

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

XXI

I Mechanik

1 Kinematik

1

1.1	Beschreibung von Bewegungen	1
1.1.1	Bezugssysteme	1
1.1.2	Zeit	5
1.1.3	Länge, Fläche, Volumen	7
1.1.4	Winkel	8
1.1.5	Mechanische Systeme	10
1.2	Bewegung in einer Dimension	11
1.2.1	Geschwindigkeit	11
1.2.1.1	Durchschnittsgeschwindigkeit	12
1.2.1.2	Momentangeschwindigkeit	13
1.2.2	Beschleunigung	14
1.2.3	Einfache Bewegungen in einer Dimension	16
1.3	Bewegung in mehreren Dimensionen	19
1.3.1	Geschwindigkeitsvektor	20
1.3.2	Beschleunigungsvektor	22
1.3.3	Freier Fall und Wurf	25
1.4	Drehbewegung	27
1.4.1	Winkelgeschwindigkeit	27
1.4.2	Winkelbeschleunigung	29
1.4.3	Bahngeschwindigkeit	30

2 Dynamik

32

2.1	Grundgesetze der Dynamik	32
2.1.1	Masse und Impuls	32
2.1.1.1	Masse	32
2.1.1.2	Impuls	34
2.1.2	Newtonsche Gesetze	34
2.1.2.1	Trägheit (Erstes Newtonsches Gesetz)	34
2.1.2.2	Grundgesetz der Dynamik (Zweites Newtonsches Gesetz)	35
2.1.2.3	Kraft	36
2.1.2.4	Reaktionsprinzip (Drittes Newtonsches Gesetz)	37
2.1.2.5	Trägheitskräfte	38
2.1.2.6	D'Alembertsches Prinzip	39
2.1.2.7	Zusammensetzung von Kräften	39
2.1.2.8	Zerlegung von Kräften	40
2.1.3	Bahndrehimpuls	43
2.1.4	Drehmoment	44
2.1.5	Dynamisches Grundgesetz für Drehbewegungen	46
2.2	Kräfte	47
2.2.1	Gewichtskraft	47
2.2.2	Federkräfte und Torsionskräfte	48
2.2.3	Reibungskräfte	50
2.2.3.1	Haftreibung	50
2.2.3.2	Gleitreibung	51

2.2.3.3	Rollreibung	51
2.2.3.4	Seilreibung	52
2.3	Trägheitskräfte in rotierenden Bezugssystemen	53
2.3.1	Zentripetalkraft und Zentrifugalkraft	53
2.3.2	Corioliskraft	55
2.4	Arbeit und Energie	57
2.4.1	Arbeit	57
2.4.2	Energie	59
2.4.3	Kinetische Energie	60
2.4.4	Potenzielle Energie	60
2.4.4.1	Hubarbeit gegen Gravitationskraft	61
2.4.4.2	Verformungsarbeit und Spannungsenergie einer Feder	62
2.4.5	Reibungsarbeit	63
2.5	Leistung	64
2.5.1	Wirkungsgrad	64
2.6	Stoßprozesse	65
2.6.1	Elastische, gerade, zentrale Stöße	67
2.6.2	Elastische, schiefe, zentrale Stöße	68
2.6.3	Elastischer, schiefer Stoß mit einem ruhenden Körper	69
2.6.4	Unelastische Stöße	71
2.6.4.1	Teilunelastische Stöße	71
2.6.4.2	Total unelastischer Stoß	71
2.7	Raketen	71
2.7.1	Schubkraft	72
2.7.2	Raketengleichung	73
2.8	Massenpunktsysteme	74
2.8.1	Bewegungsgleichungen	74
2.8.2	Impulserhaltungssatz	76
2.8.3	Drehimpulserhaltungssatz	77
2.8.4	Energieerhaltungssatz	77
2.9	Lagrange- und Hamilton-Gleichungen	78
2.9.1	Lagrange-Gleichungen und Hamiltonsches Prinzip	78
2.9.2	Hamilton-Gleichungen	81
3	Starre Körper	83
3.1	Kinematik	83
3.1.1	Dichte	83
3.1.2	Schwerpunkt	83
3.1.3	Kinematische Grundgrößen	85
3.2	Statik	87
3.2.1	Kraftvektoren	87
3.2.2	Drehmoment	89
3.2.3	Kräftepaar	91
3.2.4	Gleichgewichtsbedingungen der Statik	92
3.2.5	Technische Mechanik	94
3.2.5.1	Lagerreaktionen	94
3.2.5.2	Fachwerke	94
3.2.6	Maschinen	95
3.2.6.1	Hebel	95
3.2.6.2	Keile und Schrauben	96
3.2.6.3	Rollen	97

3.3	Dynamik	100
3.4	Trägheitsmoment und Drehimpuls	100
3.4.1	Massenträgheitsmoment	100
3.4.1.1	Satz von Steiner	102
3.4.1.2	Trägheitsmomente geometrischer Körper	103
3.4.2	Drehimpuls	105
3.4.2.1	Gleichgewicht bei Drehbewegungen	106
3.5	Arbeit, Energie und Leistung	106
3.5.1	Kinetische Energie	107
3.5.2	Potenzielle Energie der Torsion	109
3.6	Kreiseltheorie	109
3.6.1	Trägheitstensor	110
3.6.2	Nutation und Präzession	112
3.6.2.1	Nutation	112
3.6.2.2	Präzession	113
3.6.2.3	Kreismomente	115
3.6.3	Anwendungen von Kreiseln	115
4	Mikromechanik	117
4.1	Dünnschichttechnik	117
4.2	Belichtungs- und Ätzverfahren	118
4.3	Anwendungen	119
4.3.1	Sensoren	119
4.3.2	Aktoren	121
4.3.3	Technische Anwendungen	121
5	Gravitation und Relativitätstheorie	123
5.1	Gravitationsfeld	123
5.1.1	Gravitationsgesetz	123
5.1.2	Planetenbewegung	125
5.1.3	Planetensystem	126
5.1.3.1	Sonne und Planeten	126
5.1.3.2	Satelliten	129
5.2	Spezielle Relativitätstheorie	130
5.2.1	Relativitätsprinzip	130
5.2.2	Lorentz-Transformation	132
5.2.2.1	Addition der Geschwindigkeit	135
5.2.3	Relativistische Effekte	136
5.2.3.1	Längenkontraktion	136
5.2.3.2	Zeitdilatation	137
5.2.4	Relativistische Dynamik	137
5.2.4.1	Relativistische Massenzunahme	137
5.2.4.2	Relativistische kinetische Energie	139
5.3	Allgemeine Relativitätstheorie und Kosmologie	140
5.3.1	Sterne und Galaxien	141
5.3.1.1	Sternentwicklung	142
6	Mechanik der deformierbaren Körper	144
6.1	Elastizitätslehre	144
6.1.1	Spannung	144
6.1.1.1	Zug, Biegung, Scherung, Torsion	145

6.1.2	Elastische Verformung	146
6.1.2.1	Dehnung	147
6.1.2.2	Querdehnung	148
6.1.2.3	Allseitige Kompression	149
6.1.2.4	Biegung eines Stabes (Balkens)	150
6.1.2.5	Scherung	154
6.1.2.6	Torsion	154
6.1.2.7	Energie und Arbeit bei Verformungen	156
6.1.3	Plastische Verformung	156
6.1.3.1	Bereiche bei Zugbelastung	157
6.1.3.2	Knickung	158
6.1.3.3	Härte	159
6.2	Hydrostatik, Aerostatik	161
6.2.1	Flüssigkeiten und Gase	161
6.2.2	Druck	161
6.2.2.1	Kolbendruck	162
6.2.2.2	Schweredruck in Flüssigkeiten	163
6.2.2.3	Kompressibilität	165
6.2.2.4	Schweredruck in Gasen	165
6.2.2.5	Pumpen	167
6.2.3	Auftrieb	169
6.2.4	Kohäsion, Adhäsion, Oberflächenspannung	171
6.2.4.1	Kapillarität	172
6.3	Hydrodynamik, Aerodynamik	174
6.3.1	Strömungsfeld	174
6.3.2	Grundgleichungen idealer Strömungen	175
6.3.2.1	Kontinuitätsgleichung	176
6.3.2.2	Eulersche Gleichung	178
6.3.2.3	Gesetz von Bernoulli	179
6.3.2.4	Torricellisches Ausflussgesetz	181
6.3.2.5	Saugeffekte	183
6.3.2.6	Auftrieb an umströmten Körpern	183
6.3.3	Reale Strömungen	185
6.3.3.1	Innere Reibung	185
6.3.3.2	Navier-Stokes-Gleichung	187
6.3.3.3	Laminare Strömung in einem Rohr	187
6.3.3.4	Umströmung einer Kugel	189
6.3.3.5	Bernoulli-Gleichung	190
6.3.4	Turbulente Strömungen	190
6.3.4.1	Widerstandsbeiwert	191
6.3.5	Ähnlichkeitsgesetze	192
6.3.5.1	Rohrreibung	194
6.3.6	Strömungen mit Dichteänderungen	195
7	Nichtlineare Dynamik, Chaos und Fraktale	197
7.1	Dynamische Systeme und Chaos	197
7.1.1	Dynamische Systeme	198
7.1.1.1	Zustandsraum und Phasenraum	199
7.1.2	Konservative Systeme	203
7.1.2.1	Satz von Liouville	203
7.1.2.2	Integrabilität	204

7.1.3	Dissipative Systeme	205
7.1.3.1	Seltsame Attraktoren, deterministisches Chaos	205
7.2	Bifurkationen	207
7.2.1	Logistische Abbildung	207
7.2.2	Universalität	210
7.3	Fraktale	210
	Formelzeichen Mechanik	213
8	Tabellen zur Mechanik	214
8.1	Dichte	214
8.1.1	Festkörper	214
8.1.1.1	Metallische Legierungen	215
8.1.1.2	Nichtmetalle	216
8.1.2	Flüssigkeiten	219
8.1.3	Gase	220
8.2	Elastische Eigenschaften	221
8.3	Dynamische Eigenschaften	224
8.3.1	Reibungszahlen	224
8.3.2	Kompressibilität	226
8.3.2.1	Gase	226
8.3.2.2	Flüssigkeiten und Festkörper	228
8.3.3	Viskosität	229
8.3.4	Strömungswiderstand	232
8.3.5	Oberflächenspannung	233
II	Schwingungen, Wellen, Akustik und Optik	
9	Schwingungen	235
9.1	Freie ungedämpfte Schwingungen	239
9.1.1	Federpendel	239
9.1.2	Fadenpendel	241
9.1.3	Physisches Pendel	243
9.1.4	Torsionsschwingung	245
9.1.5	Flüssigkeitspendel	246
9.1.6	Elektrischer Schwingkreis	247
9.2	Gedämpfte Schwingungen	248
9.2.1	Reibung	249
9.2.1.1	Gleitreibung und Rollreibung	249
9.2.1.2	Viskose Reibung	250
9.2.1.3	Newtonsche Reibung	252
9.2.2	Gedämpfter elektrischer Schwingkreis	253
9.3	Erzwungene Schwingungen	254
9.4	Überlagerung von Schwingungen	256
9.4.1	Überlagerung von Schwingungen gleicher Frequenz	256
9.4.2	Überlagerung von Schwingungen ungleicher Frequenz	258
9.4.3	Überlagerung von Schwingungen in ungleicher Richtung und mit verschiedener Frequenz	259
9.4.4	Fourier-Analyse, Zerlegung nach Schwingungen	261
9.5	Gekoppelte Schwingungen	262

10	Wellen	265
10.1	Grundlegende Eigenschaften von Wellen	265
10.2	Polarisation	271
10.3	Interferenz	271
10.3.1	Kohärenz	271
10.3.2	Interferenz	272
10.3.3	Stehende Wellen	273
10.3.3.1	Stehende Wellen in einseitig eingespannten Stäben	274
10.3.3.2	Stehende Wellen auf Saiten	275
10.3.3.3	Stehende Wellen im Kundtschen Rohr	275
10.3.4	Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen	276
10.4	Doppler-Effekt	277
10.4.1	Mach-Wellen und Mach-Stoßwellen	278
10.5	Brechung	279
10.6	Reflexion	280
10.6.1	Phasenbeziehungen	280
10.7	Dispersion	281
10.8	Beugung	281
10.8.1	Beugung am Spalt	282
10.8.2	Beugung am Gitter	283
10.9	Modulation von Wellen	284
10.10	Oberflächenwellen und Schwerewellen	285
11	Akustik	287
11.1	Schallwellen	287
11.1.1	Schallgeschwindigkeit	287
11.1.2	Schallkenngrößen	288
11.1.2.1	Schallausschlag	290
11.1.2.2	Schallschnelle und Wellenwiderstand	290
11.1.2.3	Energiedichte	291
11.1.2.4	Schallintensität und Schallleistung	291
11.1.3	Verhältnisgrößen	292
11.2	Schallquellen und Schallempfänger	294
11.2.1	Mechanische Schallsender	294
11.2.1.1	Schwingende Luftsäulen	295
11.2.2	Elektroakustische Schallwandler	296
11.2.2.1	Schallempfänger oder Mikrophone	297
11.2.3	Schallabsorption	299
11.2.4	Schalldämmung	301
11.2.4.1	Nachhall	302
11.2.5	Strömungsgeräusch	302
11.3	Ultraschall	302
11.4	Physiologische Akustik und das Gehör	303
11.4.1	Schallempfindung	304
11.4.2	Bewertete Schallpegel	305
11.5	Musikalische Akustik	305
12	Optik	309
12.1	Geometrische Optik	310
12.1.1	Optische Abbildung – Grundbegriffe	312

12.1.2	Reflexion	315
12.1.2.1	Ebener Spiegel	315
12.1.2.2	Konkavspiegel oder Hohlspiegel	316
12.1.2.3	Konvexspiegel oder Wölbspiegel	319
12.1.3	Brechung	319
12.1.3.1	Brechungsindex	319
12.1.3.2	Negativer Brechungsindex	320
12.1.3.3	Brechungsgesetz	321
12.1.3.4	Fresnelsche Formeln	322
12.1.3.5	Regenbogen	323
12.1.3.6	Totalreflexion	323
12.1.3.7	Lichtwellenleiter	325
12.1.3.8	Brechung am Prisma	329
12.1.3.9	Brechung an planparallelen Platten	331
12.1.3.10	Brechung an Kugeloberflächen	332
12.2	Linse	332
12.2.1	Dicke Linse	333
12.2.2	Dünne Linse	338
12.3	Linsensysteme	339
12.3.1	Linse mit Blende	340
12.3.2	Abbildungsfehler	340
12.3.2.1	Gradientenindex-Linse	342
12.4	Optische Instrumente	343
12.4.1	Lochkamera	343
12.4.2	Fotokamera	344
12.4.3	Auge	344
12.4.4	Auge und optische Instrumente	346
12.4.4.1	Lupe	346
12.4.4.2	Mikroskop	346
12.4.4.3	Fernrohr	348
12.5	Wellenoptik	350
12.5.1	Streuung	350
12.5.2	Beugung und Auflösungsbegrenzung	351
12.5.3	Brechung im Wellenbild	353
12.5.4	Interferenz	354
12.5.5	Diffraktive optische Elemente	358
12.5.5.1	Beugungsgitter	358
12.5.5.2	Fresnel-Zonenplatte	358
12.5.5.3	Fresnel-Zonenlinse	359
12.5.5.4	Hologramme	360
12.5.5.5	Computergenerierte Hologramme	361
12.5.6	Dispersion	362
12.5.7	Spektralapparate	364
12.5.8	Polarisation des Lichts	364
12.5.8.1	Polarisation durch Reflexion	366
12.5.8.2	Polarisation durch Brechung	366
12.6	Photometrie	369
12.6.1	Photometrische Größen	369
12.6.1.1	Strahler	371

12.6.1.2	Spektrale Größen	373
12.6.1.3	Reflexion, Absorption, Transmission	373
12.6.2	Lichttechnische Größen	375
Formelzeichen Schwingungen, Wellen, Akustik und Optik		379
13	Tabellen zu Schwingungen, Akustik und Optik	381
13.1	Tabellen zu Schwingungen und Akustik	381
13.2	Tabellen zur Optik	385
III Elektrizitätslehre		
14	Ladungen und Ströme	389
14.1	Elektrische Ladung	389
14.1.1	Coulombsches Gesetz	391
14.2	Elektrische Ladungsdichte	392
14.3	Elektrischer Strom	394
14.3.1	Ampèresches Gesetz	395
14.4	Elektrische Stromdichte	396
14.4.1	Elektrisches Strömungsfeld	397
14.5	Elektrischer Widerstand und elektrischer Leitwert	398
14.5.1	Elektrischer Widerstand	398
14.5.2	Elektrischer Leitwert	399
14.5.3	Spezifischer Widerstand und elektrische Leitfähigkeit	399
14.5.4	Beweglichkeit von Ladungsträgern	400
14.5.5	Temperaturabhängigkeit des Widerstandes	401
14.5.6	Veränderliche Widerstände	402
14.5.7	Schaltung von Widerständen	403
15	Elektrisches und magnetisches Feld	405
15.1	Elektrisches Feld	405
15.2	Influenz	406
15.2.1	Elektrische Feldlinien	406
15.2.2	Elektrische Feldstärke von Punktladungen	410
15.3	Kraft	410
15.4	Elektrische Spannung	411
15.5	Elektrisches Potenzial	412
15.5.1	Äquipotenzialflächen	413
15.5.2	Feldstärke und Potenzial einiger Ladungsverteilungen	413
15.5.3	Elektrischer Fluss	416
15.5.4	Verschiebungsdichte im Vakuum	418
15.6	Elektrische Polarisation	419
15.6.1	Dielektrikum	420
15.7	Kapazität	422
15.7.1	Plattenkondensator	422
15.7.2	Parallelschaltung von Kondensatoren	423
15.7.3	Reihenschaltung von Kondensatoren	423
15.7.4	Kapazitäten einfacher Leiteranordnungen	424
15.8	Energie und Energiedichte des elektrischen Feldes	425
15.9	Elektrisches Feld an Grenzflächen	426
15.10	Magnetisches Feld	427
15.11	Magnetismus	427
15.11.1	Magnetische Feldlinien	428

15.12	Magnetische Flussdichte	429
15.13	Magnetischer Fluss	431
15.14	Magnetische Feldstärke	433
15.15	Magnetische Spannung und magnetischer Kreis	434
15.15.1	Durchflutungssatz	436
15.15.2	Biot-Savartsches Gesetz	437
15.15.3	Magnetfeld eines geraden Leiters	439
15.15.4	Magnetische Felder einiger Stromverteilungen	440
15.16	Materie im Magnetfeld	441
15.16.1	Diamagnetismus	442
15.16.2	Paramagnetismus	443
15.16.3	Ferromagnetismus	443
15.16.4	Antiferromagnetismus	446
15.16.5	Ferrimagnetismus	447
15.17	Magnetische Felder an Grenzflächen	447
15.18	Induktion	448
15.18.1	Bewegungsinduktion	448
15.18.2	Transformatorische Induktion	449
15.19	Selbstinduktion	450
15.19.1	Induktivitäten geometrischer Leiteranordnungen	451
15.19.2	Magnetischer Leitwert	452
15.20	Gegeninduktion	453
15.20.1	Transformator	454
15.21	Energie und Energiedichte des Magnetfeldes	455
15.22	Maxwellsche Gleichungen	457
15.22.1	Verschiebungsstrom	457
15.22.2	Elektromagnetische Wellen	458
15.22.3	Poynting-Vektor	460
16	Anwendungen in der Elektrotechnik	461
16.1	Gleichstromkreis	462
16.1.1	Kirchhoffsche Gesetze im Gleichstromkreis	463
16.1.2	Widerstände im Gleichstromkreis	463
16.1.3	Reale Spannungsquelle	465
16.1.4	Leistung und Energie im Gleichstromkreis	466
16.1.5	Leistungsanpassung	468
16.1.6	Strom- und Spannungsmessung	468
16.1.6.1	Strommessung	468
16.1.6.2	Spannungsmessung	468
16.1.6.3	Leistungsmessung	469
16.1.7	Widerstandsbestimmung mittels Kompensationsmethode	469
16.1.8	Auf- und Entladung von Kondensatoren	470
16.1.9	Ein- und Ausschalten des Stroms im RL -Kreis	472
16.2	Wechselstromkreis	473
16.2.1	Wechselgrößen	473
16.2.1.1	Zeitlicher Mittelwert periodischer Funktionen	474
16.2.2	Darstellung von Sinusgrößen im Zeigerdiagramm	475
16.2.3	Rechenregeln für Zeigergrößen	477
16.2.4	Grundbegriffe der Wechselstromtechnik	480
16.2.4.1	Komplexer Widerstand	480

16.2.4.2	Ohmsches Gesetz im Komplexen	481
16.2.4.3	Komplexer Leitwert	481
16.2.4.4	Leistung im Wechselstromkreis	483
16.2.4.5	Komplexe Leistung	484
16.2.4.6	Kirchhoffsche Gesetze für Wechselstromkreise	485
16.2.4.7	Reihenschaltung komplexer Widerstände	485
16.2.4.8	Parallelschaltung komplexer Widerstände	485
16.2.5	Grundbauelemente im Wechselstromkreis	486
16.2.5.1	Ohmscher Widerstand	486
16.2.5.2	Kapazität	487
16.2.5.3	Induktivität	488
16.2.5.4	Komplexe Widerstände der einfachsten Zweipole	489
16.2.6	Reihenschaltung von Widerstand und Kapazität	489
16.2.7	Parallelschaltung von Widerstand und Kapazität	490
16.2.8	Parallelschaltung von Widerstand und Induktivität	491
16.2.9	Reihenschaltung von Widerstand und Induktivität	492
16.2.10	Reihenschwingkreis	493
16.2.11	Parallelschwingkreis	494
16.2.12	Äquivalenz von Reihenschaltung und Parallelschaltung	496
16.2.13	Radiowellen	497
16.3	Elektrische Maschinen	498
16.3.1	Prinzipielle Funktionsweise	499
16.3.2	Gleichstrommaschine	500
16.3.3	Drehstrommaschine	502
16.3.3.1	Synchronmaschine	502
16.3.3.2	Asynchronmaschine	503
17	Stromleitung in Flüssigkeiten, in Gasen und im Vakuum	505
17.1	Elektrolyse	505
17.1.1	Stoffmenge	505
17.1.2	Ionen	505
17.1.3	Elektroden	506
17.1.4	Elektrolyte	506
17.1.4.1	Elektrische Leitfähigkeit eines Elektrolyten	506
17.1.4.2	Faradaysche Gesetze	508
17.1.4.3	Elektrische Doppelschicht	509
17.1.4.4	Nernst-Gleichung	510
17.1.5	Galvanische Elemente	510
17.1.5.1	Elektrolytische Polarisation	511
17.1.5.2	Brennstoffelemente	512
17.1.5.3	Akkumulatoren	512
17.1.5.4	Schaltung galvanischer Elemente	513
17.1.6	Elektrokinetische Effekte	513
17.1.6.1	Elektrophorese	513
17.1.6.2	Elektroosmose	514
17.1.6.3	Strömungselektrizität	514
17.2	Stromleitung in Gasen	514
17.2.1	Unselbstständige Gasentladung	514
17.2.1.1	Driftgeschwindigkeit von Ionen in Gasen	514
17.2.1.2	Elektrische Leitfähigkeit von Gasen	515

17.2.1.3	Rekombination	515
17.2.1.4	Strom-Spannungskennlinie eines Gases	516
17.2.2	Selbstständige Gasentladung	517
17.2.2.1	Entladungstypen selbstständiger Gasentladungen	517
17.2.2.2	Strom-Spannungs-Charakteristik einer Gasentladung	518
17.3	Elektronenemission	518
17.3.1	Glühemission	518
17.3.2	Photoemission	519
17.3.3	Feldemission	520
17.3.4	Sekundärelektronenemission	520
17.4	Elektronenröhren	520
17.4.1	Röhrendiode	521
17.4.2	Röhrentriode	522
17.4.2.1	Röhrenkenngrößen	522
17.4.3	Tetrode	524
17.4.4	Kathodenstrahlen	524
17.4.5	Kanalstrahlen	524
18	Plasmaphysik	526
18.1	Eigenschaften eines Plasmas	526
18.1.1	Plasmakenngrößen	526
18.1.1.1	Ionisationsgrad	526
18.1.1.2	Verteilungsfunktionen des Plasmas	527
18.1.1.3	Energieinhalt des Plasmas	529
18.1.1.4	Elektrische Leitfähigkeit von Plasmen	529
18.1.1.5	Wärmeleitfähigkeit eines Plasmas	530
18.1.1.6	Abschirmung und Debye-Länge	530
18.1.1.7	Plasmaschwingungsfrequenz	531
18.1.2	Plasmastrahlung	532
18.1.3	Plasmen in Magnetfeldern	532
18.1.3.1	Bewegung geladener Teilchen in äußeren Feldern	532
18.1.3.2	Ladungsträgerbewegung im Magnetfeld mit Stößen	534
18.1.3.3	Driftbewegung im äußeren elektrischen Feld	534
18.1.3.4	Kontinuumstheorien	534
18.1.4	Plasmawellen	535
18.1.4.1	Plasmaakustische Wellen in Plasmen	535
18.1.4.2	Magnetohydrodynamische Wellen	536
18.1.4.3	Elektromagnetische Wellen in Plasmen	536
18.1.4.4	Landau-Dämpfung	537
18.2	Erzeugung von Plasmen	537
18.2.1	Thermische Plasmaerzeugung	537
18.2.2	Plasmaerzeugung durch Kompression	538
18.2.2.1	Pinch-Effekt	538
18.3	Energieerzeugung mit Plasmen	539
18.3.1	MHD-Generator	540
18.3.2	Kernfusionsreaktoren	540
18.3.3	Fusion unter magnetischer Halterung	542
18.3.4	Fusion unter Trägheitseinschluss	542
	Formelzeichen Elektrizitätslehre	544

19	Tabellen zur Elektrizitätslehre	546
19.1	Metalle und Legierungen	546
19.1.1	Spezifischer elektrischer Widerstand	546
19.1.2	Spannungsreihen	548
19.2	Dielektrika	550
19.3	Praktische Tabellen der Elektrotechnik	556
19.4	Magnetische Eigenschaften	558
19.5	Ferromagnetische Eigenschaften	560
19.5.1	Magnetische Anisotropie	562
19.6	Ferrite	563
19.7	Antiferromagnete	564
19.8	Ionenbeweglichkeit	564
IV	Wärmelehre	
20	Gleichgewicht und Zustandsgrößen	565
20.1	Systeme, Phasen und Gleichgewicht	565
20.1.1	Systeme	565
20.1.1.1	Isolierte oder abgeschlossene Systeme	565
20.1.1.2	Geschlossene Systeme	565
20.1.1.3	Offene Systeme	566
20.1.2	Phasen	566
20.1.3	Gleichgewicht	567
20.2	Zustandsgrößen	569
20.2.1	Begriffsbestimmung	569
20.2.1.1	Extensive Zustandsgrößen	569
20.2.1.2	Intensive Zustandsgrößen	569
20.2.1.3	Spezifische und molare Größen	570
20.2.2	Temperatur	570
20.2.2.1	Temperatureinheiten	571
20.2.2.2	Eichpunkte	572
20.2.2.3	Temperaturmessung	572
20.2.2.4	Kelvin-Skala und absoluter Nullpunkt	574
20.2.3	Druck	575
20.2.3.1	Druckeinheiten	576
20.2.3.2	Druckmessung	577
20.2.4	Teilchenzahl, Stoffmenge und Avogadrozahl	579
20.2.5	Entropie	581
20.3	Thermodynamische Potenziale	583
20.3.1	Prinzip der maximalen Entropie – Prinzip der minimalen Energie	583
20.3.2	Innere Energie als Potenzial	583
20.3.2.1	Innere Energie des idealen Gases	583
20.3.3	Entropie als thermodynamisches Potenzial	584
20.3.3.1	Entropie des idealen Gases	584
20.3.4	Freie Energie	585
20.3.5	Enthalpie	585
20.3.5.1	Enthalpie des idealen Gases	587
20.3.5.2	Enthalpie und Phasenübergänge	587
20.3.5.3	Reaktionsenthalpie und Satz von Hess	587

20.3.6	Freie Enthalpie	588
20.3.6.1	Chemische Reaktionen	588
20.3.6.2	Prinzip von Le Chatelier	589
20.3.7	Maxwell-Relationen	589
20.4	Ideales Gas	590
20.4.1	Boyle-Mariottesches Gesetz	590
20.4.2	Gesetz von Gay-Lussac	591
20.4.3	Zustandsgleichung	592
20.5	Kinetische Theorie des idealen Gases	592
20.5.1	Druck und Temperatur	592
20.5.1.1	Mittlere quadratische Geschwindigkeit	593
20.5.2	Maxwell-Boltzmann-Verteilung	594
20.5.3	Freiheitsgrade	596
20.5.4	Gleichverteilungssatz	596
20.5.5	Transportvorgänge	597
20.6	Zustandsgleichungen	599
20.6.1	Zustandsgleichung des idealen Gases	599
20.6.1.1	Gaskonstanten	600
20.6.1.2	Gasgemische	601
20.6.1.3	Berechnung von Größen aus dem Gasgesetz	602
20.6.1.4	Barometrische Höhenformel	603
20.6.2	Zustandsgleichung realer Gase	603
20.6.2.1	Virialentwicklung des realen Gases	603
20.6.2.2	Van-der-Waals-Gleichung	604
20.6.2.3	Phasenkoexistenzgebiet	606
20.6.2.4	Kritischer Punkt	606
20.6.2.5	Satz der übereinstimmenden Zustände	607
20.6.2.6	Van-der-Waals-Gleichung als Virialentwicklung	607
20.6.3	Zustandsgleichungen für Flüssigkeiten und Festkörper	608
20.6.3.1	Anomalie des Wassers	610
21	Wärme, Energieumwandlung und Zustandsänderungen	612
21.1	Energieformen	612
21.1.1	Energieeinheiten	612
21.1.1.1	Einheiten außerhalb der SI-Norm	612
21.1.2	Arbeit	613
21.1.3	Chemisches Potenzial	614
21.1.4	Wärme	614
21.1.4.1	Spezifische Wärme	615
21.2	Energieumwandlung	615
21.2.1	Umwandlung von äquivalenten Energien in Wärme	616
21.2.1.1	Elektrische Energie	616
21.2.1.2	Mechanische Energie	617
21.2.1.3	Verbrennungsenergie	617
21.2.1.4	Sonnenenergie	618
21.2.2	Umwandlung von Wärme in andere Energieformen	619
21.2.3	Exergie und Anergie	619
21.3	Wärmekapazität	620
21.3.1	Totale Wärmekapazität	620
21.3.1.1	Wärmekapazität von Gemischen von Stoffen	621
21.3.1.2	Wasserwert	621

21.3.2	Molare Wärmekapazität	621
21.3.3	Spezifische Wärmekapazität	623
21.3.3.1	Weitere Eigenschaften der spezifischen Wärmekapazität	623
21.3.3.2	Spezifische Wärmekapazität von Gemischen von Stoffen	624
21.3.3.3	Spezifische Wärmekapazität von Gasen	624
21.3.3.4	Spezifische Wärmekapazität im idealen Gas	625
21.3.3.5	Adiabatenkoeffizient	626
21.3.3.6	Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten und Festkörpern	626
21.4	Zustandsänderungen	627
21.4.1	Reversible und irreversible Prozesse	627
21.4.2	Isothermer Prozess	628
21.4.3	Isobarer Prozess	629
21.4.4	Isochorer Prozess	629
21.4.5	Adiabatischer (isentrop) Prozess	630
21.4.6	Polytroper Prozess	631
21.5	Thermodynamische Hauptsätze	632
21.5.1	Nullter Hauptsatz	632
21.5.2	Erster Hauptsatz	633
21.5.2.1	Äquivalente Formulierungen des ersten Hauptsatzes	634
21.5.2.2	Mikroskopische Aspekte des ersten Hauptsatzes	634
21.5.3	Zweiter Hauptsatz	635
21.5.4	Dritter Hauptsatz	636
21.6	Carnotscher Kreisprozess	636
21.6.1	Prinzip und Anwendung	636
21.6.1.1	Teilschritte des Carnot-Prozesses	637
21.6.1.2	Energiebilanz und Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses	639
21.6.2	Reduzierte Wärme	639
21.7	Thermodynamische Maschinen	640
21.7.1	Rechts- und linkslaufende Prozesse	640
21.7.2	Wärmepumpe und Kältemaschine	640
21.7.3	Stirling-Prozess	641
21.7.4	Dampfmaschine	643
21.7.5	Offene Systeme	644
21.7.6	Otto- und Diesel-Motor	645
21.7.6.1	Otto-Prozess	645
21.7.6.2	Diesel-Prozess	646
21.7.7	Gasturbinen	647
21.8	Gasverflüssigung	648
21.8.1	Herstellung tiefer Temperaturen	648
21.8.1.1	Kältemischungen	648
21.8.1.2	Lösungswärme	648
21.8.1.3	Wärmepumpe	648
21.8.2	Joule-Thomson-Effekt	648
21.8.2.1	Linde-Verfahren	650
21.8.2.2	Claude-Verfahren	650
22	Phasenumwandlungen, Reaktionen und Wärmeausgleich	651
22.1	Phase und Aggregatzustand	651
22.1.1	Phase	651
22.1.2	Aggregatzustände	651

22.1.3	Aggregatumwandlungen	652
22.1.4	Dampf	653
22.2	Ordnung von Phasenübergängen	654
22.2.1	Phasenübergang erster Ordnung	654
22.2.2	Phasenübergang zweiter Ordnung	655
22.2.3	Lambda-Übergänge	655
22.2.4	Phasenkoexistenzgebiet	656
22.2.5	Kritische Indizes	657
22.3	Phasenübergang und Van-der-Waals-Gas	657
22.3.1	Phasengleichgewicht	657
22.3.2	Maxwell-Konstruktion	658
22.3.3	Siedeverzug und Kondensationsverzug	660
22.3.4	Gesetz der übereinstimmenden Zustände	661
22.4	Beispiele für Phasenübergänge	661
22.4.1	Magnetische Phasenumwandlungen	661
22.4.2	Ordnungs-Unordnungs-Phasenübergänge	662
22.4.3	Umwandlungen der Kristallstruktur	662
22.4.4	Flüssige Kristalle	663
22.4.5	Supraleitung	664
22.4.6	Suprafluidität	664
22.5	Mehrkomponentige Gase	665
22.5.1	Partialdruck und Daltonsches Gesetz	665
22.5.2	Euler-Gleichung und Gibbs-Duhem-Relation	666
22.6	Mehrphasensysteme	667
22.6.1	Phasengleichgewicht	667
22.6.2	Gibbssche Phasenregel	667
22.6.3	Clausius-Clapeyron-Gleichung	668
22.7	Dampfdruck von Lösungen	669
22.7.1	Raoultssches Gesetz	669
22.7.2	Siedepunkterhöhung und Gefrierpunktserniedrigung	669
22.7.3	Henry-Dalton-Gesetz	670
22.7.4	Dampf-Luft-Gemische (feuchte Luft)	671
22.8	Chemische Reaktionen	675
22.8.1	Stöchiometrie	675
22.8.2	Phasenregel bei chemischen Reaktionen	676
22.8.3	Massenwirkungsgesetz	677
22.8.4	pH-Wert und Löslichkeitsprodukt	678
22.9	Temperatenausgleich	679
22.9.1	Mischungstemperatur zweier Systeme	679
22.9.2	Reversible und irreversible Prozessführung	680
22.10	Wärmeübertragung	681
22.10.1	Wärmestrom	681
22.10.2	Wärmeübergang	682
22.10.3	Wärmeleitung	684
22.10.4	Wärmewiderstand	687
22.10.5	Wärmedurchgang	689
22.10.6	Wärmestrahlung	693
22.10.7	Strahlungsaufnahme	693
22.11	Wärme- und Massentransport	695
22.11.1	Fouriersches Gesetz	695

22.11.2	Kontinuitätsgleichung	695
22.11.3	Wärmeleitungsgleichung	696
22.11.4	Ficksches Gesetz und Diffusionsgleichung	697
22.11.5	Lösung von Wärmeleitungs- und Diffusionsgleichung	698
Formelzeichen Wärmelehre		699
23	Tabellen zur Thermodynamik	702
23.1	Charakteristische Temperaturen	702
23.1.1	Einheiten und Eichpunkte	702
23.1.2	Schmelz- und Siedepunkte	703
23.1.3	Curie- und Néel-Temperaturen	711
23.2	Kenngößen realer Gase	712
23.3	Thermische Eigenschaften der Stoffe	713
23.3.1	Viskosität	713
23.3.2	Ausdehnung, Wärmekapazität und thermische Leitfähigkeit	713
23.4	Wärmeübertragung	719
23.5	Praktische Korrekturdaten	721
23.5.1	Druckmessung	721
23.5.1.1	Umrechnung auf Meeresniveau	722
23.5.1.2	Quecksilberbarometer-Messungen (Temperaturkorrektur)	724
23.5.2	Volumenmessungen – Umrechnung auf Standardtemperatur	725
23.5.2.1	Glas-Volumenometermessungen	725
23.6	Erzeugung flüssiger Tieftemperaturbäder	726
23.7	Trockenmittel	726
23.8	Dampfdruck	727
23.8.1	Lösungen	727
23.8.2	Relative Feuchte	727
23.8.3	Dampfdruck von Wasser	728
23.9	Spezifische Enthalpien	730
V Quantenphysik		
24	Photonen – Elektromagnetische Strahlung und Lichtquanten	733
24.1	Plancksches Strahlungsgesetz	733
24.2	Photoelektrischer Effekt	736
24.3	Compton-Effekt	737
25	Materiewellen – Wellenmechanik der Teilchen	739
25.1	Wellennatur der Teilchen	739
25.1.1	Grundannahmen der Quantenmechanik	739
25.1.2	Welle-Teilchen-Dualismus	740
25.2	Heisenbergsche Unschärferelation	740
25.3	Wellenfunktion und Observable	741
25.4	Schrödingergleichung	748
25.4.1	Stückweise konstante Potenziale	749
25.4.2	Harmonischer Oszillator	753
25.4.3	Pauli-Prinzip	756
25.5	Spin und magnetische Momente	756
25.5.1	Spin	756
25.5.2	Magnetische Momente	759

26	Atom- und Molekülphysik	762
26.1	Grundbegriffe der Spektroskopie	763
26.2	Wasserstoffatom	765
26.2.1	Bohrsche Postulate	765
26.3	Stationäre Zustände und Quantenzahlen im Zentralfeld	770
26.4	Vielelektronenatome	774
26.5	Röntgenstrahlen	778
26.5.1	Anwendung von Röntgenstrahlen	780
26.6	Molekülspektren	781
26.7	Atome in äußeren Feldern	784
26.8	Periodensystem der Elemente	786
26.9	Wechselwirkung von Photonen mit Atomen und Molekülen	788
26.9.1	Spontane und induzierte Emission	788
27	Elementarteilchenphysik – das Standard-Modell	791
27.1	Vereinheitlichung der Wechselwirkungen	791
27.1.1	Standard-Modell	791
27.1.1.1	Gravitations-Wechselwirkung	792
27.1.1.2	Elektromagnetische Wechselwirkung	792
27.1.1.3	Schwache Wechselwirkung	793
27.1.1.4	Starke Wechselwirkung	794
27.1.2	Feldquanten oder Eichbosonen	794
27.1.3	Fermionen und Bosonen	796
27.2	Leptonen, Quarks und Vektorbosonen	798
27.2.1	Leptonen	798
27.2.2	Quarks	799
27.2.3	Hadronen	801
27.2.4	Beschleuniger und Detektoren	805
27.3	Symmetrien und Erhaltungssätze	806
27.3.1	Paritätserhaltung und schwache Wechselwirkung	807
27.3.2	Ladungserhaltung und Paarbildung	808
27.3.3	Ladungskonjugation und Antiteilchen	809
27.3.4	Zeitumkehr-Invarianz und Umkehrreaktionen	809
27.3.5	Erhaltungssätze	810
27.3.6	Jenseits des Standard-Modells	811
28	Kernphysik	813
28.1	Bausteine des Atomkerns	813
28.2	Grundgrößen des Atomkerns	815
28.3	Nukleon-Nukleon-Wechselwirkung	818
28.3.1	Phänomenologische Nukleon-Nukleon-Potenziale	818
28.3.2	Mesonenaustauschpotenziale	819
28.4	Kernmodelle	820
28.4.1	Fermigas-Modell	820
28.4.2	Kernmaterie	820
28.4.3	Tröpfchen-Modell	821
28.4.4	Schalenmodell	822
28.4.5	Kollektivmodell	825
28.5	Kernreaktionen	827
28.5.1	Reaktionskanäle und Wirkungsquerschnitte	827

28.5.2	Erhaltungssätze in Kernreaktionen	830
28.5.2.1	Energie- und Impulserhaltung	830
28.5.2.2	Drehimpulserhaltung	831
28.5.3	Elastische Streuung	832
28.5.4	Compoundkernreaktion	833
28.5.5	Optisches Modell	835
28.5.6	Direkte Reaktion	836
28.5.7	Schwerionenreaktionen	837
28.5.8	Kernspaltung	840
28.6	Kernzerfall	842
28.6.1	Zerfallsgesetz	842
28.6.2	α -Zerfall	846
28.6.3	β -Zerfall	847
28.6.4	γ -Zerfall	849
28.6.5	Emission von Nukleonen und Nukleonenclustern	850
28.7	Kernreaktor	851
28.7.1	Reaktortypen	852
28.8	Kernfusion	854
28.9	Wechselwirkung von Strahlung mit Materie	857
28.9.1	Ionisierende Teilchen	857
28.9.2	γ -Strahlung	860
28.10	Dosimetrie	862
28.10.1	Dosismessverfahren	865
28.10.2	Umweltradioaktivität	866
29	Festkörperphysik	869
29.1	Struktur fester Körper	869
29.1.1	Einige Grundbegriffe der Festkörperphysik	869
29.1.2	Struktur der Kristalle	870
29.1.3	Bravais-Gitter	872
29.1.3.1	Einfache Kristallstrukturen	875
29.1.4	Methoden der Strukturuntersuchung	876
29.1.5	Bindungsverhältnisse in Kristallen	878
29.2	Gitterfehler	881
29.2.1	Punktfehler	881
29.2.2	Eindimensionale Defekte	882
29.2.3	Zweidimensionale Gitterfehler	884
29.2.4	Amorphe Festkörper	885
29.3	Mechanische Eigenschaften von Werkstoffen	886
29.3.1	Makromolekulare Festkörper	887
29.3.1.1	Polymere	887
29.3.1.2	Thermoplaste	889
29.3.1.3	Elastomere	889
29.3.1.4	Duromere	889
29.3.2	Verbundwerkstoffe	889
29.3.3	Legierungen	890
29.3.4	Flüssigkristalle	892
29.4	Phononen und Gitterschwingungen	894
29.4.1	Elastische Wellen	894
29.4.2	Phononen und spezifische Wärmekapazität	897

29.4.3	Einstein-Modell	898
29.4.4	Debye-Modell	899
29.4.5	Wärmeleitung	901
29.5	Elektronen im Festkörper	903
29.5.1	Freies Elektronengas	903
29.5.2	Bändermodell	908
29.6	Halbleiter	912
29.6.1	Störstellenleitung	915
29.6.2	Halbleiterdiode	917
29.6.3	Transistor	925
29.6.3.1	Bipolare Transistoren	925
29.6.3.2	Grundschaltungen	927
29.6.3.3	Darlington-Transistor	931
29.6.4	Unipolare (Feldeffekt-)Transistoren	932
29.6.4.1	Sperrschicht-FET (Junction-FET)	932
29.6.4.2	Insulated Gate FET (IGFET, MOSFET)	933
29.6.5	Thyristor	934
29.6.5.1	Triac	936
29.6.5.2	Abschaltthyristor (GTO)	936
29.6.5.3	Insulated-Gate-Bipolar-Thyristor (IGBT)	937
29.6.6	Integrierte Schaltkreise (IC)	937
29.6.6.1	Herstellung von ICs	937
29.6.6.2	Erzeugung von Schaltungsstrukturen	937
29.6.7	Operationsverstärker	939
29.6.7.1	Gegengekoppelter Operationsverstärker	941
29.6.7.2	Invertierender Verstärker	941
29.6.7.3	Summationsverstärker	942
29.6.7.4	Integrator	943
29.6.7.5	Differenzierer	943
29.6.7.6	Spannungsfolger	944
29.6.7.7	Mitgekoppelter Operationsverstärker	944
29.6.7.8	Schmitt-Trigger	944
29.7	Supraleitung	945
29.7.1	Grundlegende Eigenschaften der Supraleitung	945
29.7.2	Hochtemperatur-Supraleiter	950
29.8	Magnetische Eigenschaften	951
29.8.1	Ferromagnetismus	953
29.8.2	Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus	956
29.9	Dielektrische Eigenschaften	957
29.9.1	Paraelektrika	960
29.9.2	Ferroelektrika	961
29.10	Optische Eigenschaften von Kristallen	962
29.10.1	Exzitonen und ihre Eigenschaften	962
29.10.2	Photoleitfähigkeit	964
29.10.3	Lumineszenz	965
29.10.4	Optoelektronische Eigenschaften	965
	Formelzeichentabelle Mikrophysik	967
30	Tabellen zur Quantenphysik	972
30.1	Ionisationspotenziale	972

30.2	Atom- und Ionenradien der Elemente	977
30.3	Elektronenemission	979
30.4	Röntgenstrahlung	983
30.5	Kernreaktionen	983
30.6	Wechselwirkung der Strahlung mit Materie	984
30.7	Halleffekt	985
30.8	Supraleiter	986
30.9	Halbleiter – thermische, magnetische und elektrische Eigenschaften	988
VI	Anhang	
31	Messungen und Messfehler	991
31.1	Beschreibung von Messungen	991
31.1.1	Größen und SI-Einheiten	991
31.2	Fehlerrechnung und Statistik	994
31.2.1	Fehlerarten	994
31.2.1.1	Messergebnis	994
31.2.1.2	Messfehler	994
31.2.1.3	Fehlerfortpflanzung	995
31.2.2	Mittelwerte von Messreihen	995
31.2.3	Streuung	997
31.2.4	Korrelation	998
31.2.5	Ausgleichsrechnung, Regression	998
31.2.6	Häufigkeitsverteilungen	999
31.2.6.1	Spezielle diskrete Verteilungen	1001
31.2.6.2	Spezielle stetige Verteilungen	1002
31.2.7	Zuverlässigkeit	1004
32	Vektorrechnung	1006
32.1	Vektoren	1006
32.2	Multiplikation mit einem Skalar	1007
32.3	Addition und Subtraktion von Vektoren	1007
32.4	Multiplikation von Vektoren	1008
33	Differenzial- und Integralrechnung	1011
33.1	Differenzialrechnung	1011
33.1.1	Differenziationsregeln	1011
33.2	Integralrechnung	1012
33.2.1	Integrationsregeln	1013
33.3	Ableitungen und Integrale elementarer Funktionen	1014
34	Tabellen zum SI-System	1015
	Sachwortverzeichnis	1031