5.3	Viskose Festkörper (-)	1080
12.5.4	Eigentliche Flüssigkeiten (-/-)	1080
12.5.5	Elastische Flüssigkeiten (-)	1081
12.6	Anwendungsorientierte Klasseneinteilung der Werkstoffe (-)	1082
12.6.1	Steife Materialien (-)	1082
12.6.2	Anisotrope Materialien (-)	1083
12.6.3	Elastomere Materialien (-)	1085
12.6.4	Plastische Materialien (-)	1088
12.7	Das Werkstoffkonzept der Mehrphasigkeit (-)	1089
12.7.1	Nichtlineare Verformung durch inhomogene Struktur	1089
12.7.2	Zähigkeit durch verformbare Füllstoffe (-)	1090
12.7.3	Verstärkung durch steife Füllstoffe (-)	1091
12.7.4	Das Füllstoff/Matrix-Interface (-)	1093
12.7.5	Nichtlineare Versteifung verformbarer Werkstoffe (-/-)	1098
12.8	Technische Konstruktions-Werkstoffe vom Typ 1 (-)	1099
12.8.1	Mikro-kristalline Metalle (-)	1099
12.8.2	Mehrphasen-Metall-Legierungen (-)	1101
12.8.3	Amorphe Polymere (-)	1101
12.8.4	Teilkristalline Polymere (-)	1102
12.8.5	Polymer-Blends (-)	1103
12.8.6	Technischer Gummi (-)	1105
12.8.7	Keramische Werkstoffe (-/-)	1106
12.8.8	Vergleichende Gegenüberstellung dieser Werkstoffklassen (-/-)	1106

12.9 Technische Konstruktions-Werkstoffe vom Typ 2 (Composites) (-) . . .	1106
12.9.1 Materialien für Füllstoffe und Fasern (-)	1106
12.9.2 Makroskopisch isotrope Composites (-)	1108
12.9.3 Anisotrope Composites (-)	1112
12.9.4 Das 3D-Fachwerk: der Werkstoff der Zukunft? (-/-)	1120
12.10 Formgebung und Materialbearbeitung (-)	1120
12.10.1 Formgebung durch Verwendung eines Modells (-)	1121
12.10.2 Spanabhebende Formgebungs-Verfahren (-)	1122
12.10.3 Spanlose Formgebungs-Verfahren (-/-)	1124
12.10.4 Zusammenfügen von Einzelteilen (-/-)	1124
12.10.5 Wärme-Nachbehandlung (-/-)	1124
12.10.6 Oberflächenbearbeitung (-/-)	1124
12.10.7 Verarbeitungsmöglichkeiten einiger Materialklassen (-)	1124
12.11 Haftung / Reibung / Abrieb (*)	1125
12.11.1 Phänomenologische Beschreibung von Reibung und Abrieb (*)	1126
12.11.2 Abrasiver Abrieb (*)	1130
12.11.3 Adhäsion / adhäsive Reibung (-)	1131
12.12 Verfahren der materialwissenschaftlichen Charakterisierung (-)	1131
12.12.1 Experimentelle Bestimmung der elastischen Konstanten (-/-)	1131
12.12.2 Differential Scanning Calorimetry (DSC) (*)	1131
12.12.3 Thermisch-mechanische Analyse (TMA) (*)	1134
12.12.4 Thermogravimetrie (TGA) (*)	1135
12.12.5 Messung der Netzstellendichte von Elastomeren (-/-)	1136
12.13 Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1136
12.13.1 Der Mechanical Bowler (-)	1137
12.14 Aufgaben (-/-)	1138
12.15 Zahlenwerte (-/-)	1138
12.16 Literatur (-)	1139
13 Strukturanalyse - Grundlage der chemischen Forschung (-/-)	1141
13.1 Verfahren zur Trennung chemisch unterschiedlicher Substanzen (-) . . .	1143
13.1.1 Chromatographische Trenn-Verfahren (-)	1143
13.2 Verfahren zur Aufklärung der chemischen Struktur (-/-)	1145
13.2.1 Spektroskopische Verfahren (-/-)	1146
13.2.2 Beugungs- und Streuverfahren (-/-)	1147
13.2.3 Weitere Verfahren (-/-)	1148
13.3 Tipps, Tricks und Spezialitäten (-/-)	1148
13.4 Aufgaben (-/-)	1148
13.5 Zahlenwerte (-/-)	1148
13.6 Literatur (-/-)	1149

14 Elektronik - tägliches Werkzeug des Experimentalphysikers (-)	1151
14.1 Elektronische Systeme, Response-Funktionen (*)	1152
14.1.1 Die Topologie elektronischer Systeme (-)	1152
14.1.2 Elektronische Zweipole (*)	1154
14.1.3 Elektronische Vierpole (*)	1159
14.2 Technische Bauteile (-)	1168
14.2.1 Widerstände (*)	1168
14.2.2 Induktivitäten (*)	1169
14.2.3 Kondensatoren (*)	1172
14.2.4 Schwing-Quarze (-/-)	1175
14.2.5 Dioden (*)	1175
14.2.6 Transistoren (*)	1177
14.2.7 Integrierte Schaltkreise (ICs) (-/-)	1180
14.2.8 Optokoppler (-)	1180
14.2.9 Analog-Schalter (-/-)	1181
14.2.10 Relais (*)	1181
14.2.11 Elektronenröhren (*)	1182
14.3 Analoge Signalverarbeitung (-)	1188
14.3.1 Einfache passive Schaltungen (-/-)	1191
14.3.2 Resonante passive Schaltungen (-)	1191
14.3.3 Filterschaltungen (-)	1195
14.3.4 Der Wellenleiter (-/-)	1199
14.3.5 Der Verstärker (-/-)	1199
14.3.6 Die Spannungsversorgung (-)	1200
14.3.7 Elektronisches Rauschen (-)	1201
14.3.8 Analoge elektronische Ein- und Ausgabegeräte (-/-)	1203
14.4 Analoge Signalübertragung (-)	1203
14.4.1 Uncodierte analoge Signalübertragung (-)	1204
14.4.2 Das Konzept der Trägerfrequenz (-/-)	1204
14.5 Rückgekoppelte elektronische Systeme (*)	1206
14.5.1 Der Oszillator (*)	1206
14.5.2 Der Operationsverstärker (*)	1210
14.5.3 Allgemeine Regelungstechnik (*)	1217
14.6 Digitale Signalverarbeitung (-)	1227
14.6.1 Aussagen-Logik (*)	1229
14.6.2 Gatterschaltungen (*)	1232
14.6.3 Inverter (*)	1233
14.6.4 Multivibratoren (*)	1235
14.6.5 Zeichnungssymbole für digitale Schaltungen (-/-)	1237
14.6.6 Typische Struktur eines elektronischen Steuergerätes (*)	1238
14.6.7 Basisstruktur eines Digitalrechners (*)	1240
14.6.8 Speicherprogrammierbare Steuerungen SPS (-/-)	1244

14.6.9	Das Bus-Konzept der Signalübertragung (-)	1244
14.6.10	Informationsverlust bei der digitalen Signalverarbeitung (-/-)	1246
14.6.11	Digitale elektronische Ein- und Ausgabegeräte (-/-)	1246
14.6.12	Umwandlung analoger und digitaler Signale (-/-)	1246
14.7	Reduzierung von Störsignalen (-)	1246
14.7.1	Mechanismen der Störsignaleinstreuung (-)	1247
14.7.2	Maßnahmen zur Störsignalreduzierung (*)	1248
14.8	Elektronik des täglichen Lebens (-)	1250
14.8.1	Der Rundfunk-Empfänger (-)	1251
14.8.2	Der Fernseh-Empfänger (-)	1256
14.9	Messverfahren der Elektronik (-)	1261
14.9.1	Das Drehspulinstrument (-)	1261
14.9.2	Das Digital-Multimeter (-)	1262
14.9.3	Frequenz- und Zeitmessung (-/-)	1262
14.9.4	Das Oszilloskop (*)	1262
14.9.5	Der Transienten-Recorder (*)	1265
14.9.6	Das Sampling-Oszilloskop (-)	1267
14.9.7	Der Lock-In-Verstärker (-)	1268
14.10	Tipps, Tricks und Spezialitäten (-)	1270
14.10.1	Ratschläge zum Schaltungsentwurf (*)	1270
14.10.2	Frequenzvergleich mit dem Oszilloskop (-/-)	1271
14.10.3	Detail-Empfehlungen zur Störsignalreduzierung (*)	1272
14.10.4	Optimierung eines Regelkreises (-/-)	1274
14.10.5	Die Kybernetik und der gesunde Menschenverstand	1274
14.10.6	Das System Volkswirtschaft (-/-)	1274
14.10.7	Messzeit-Optimierung bei der Frequenzanalyse (-)	1274
14.10.8	Das ALOA-Konzept eines Multilayer-Folienkondensators (-)	1275
14.11	Aufgaben (-/-)	1275
14.12	Zahlenwerte (-/-)	1275
14.13	Literatur (-)	1275
15	Anhang (-)	1277
15.1	(Eigentlicher Anhang) (-/-)	1277
15.2	Lösungen der Aufgaben (-)	1277
15.2.1	zu Heft 2: Die besondere Denkweise des Physikers (-)	1277
15.2.2	zu Heft 3: Mechanik (-)	1278
15.2.3	zu Heft 4: Elektrostatik (-)	1290
15.2.4	zu Heft 5: Magnetostatik (-/-)	1294
15.2.5	zu Heft 6: Elektrodynamik (-/-)	1295
15.2.6	zu Heft 7: Quantenmechanik (-)	1295
15.2.7	zu Heft 8: Thermodynamik (-)	1297
15.2.8	zu Heft 9: Kristallphysik (-/-)	1305

15.2.9 zu Heft 10: Elementarteilchen, Kosmologie (-/-)	1306
15.2.10 zu Heft 11: Optik (-)	1306
15.2.11 zu Heft 12: Materialwissenschaft (-/-)	1307
15.2.12 zu Heft 13: Strukturanalyse (-/-)	1307
15.2.13 zu Heft 14: Elektronik (-/-)	1307
15.3 Literatur zur Physik insgesamt (-/-)	1308