



Leseprobe

Horst Kuchling

Taschenbuch der Physik

ISBN (Buch): 978-3-446-44218-4

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44218-4>

sowie im Buchhandel.

---

# INHALTSVERZEICHNIS

---

<b>G</b>	<b>GRÖSSEN UND EINHEITEN</b> . . . . .	<b>26</b>
<b>1</b>	<b>Physikalische Größen</b> . . . . .	<b>26</b>
	1.1 Basisgrößenarten . . . . .	26
	1.2 Abgeleitete Größenarten . . . . .	26
	1.3 Formelzeichen . . . . .	27
	1.4 Dimension . . . . .	28
	1.5 Skalare Größen . . . . .	28
	1.6 Vektorielle Größen . . . . .	29
	1.7 Rechnen mit vektoriellen Größen . . . . .	30
	1.7.1 Summe vektorieller Größen . . . . .	30
	1.7.2 Differenz vektorieller Größen . . . . .	30
	1.7.3 Produkt einer vektoriellen mit einer skalaren Größe . . . . .	31
	1.7.4 Skalarprodukt zweier vektorieller Größen . . . . .	31
	1.7.5 Vektorprodukt zweier vektorieller Größen . . . . .	32
	1.7.6 Komponentendarstellung vektorieller Größen . . . . .	33
<b>2</b>	<b>Gleichungen physikalischer Größen</b> . . . . .	<b>34</b>
	2.1 Größengleichungen . . . . .	34
	2.2 Zugesechnittene Größengleichungen . . . . .	34
	2.2.1 Tabellen . . . . .	35
	2.2.2 Koordinatenachsen . . . . .	36
	2.3 Zahlenwertgleichungen . . . . .	36
<b>3</b>	<b>Internationales Einheitensystem (SI)</b> . . . . .	<b>37</b>
	3.1 Basiseinheiten des SI . . . . .	37
	3.2 Abgeleitete SI-Einheiten . . . . .	37
	3.3 Dezimale Vielfache und Teile der SI-Einheiten . . . . .	38
	3.4 Einheiten außerhalb des SI (SI-fremde Einheiten) . . . . .	38
	3.5 Gesetzliche Einheiten . . . . .	39
	3.6 Physikalische Größenarten und ihre Einheiten . . . . .	39
<b>M</b>	<b>MECHANIK</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>4</b>	<b>Basiseinheiten der Mechanik</b> . . . . .	<b>50</b>
	4.1 Einheit der Länge . . . . .	50
	4.1.1 Fläche . . . . .	51
	4.1.2 Volumen . . . . .	52
	4.1.3 Winkel . . . . .	52
	4.2 Zeiteinheit . . . . .	53
	4.3 Masseneinheit . . . . .	54

<b>5</b>	<b>Statik des starren Körpers</b>	<b>55</b>
5.1	Zusammensetzen von Kräften	55
5.1.1	Kräfte mit gleicher Wirkungslinie	55
5.1.2	Kräfte mit gleichem Angriffspunkt	56
5.1.3	Kräfte mit verschiedenen Angriffspunkten	57
5.1.4	Parallele Kräfte	57
5.2	Zerlegen von Kräften	58
5.3	Drehmoment	59
5.4	Gleichgewichtsbedingungen	60
5.5	Einfache Maschinen	61
5.5.1	Hebel	61
5.5.2	Feste Rolle	62
5.5.3	Lose Rolle	62
5.5.4	Flaschenzug	62
5.5.5	Differenzialflaschenzug	63
5.5.6	Geneigte Ebene	63
5.5.7	Keil	64
5.5.8	Schraube	64
5.6	Gleichgewicht	65
5.6.1	Schwerpunkt (Massenmittelpunkt)	65
5.6.2	Gleichgewichtsarten	67
5.6.3	Standfestigkeit	67
<b>6</b>	<b>Kinematik</b>	<b>68</b>
6.1	Translation	68
6.1.1	Gleichförmige Translation	69
6.1.2	Gleichmäßig beschleunigte Translation	70
6.1.3	Ungleichmäßig beschleunigte Translation	74
6.2	Fall und Wurf	77
6.2.1	Freier Fall	77
6.2.2	Senkrechter Wurf	78
6.2.3	Zusammengesetzte Bewegung	79
6.2.4	Waagerechter Wurf	80
6.2.5	Schräger Wurf	82
6.3	Rotation	84
6.3.1	Gleichförmige Rotation	87
6.3.2	Gleichmäßig beschleunigte Rotation	87
6.3.3	Ungleichmäßig beschleunigte Rotation	91
6.3.4	Bewegung auf der Kreisbahn (Umfangsbewegung)	94
6.3.5	Größen der Rotation als Vektoren	95
6.4	Krummlinige Bewegung	95
<b>7</b>	<b>Dynamik</b>	<b>98</b>
7.1	Kräfte bei der Translation	98
7.1.1	Masse und Kraft	98
7.1.2	Dichte	101
7.1.3	Federkraft	103

7.1.4	Reibungskraft . . . . .	104
7.1.5	Trägheitskräfte bei der Translation . . . . .	105
7.2	Arbeit, Energie und Leistung . . . . .	106
7.2.1	Arbeit . . . . .	106
7.2.2	Energie . . . . .	111
7.2.3	Gesetz von der Erhaltung der Energie . . . . .	113
7.2.4	Leistung . . . . .	114
7.2.5	Wirkungsgrad . . . . .	116
7.3	Impuls und Stoß . . . . .	117
7.3.1	Impuls . . . . .	117
7.3.2	Kraftstoß . . . . .	117
7.3.3	Impulssatz . . . . .	119
7.3.4	Elastischer Stoß . . . . .	119
7.3.5	Unelastischer Stoß . . . . .	121
7.3.6	Teilelastischer Stoß . . . . .	122
7.4	Dynamik der Drehbewegung (Dynamik starrer Körper) . . . . .	124
7.4.1	Zentripetalkraft . . . . .	124
7.4.2	Trägheitskräfte bei der Rotation . . . . .	125
7.4.3	Dynamisches Grundgesetz der Rotation . . . . .	126
7.4.4	Trägheitsmoment . . . . .	128
7.4.5	Arbeit bei der Rotation . . . . .	135
7.4.6	Leistung bei der Rotation . . . . .	136
7.4.7	Rotationsenergie . . . . .	137
7.4.8	Drehimpuls (Drall) . . . . .	138
7.5	Gravitation . . . . .	140
7.5.1	Gravitationsgesetz . . . . .	141
7.5.2	Fallbeschleunigung . . . . .	142
7.5.3	Gravitationsfeld . . . . .	143
7.5.4	Arbeit im Gravitationsfeld . . . . .	144
7.5.5	Astronautische Geschwindigkeiten . . . . .	144
7.5.6	Kepler'sche Gesetze . . . . .	147
7.5.7	Daten des Sonnensystems . . . . .	148
<b>8</b>	<b>Ruhende Flüssigkeiten . . . . .</b>	<b>150</b>
8.1	Druck in Flüssigkeiten . . . . .	151
8.1.1	Kolbendruck . . . . .	151
8.1.2	Schweredruck . . . . .	152
8.2	Kompressibilität . . . . .	153
8.3	Auftrieb . . . . .	153
8.3.1	Bestimmung der Dichte fester Körper . . . . .	154
8.3.2	Bestimmung der Dichte von Flüssigkeiten . . . . .	155
<b>9</b>	<b>Ruhende Gase . . . . .</b>	<b>156</b>
9.1	Druck und Volumen eines Gases . . . . .	156
9.1.1	Überdruck . . . . .	157
9.1.2	Messung des Gasdrucks . . . . .	157

9.2	Luftdruck . . . . .	157
9.2.1	Luftdruckmessung . . . . .	159
9.2.2	Wirkung des Luftdrucks . . . . .	160
9.2.3	Auftrieb in Gasen . . . . .	160
<b>10</b>	<b>Strömungen . . . . .</b>	<b>161</b>
10.1	Reibungsfreie Strömung . . . . .	161
10.1.1	Ausfluss aus Gefäßen . . . . .	161
10.1.2	Durchfluss durch Röhren . . . . .	162
10.1.3	Druck in Strömungen . . . . .	163
10.1.4	Druckmessung in Strömungen . . . . .	165
10.2	Laminare Strömung . . . . .	167
10.2.1	Dynamische Viskosität (Zähigkeit) . . . . .	168
10.2.2	Laminare Strömung durch ein Rohr . . . . .	169
10.2.3	Laminare Strömung um eine Kugel . . . . .	172
10.3	Turbulente Strömung . . . . .	173
10.3.1	Strömungswiderstand . . . . .	173
10.3.2	Strömungsleistung . . . . .	174
10.3.3	Reynolds'sches Ähnlichkeitsgesetz . . . . .	174
<b>11</b>	<b>Moleküle . . . . .</b>	<b>176</b>
11.1	Molekularkräfte . . . . .	176
11.1.1	Kohäsion und Adhäsion . . . . .	176
11.1.2	Oberflächenspannung . . . . .	177
11.1.3	Kapillarität . . . . .	179
11.2	Molekularbewegung . . . . .	180
11.2.1	Diffusion . . . . .	181
11.2.2	Osmose . . . . .	181
11.3	Lösungen . . . . .	181
11.3.1	Molekulardisperse Systeme (echte Lösungen) . . . . .	181
11.3.2	Kolloiddisperse Systeme (kolloide Lösungen) . . . . .	182
11.3.3	Korpuskulardisperse Systeme . . . . .	182
<b>12</b>	<b>Elastizität fester Körper . . . . .</b>	<b>184</b>
12.1	Dehnung . . . . .	184
12.2	Kompression . . . . .	187
12.3	Scherung . . . . .	188
12.4	Torsion (Drillung) . . . . .	189
12.5	Härte . . . . .	190
<b>13</b>	<b>Mechanische harmonische Schwingungen . . . . .</b>	<b>192</b>
13.1	Ungedämpfte harmonische Schwingung . . . . .	193
13.1.1	Phasenwinkel . . . . .	193
13.1.2	Elongation . . . . .	194
13.1.3	Geschwindigkeit . . . . .	195
13.1.4	Beschleunigung . . . . .	195
13.1.5	Rückstellkraft . . . . .	196

13.2	Eigenfrequenz der ungedämpften harmonischen Schwingung	197
13.2.1	Schwingungsgleichung	197
13.2.2	Lineare Federschwingung	198
13.2.3	Drehschwingung	199
13.2.4	Pendelschwingungen	200
13.2.5	Flüssigkeitsschwingungen	203
13.2.6	Schwingungsenergie	203
13.3	Freie gedämpfte Schwingung	205
13.3.1	Schwingungsgleichung	206
13.3.2	Elongation	207
13.3.3	Eigenfrequenz	209
13.3.4	Aperiodische Bewegung	210
13.4	Erzwungene Schwingung	213
13.4.1	Schwingungsgleichung	213
13.4.2	Elongation	214
13.4.3	Resonanz	215
13.5	Überlagerung von Schwingungen	218
13.5.1	Schwingungen gleicher Richtung und Frequenz	218
13.5.2	Schwingungen gleicher Richtung und ungleicher Frequenz	220
13.5.3	Schwingungen ungleicher Richtung	222
13.6	Gekoppelte Schwingungen	226
<b>14</b>	<b>Mechanische Wellen</b>	<b>229</b>
14.1	Wellenausbreitung	229
14.1.1	Huygens'sches Prinzip	229
14.1.2	Wellenarten	229
14.2	Lineare Sinuswelle	231
14.2.1	Wellengleichung	231
14.2.2	Elongation	231
14.2.3	Phasengeschwindigkeit	232
14.2.4	Phasensprung	233
14.2.5	Stehende Wellen	233
14.3	Wellen in ausgedehnten Medien	235
14.3.1	Überlagerung	235
14.3.2	Reflexion	236
14.3.3	Brechung	236
14.3.4	Beugung	237
14.4	Größen des Wellenfeldes	238
14.4.1	Energiedichte	238
14.4.2	Energiestrom	238
14.4.3	Leistung	239
14.4.4	Intensität	239
14.4.5	Wellenwiderstand	240

<b>W</b>	<b>WÄRMELEHRE</b> .....	<b>241</b>
<b>15</b>	<b>Temperatur</b> .....	<b>241</b>
	15.1 Temperaturmessung .....	242
	15.1.1 Temperaturskalen .....	242
	15.1.2 Thermometer .....	243
	15.2 Ausdehnung fester Körper .....	244
	15.2.1 Längenänderung .....	244
	15.2.2 Flächenänderung .....	245
	15.2.3 Volumenänderung .....	246
	15.3 Ausdehnung von Flüssigkeiten .....	247
	15.3.1 Volumenänderung .....	247
	15.3.2 Dichteänderung .....	248
	15.4 Ausdehnung der Gase .....	248
	15.4.1 Volumenänderung .....	248
	15.4.2 Druckänderung .....	250
	15.5 Gasgesetze .....	252
	15.5.1 Zustandsgleichung des idealen Gases .....	252
	15.5.2 Gasdichte .....	253
	15.5.3 Normvolumen .....	255
	15.5.4 Gasgemische .....	255
	15.5.5 Molare Größen .....	256
<b>16</b>	<b>Wärmeenergie</b> .....	<b>259</b>
	16.1 Wärmemenge .....	259
	16.1.1 Wärmeinhalt .....	260
	16.1.2 Wärmekapazität .....	260
	16.1.3 Wasserwert .....	261
	16.2 Spezifische Wärmekapazität .....	262
	16.3 Wärmemischung .....	264
	16.4 Wärmequellen .....	265
	16.4.1 Sonnenenergie .....	265
	16.4.2 Verbrennungsenergie .....	266
	16.4.3 Elektrische Energie .....	267
	16.4.4 Mechanische Energie .....	267
<b>17</b>	<b>Aggregatzustände</b> .....	<b>269</b>
	17.1 Schmelzen und Erstarren .....	269
	17.1.1 Schmelzpunkt .....	270
	17.1.2 Erstarrungspunkt von Lösungen .....	270
	17.1.3 Volumenänderung .....	271
	17.1.4 Schmelzwärme .....	271
	17.1.5 Lösungswärme .....	272
	17.2 Verdampfen und Kondensieren .....	272
	17.2.1 Siedepunkt .....	273
	17.2.2 Siedepunkt von Lösungen .....	273
	17.2.3 Volumenänderung .....	273

17.2.4	Verdampfungswärme	274
17.2.5	Verdunsten	275
17.2.6	Sublimieren	275
17.3	Dämpfe	275
17.3.1	Gesättigter Dampf	275
17.3.2	Ungesättigter Dampf	276
17.3.3	Dampfbildung im gaserfüllten Raum	276
17.3.4	Tripelpunkt	277
17.3.5	Luftfeuchtigkeit	278
17.4	Reale Gase	280
17.4.1	Zustandsgleichung realer Gase	280
17.4.2	Kritische Temperatur	281
17.4.3	Verflüssigung der Gase	282
<b>18</b>	<b>Zustandsänderung des idealen Gases</b>	<b>284</b>
18.1	Erster Hauptsatz	284
18.1.1	Volumenänderungsarbeit	285
18.1.2	Innere Energie	286
18.1.3	Enthalpie	287
18.2	Isochore Zustandsänderung	287
18.3	Isobare Zustandsänderung	288
18.4	Isotherme Zustandsänderung	289
18.5	Isentrope Zustandsänderung	291
18.6	Polytrope Zustandsänderung	294
18.7	Kreisprozesse	298
18.7.1	Carnot'scher Kreisprozess	299
18.7.2	Thermischer Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses	300
18.7.3	Thermische Maschinen	301
18.8	Zweiter Hauptsatz	303
18.8.1	Reversible und irreversible Prozesse	303
18.8.2	Entropie	304
<b>19</b>	<b>Kinetische Wärmetheorie</b>	<b>309</b>
19.1	Anzahl und Masse der Moleküle	309
19.1.1	Loschmidt-Konstante	309
19.1.2	Avogadro-Konstante	309
19.1.3	Boltzmann-Konstante	310
19.1.4	Masse eines Moleküls	310
19.2	Druck in einem Gas	310
19.3	Geschwindigkeit der Moleküle	312
19.3.1	Maxwell-Verteilung der Geschwindigkeit	312
19.3.2	Wahrscheinlichste Geschwindigkeit	313
19.3.3	Mittlere quadratische Geschwindigkeit	314
19.3.4	Mittelwert der Geschwindigkeit	314
19.4	Energie der Moleküle	315
19.4.1	Kinetische Energie eines Moleküls	315

	19.4.2 Gleichverteilungssatz	316
	19.4.3 Innere Energie und spezifische Wärmekapazität	316
19.5	Stoßzahl und freie Weglänge	318
	19.5.1 Mittlere Stoßzahl	318
	19.5.2 Mittlere freie Weglänge	319
<b>20</b>	<b>Wärmetransport</b>	<b>321</b>
	20.1 Wärmeströmung (Konvektion)	321
	20.2 Wärmeleitung	321
	20.3 Wärmeübergang	324
	20.4 Wärmedurchgang	325
	20.5 Temperaturstrahlung	328
	20.5.1 Absorption	328
	20.5.2 Emission	329
	20.5.3 Strahlungsgesetz von Stefan und Boltzmann	330
	20.5.4 Strahlungsgesetz von Planck	331
	20.5.5 Verschiebungsgesetz von Wien	332
<b>A</b>	<b>AKUSTIK</b>	<b>333</b>
<b>21</b>	<b>Schallerzeugung</b>	<b>333</b>
	21.1 Wesen des Schalls	333
	21.2 Schallquellen	334
	21.2.1 Schwingende Saiten	334
	21.2.2 Schwingende Luftsäulen	335
	21.3 Tonleiter	335
	21.3.1 Harmonische (diatonische) Tonleiter	336
	21.3.2 Chromatische Tonleiter	336
	21.3.3 Gleichmäßig temperierte chromatische Tonleiter	337
	21.3.4 Normstimmton	337
	21.3.5 Intervalle	338
<b>22</b>	<b>Schallausbreitung</b>	<b>340</b>
	22.1 Schallgeschwindigkeit	340
	22.1.1 Schallgeschwindigkeit in Festkörpern	340
	22.1.2 Schallgeschwindigkeit in Flüssigkeiten	340
	22.1.3 Schallgeschwindigkeit in Gasen	341
	22.1.4 Schallgeschwindigkeit in Luft	341
	22.2 Doppler-Effekt	342
	22.3 Überlagerung von Schallwellen	346
	22.3.1 Auslöschung	346
	22.3.2 Verstärkung	346
	22.3.3 Schwebung	346
<b>23</b>	<b>Schallmessung</b>	<b>348</b>
	23.1 Schallfeldgrößen	348
	23.1.1 Schallschnelle	348
	23.1.2 Schalldruck	349
	23.1.3 Schallintensität	350

23.1.4	Schallpegel	351
23.1.5	Relativer Schallpegel	354
23.2	Hören	354
23.2.1	Hörfläche	354
23.2.2	Lautstärkepegel	355
23.2.3	Bewerteter Schallpegel	357
<b>24</b>	<b>Ultraschall</b>	<b>358</b>
24.1	Eigenschaften	358
24.1.1	Schallstärke	358
24.1.2	Ausbreitung	358
24.2	Erzeugung von Ultraschall	359
<b>O</b>	<b>OPTIK</b>	<b>360</b>
<b>25</b>	<b>Strahlenoptik</b>	<b>360</b>
25.1	Lichtausbreitung	360
25.1.1	Geradlinigkeit der Ausbreitung	360
25.1.2	Lichtgeschwindigkeit	360
25.2	Reflexion	361
25.2.1	Reflexionsgesetz	361
25.2.2	Ebener Spiegel	362
25.2.3	Hohlspiegel (Konkavspiegel)	362
25.2.4	Wölbspiegel (Konvexspiegel)	364
25.3	Brechung	365
25.3.1	Brechungsgesetz	365
25.3.2	Totalreflexion	366
25.3.3	Planparallele Platte	367
25.3.4	Prisma	368
25.4	Linsen	369
25.4.1	Linsenarten	369
25.4.2	Bestimmung der Brennweite	371
25.4.3	Konstruktion des Linsenbildes	372
25.4.4	Abbildungsgesetze	373
25.4.5	Dicke Linsen	374
25.4.6	Abbildungsfehler	375
25.5	Optische Geräte	376
25.5.1	Projektor	376
25.5.2	Kamera (Fotoapparat)	378
25.5.3	Auge	379
25.5.4	Lupe	381
25.5.5	Mikroskop	382
25.5.6	Fernrohre	383
25.6	Zerlegung des Lichts	385
25.6.1	Lichtquellen	385
25.6.2	Lichtzerlegung	386
25.6.3	Komplementärfarben	387

	25.6.4 Farbmischung . . . . .	387
	25.6.5 Spektren . . . . .	388
	25.6.6 Dispersion . . . . .	390
<b>26</b>	<b>Wellenoptik . . . . .</b>	<b>391</b>
	26.1 Interferenz . . . . .	391
	26.1.1 Farben dünner Schichten . . . . .	391
	26.1.2 Newton'sche Ringe . . . . .	392
	26.2 Beugung . . . . .	393
	26.2.1 Beugung am engen Spalt . . . . .	394
	26.2.2 Beugung am Doppelspalt . . . . .	395
	26.2.3 Beugungsgitter . . . . .	395
	26.2.4 Beugungsspektrum . . . . .	396
	26.2.5 Beugung an kreisförmiger Öffnung . . . . .	396
	26.2.6 Auflösungsvermögen optischer Geräte . . . . .	397
	26.3 Polarisisation . . . . .	398
	26.3.1 Polarisisation durch Reflexion . . . . .	399
	26.3.2 Polarisisation durch Doppelbrechung . . . . .	400
	26.3.3 Spannungsdoppelbrechung . . . . .	401
	26.3.4 Kerr-Effekt . . . . .	402
	26.3.5 Optische Aktivität . . . . .	402
	26.3.6 Faraday-Effekt . . . . .	403
<b>27</b>	<b>Lichtstrahlung . . . . .</b>	<b>404</b>
	27.1 Strahlungsphysikalische Größen . . . . .	404
	27.2 Lichttechnische Größen (Fotometrie) . . . . .	406
	27.2.1 Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad . . . . .	406
	27.2.2 Lichtstärke . . . . .	407
	27.2.3 Leuchtdichte . . . . .	409
	27.2.4 Lichtstrom . . . . .	410
	27.2.5 Spezifische Lichtausstrahlung . . . . .	411
	27.2.6 Lichtmenge . . . . .	411
	27.2.7 Beleuchtungsstärke . . . . .	412
	27.2.8 Belichtung . . . . .	413
	27.3 Fotometer . . . . .	414
	27.3.1 Messung der Lichtstärke . . . . .	414
	27.3.2 Messung des Gesamtlichtstroms . . . . .	415
	27.3.3 Messung der Beleuchtungsstärke . . . . .	415
<b>E</b>	<b>ELEKTRIK . . . . .</b>	<b>416</b>
<b>28</b>	<b>Gleichstromkreis . . . . .</b>	<b>416</b>
	28.1 Elektrischer Strom . . . . .	416
	28.1.1 Elektrische Stromstärke . . . . .	416
	28.1.2 Elektrische Ladung . . . . .	416
	28.2 Elektrische Spannung . . . . .	417
	28.2.1 Quellenspannung $U_q$ (Urspannung) . . . . .	417
	28.2.2 Spannungsabfall $U$ . . . . .	418

28.3	Elektrischer Widerstand . . . . .	418
28.3.1	Spezifischer elektrischer Widerstand . . . . .	420
28.3.2	Widerstand und Temperatur . . . . .	420
28.4	Elektrischer Stromkreis . . . . .	421
28.5	Stromverzweigung . . . . .	424
28.6	Schaltung von Widerständen . . . . .	424
28.6.1	Reihenschaltung . . . . .	424
28.6.2	Parallelschaltung . . . . .	425
28.6.3	Spannungsteiler . . . . .	426
28.6.4	Wheatstone'sche Messbrücke . . . . .	426
28.7	Messung von Stromstärke und Spannung . . . . .	427
28.7.1	Strommesser . . . . .	427
28.7.2	Spannungsmesser . . . . .	428
28.8	Elektrische Arbeit und Leistung . . . . .	429
28.8.1	Elektrische Arbeit . . . . .	429
28.8.2	Elektrische Leistung . . . . .	430
<b>29</b>	<b>Elektrisches Feld . . . . .</b>	<b>431</b>
29.1	Elektrische Ladung . . . . .	431
29.2	Elektrische Feldstärke . . . . .	432
29.2.1	Elektrisches Potenzial . . . . .	433
29.2.2	Elektrische Flussdichte . . . . .	435
29.2.3	Dielektrikum . . . . .	436
29.2.4	Feldstärke an Kugeloberflächen . . . . .	437
29.3	Kapazität . . . . .	438
29.3.1	Kondensator . . . . .	439
29.3.2	Parallelschaltung von Kondensatoren . . . . .	442
29.3.3	Reihenschaltung von Kondensatoren . . . . .	442
29.4	Kraft und Energie im elektrischen Feld . . . . .	443
29.4.1	Kraftwirkung im Feld . . . . .	443
29.4.2	Energie des Feldes . . . . .	444
29.4.3	Energiedichte . . . . .	445
29.4.4	Auf- und Entladung eines Kondensators . . . . .	445
<b>30</b>	<b>Magnetisches Feld . . . . .</b>	<b>448</b>
30.1	Dauermagnetismus (permanenter Magnetismus) . . . . .	448
30.1.1	Stabmagnet . . . . .	448
30.1.2	Magnetfeld der Erde . . . . .	448
30.2	Elektromagnetismus . . . . .	449
30.2.1	Magnetische Feldstärke . . . . .	449
30.2.2	Durchflutungsgesetz . . . . .	451
30.2.3	Magnetische Spannung . . . . .	452
30.2.4	Magnetische Flussdichte . . . . .	454
30.2.5	Magnetischer Fluss . . . . .	455
30.2.6	Stoff im magnetischen Feld . . . . .	456
30.2.7	Ferromagnetische Stoffe . . . . .	458

---

30.3	Elektromagnetische Induktion . . . . .	461
30.3.1	Induktionsgesetz . . . . .	461
30.3.2	Induktion im bewegten Leiter . . . . .	462
30.3.3	Selbstinduktion . . . . .	463
30.3.4	Schaltung von Induktivitäten . . . . .	465
30.3.5	Ein- und Ausschalten von Stromkreisen mit Induktivität . . . . .	465
30.4	Kraft und Energie im magnetischen Feld . . . . .	466
30.4.1	Kraftwirkungen im Feld . . . . .	466
30.4.2	Energie des Feldes . . . . .	472
30.4.3	Energiedichte . . . . .	473
30.4.4	Elektrische und magnetische Feldgrößen . . . . .	474
<b>31</b>	<b>Elektrische Maschinen . . . . .</b>	<b>475</b>
31.1	Generatoren . . . . .	475
31.1.1	Wechselstromgenerator . . . . .	475
31.1.2	Gleichstromgenerator . . . . .	477
31.1.3	Drehstromgenerator . . . . .	478
31.2	Motoren . . . . .	479
31.2.1	Wechselstrommotoren . . . . .	480
31.2.2	Gleichstrommotoren . . . . .	480
31.2.3	Drehstrommotoren . . . . .	481
<b>32</b>	<b>Wechselstromkreis . . . . .</b>	<b>482</b>
32.1	Effektivwerte von Strom und Spannung . . . . .	482
32.2	Wechselstromwiderstand . . . . .	483
32.2.1	Induktiver Widerstand . . . . .	483
32.2.2	Kapazitiver Widerstand . . . . .	485
32.2.3	Blindwiderstand . . . . .	486
32.2.4	Scheinwiderstand . . . . .	487
32.2.5	Phasenverschiebung . . . . .	488
32.2.6	Resonanz . . . . .	489
32.3	Wechselstromleistung . . . . .	490
32.3.1	Wirkleistung . . . . .	490
32.3.2	Blindleistung . . . . .	491
32.3.3	Scheinleistung . . . . .	492
32.4	Transformator . . . . .	493
<b>33</b>	<b>Elektrische Leitung . . . . .</b>	<b>495</b>
33.1	Stromleitung durch Festkörper . . . . .	497
33.1.1	Energiebändermodell . . . . .	497
33.1.2	Metallische Leiter . . . . .	498
33.1.3	Thermoelektrizität . . . . .	499
33.1.4	Halbleiter . . . . .	501
33.1.5	Eigenleitung . . . . .	501
33.1.6	n-Leitung . . . . .	503
33.1.7	p-Leitung . . . . .	504
33.1.8	pn-Übergang . . . . .	504

33.1.9	Bipolarer Transistor	506
33.1.10	Unipolarer Transistor	509
33.2	Stromleitung in Flüssigkeiten	510
33.2.1	Elektrolyse	510
33.2.2	Galvanische Elemente	512
33.2.3	Akkumulatoren	512
33.3	Stromleitung in Gasen	514
33.3.1	Unselbstständige Entladung	514
33.3.2	Selbstständige Entladung	515
33.3.3	Glimmentladung	515
33.3.4	Kathodenstrahlen	516
33.3.5	Kanalstrahlen	517
33.3.6	Röntgenstrahlung	517
33.4	Stromleitung im Vakuum	517
33.4.1	Energie und Geschwindigkeit freier Elektronen	517
33.4.2	Elektronenbewegung im elektrischen Querfeld	520
33.4.3	Elektronenemission aus Metallen	521
33.4.4	Elektronenröhren	524
<b>34</b>	<b>Elektrische Schwingungen und Wellen</b>	<b>527</b>
34.1	Elektromagnetische Schwingungen	527
34.1.1	Schwingkreis	527
34.1.2	Ungedämpfte elektromagnetische Schwingung	527
34.1.3	Erzeugung ungedämpfter elektromagnetischer Schwingungen	529
34.1.4	Offener Schwingkreis	529
34.1.5	Gedämpfte elektromagnetische Schwingung	530
34.2	Elektromagnetische Wellen	531
34.2.1	Elektromagnetische Welle auf einer Leitung	531
34.2.2	Freie elektromagnetische Wellen	533
34.2.3	Spektrum elektromagnetischer Wellen	535
<b>K</b>	<b>ATOM- UND KERNPHYSIK</b>	<b>537</b>
<b>35</b>	<b>Quanten</b>	<b>537</b>
35.1	Energie-Masse-Relation	537
35.2	Photon	538
35.2.1	Masse des Photons	538
35.2.2	Impuls des Photons	538
35.2.3	Compton-Effekt	539
35.3	Materiewellen	541
35.4	Unschärferelation	543
<b>36</b>	<b>Atome</b>	<b>545</b>
36.1	Aufbau und Kennzeichnung	545
36.1.1	Isotope Nuklide	546
36.1.2	Isobare Nuklide	546
36.1.3	Isotone Nuklide	547

36.2	Masse	547
36.2.1	Atommasse	547
36.2.2	Anzahl der Atome	549
36.2.3	Massendefekt	549
36.3	Kernbindungsenergie	550
36.4	Größe	551
36.4.1	Elektronenradius	551
36.4.2	Kernradius	552
36.4.3	Atomradius	552
<b>37</b>	<b>Atomhülle</b>	<b>553</b>
37.1	Bohr'sche Postulate	553
37.1.1	1. Postulat	553
37.1.2	2. Postulat	554
37.2	Wasserstoffatom	554
37.2.1	Bahngeschwindigkeit	554
37.2.2	Umlauffrequenz	555
37.2.3	Bahnradius	556
37.2.4	Energieniveau	557
37.2.5	Frequenzen der Strahlung	559
37.2.6	Wasserstoffspektrum	560
37.3	Quantenzahlen	561
37.3.1	Hauptquantenzahl $n$	561
37.3.2	Nebenquantenzahl $l$ (Drehimpulsquantenzahl)	561
37.3.3	Magnetische Quantenzahl $m$	562
37.3.4	Spinquantenzahl $s$	563
37.3.5	Besetzung der Schalen	564
37.4	Strahlungsemission	565
37.4.1	Termschema	565
37.4.2	Anregung	565
37.4.3	Metastabile Zustände	566
37.4.4	Röntgenstrahlung	567
37.5	Wellenmechanisches Atommodell	568
<b>38</b>	<b>Radioaktivität</b>	<b>570</b>
38.1	Radioaktive Umwandlung (radioaktiver Zerfall)	570
38.1.1	Stabilität des Kerns	570
38.1.2	$\alpha$ -Zerfall	571
38.1.3	$\beta$ -Zerfall	571
38.1.4	$\beta^+$ -Zerfall	572
38.1.5	$\gamma$ -Emission	573
38.2	Statistik des Zerfalls	573
38.2.1	Zerfallskonstante	573
38.2.2	Zerfallsgesetz	573
38.2.3	Halbwertszeit	574
38.2.4	Aktivität	574

38.3	Zerfallsreihen . . . . .	576
38.4	Schwächung der Kernstrahlung . . . . .	577
38.4.1	$\gamma$ -Strahlung . . . . .	577
38.4.2	$\beta$ -Strahlung . . . . .	579
38.4.3	$\alpha$ -Strahlung . . . . .	580
38.5	Dosimetrie . . . . .	581
38.5.1	Energiedosis . . . . .	581
38.5.2	Energiedosisleistung . . . . .	581
38.5.3	Ionendosis . . . . .	582
38.5.4	Äquivalentdosis . . . . .	583
38.6	Strahlenschutz . . . . .	584
38.7	Strahlennachweis . . . . .	585
<b>39</b>	<b>Künstliche Kernumwandlungen . . . . .</b>	<b>586</b>
39.1	Teilchenbeschleuniger . . . . .	586
39.2	Kernreaktionen . . . . .	586
39.3	Uranspaltung . . . . .	587
39.3.1	Kettenreaktion . . . . .	588
39.3.2	Energiebilanz . . . . .	589
39.4	Kernfusion . . . . .	589
39.5	Anwendung radioaktiver Nuklide . . . . .	590
<b>40</b>	<b>Elementarteilchen . . . . .</b>	<b>591</b>
40.1	Elementare Teilchen . . . . .	592
40.1.1	Leptonen . . . . .	592
40.1.2	Quarks . . . . .	592
40.2	Zusammengesetzte Elementarteilchen (Hadronen) . . . . .	593
40.2.1	Mesonen . . . . .	593
40.2.2	Baryonen . . . . .	594
<b>R</b>	<b>RELATIVISTISCHE MECHANIK . . . . .</b>	<b>595</b>
<b>41</b>	<b>Relativistische Mechanik . . . . .</b>	<b>595</b>
41.1	Galilei-Transformation . . . . .	595
41.1.1	Zeitkoordinaten . . . . .	596
41.1.2	Ortskoordinaten . . . . .	596
41.1.3	Geschwindigkeit . . . . .	596
41.1.4	Beschleunigung . . . . .	597
41.2	Lorentz-Transformation . . . . .	597
41.2.1	Ortskoordinaten . . . . .	598
41.2.2	Zeitkoordinaten . . . . .	598
41.3	Relativistische Kinematik . . . . .	598
41.3.1	Zeitdilatation . . . . .	598
41.3.2	Längenkontraktion . . . . .	599
41.3.3	Addition von Geschwindigkeiten . . . . .	600
41.4	Relativistische Dynamik . . . . .	601
41.4.1	Masse . . . . .	601
41.4.2	Impuls . . . . .	602

41.4.3	Kraft	603
41.4.4	Energie	603
<b>F</b>	<b>FEHLERRECHNUNG</b>	<b>605</b>
<b>42</b>	<b>Fehlerrechnung bei physikalischen Messungen</b>	<b>605</b>
42.1	Fehlerbegriff	605
42.2	Systematische Fehler	605
42.3	Zufällige Fehler	606
42.3.1	Mittelwert der Messreihe	606
42.3.2	Standardabweichung (mittlerer Fehler) der Einzelmessung	607
42.3.3	Standardabweichung (mittlerer Fehler) des Mittelwertes	608
42.4	Fehlerfortpflanzung	609
42.4.1	Mittelwert des Funktionswertes	609
42.4.2	Mittlerer Fehler des Funktionswertes	610
42.4.3	Größtfehler des Funktionswertes	611
42.4.4	Fehlerschätzung	612
42.5	Darstellung des Endergebnisses	612
<b>T</b>	<b>TABELLEN</b>	<b>614</b>
Tabelle 1a	Dichte fester Stoffe	614
Tabelle 1b	Dichte von Flüssigkeiten	616
Tabelle 1c	Normdichte gasförmiger Stoffe	616
Tabelle 2	Reibungszahlen	617
Tabelle 3	Stoßzahl	619
Tabelle 4	Kompressibilität von Flüssigkeiten	619
Tabelle 5	Luftdruck in Abhängigkeit von der Höhe	620
Tabelle 6	Dynamische Viskosität und kinematische Viskosität	621
Tabelle 7	Widerstandsbeiwert	622
Tabelle 8	Oberflächenspannung	623
Tabelle 9	Elastizitätsmodul, Schubmodul, Kompressionsmodul	624
Tabelle 10	Längenausdehnungskoeffizient fester Stoffe	625
Tabelle 11	Volumenausdehnungskoeffizient von Flüssigkeiten	627
Tabelle 12	Volumenausdehnungskoeffizient gasförmiger Stoffe	627
Tabelle 13	Luftdichte in Abhängigkeit von Druck und Temperatur	628
Tabelle 14	Spezielle Gaskonstante	628
Tabelle 15	Dichte des Wassers in Abhängigkeit von der Temperatur	629
Tabelle 16	Spezifische Wärmekapazität fester Stoffe	629
Tabelle 17	Spezifische Wärmekapazität von Flüssigkeiten	631
Tabelle 18	Spezifische Wärmekapazität von Gasen	632
Tabelle 19	Spezifischer Heizwert fester Brennstoffe	633
Tabelle 20	Spezifischer Heizwert flüssiger Brennstoffe	633
Tabelle 21	Spezifischer Heizwert gasförmiger Brennstoffe	633
Tabelle 22	Schmelztemperatur und spezifische Schmelzwärme	634
Tabelle 23	Siedetemperatur und spezifische Verdampfungswärme	637

Tabelle 24	Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Druck . . .	640
Tabelle 25	Siedetemperatur des Wassers in Abhängigkeit vom Luftdruck .	640
Tabelle 26	Sättigungsdruck . . . . .	641
Tabelle 27	Sättigungsdruck und Sättigungsmenge für Wasserdampf . . . .	641
Tabelle 28	Kryoskopische und ebullioskopische Konstante . . . . .	642
Tabelle 29	Van-der-Waals-Konstanten . . . . .	642
Tabelle 30	Kritische Temperatur und kritischer Druck . . . . .	643
Tabelle 31	Wärmeleitfähigkeit . . . . .	644
Tabelle 32	Wärmeübergangskoeffizient . . . . .	646
Tabelle 33	Wärmedurchgangskoeffizient . . . . .	647
Tabelle 34	Emissionsgrad . . . . .	648
Tabelle 35	Schallgeschwindigkeit . . . . .	650
Tabelle 36	Schalldämmmaß . . . . .	651
Tabelle 37	Lautstärkepegel . . . . .	652
Tabelle 38	Lichtgeschwindigkeit . . . . .	652
Tabelle 39	Brechzahl . . . . .	653
Tabelle 40	Grenzwinkel . . . . .	654
Tabelle 41	Polarisationswinkel . . . . .	654
Tabelle 42	Wellenlängen wichtiger Spektrallinien . . . . .	655
Tabelle 43	Hauptdispersion und Abbe'sche Zahl . . . . .	655
Tabelle 44	Gesamtlichtstrom und Lichtausbeute von Lampen . . . . .	656
Tabelle 45	Spezifischer elektrischer Widerstand . . . . .	658
Tabelle 46	Temperaturkoeffizient . . . . .	659
Tabelle 47	Permittivitätszahl . . . . .	660
Tabelle 48	Permeabilitätszahl . . . . .	661
Tabelle 49	Curie-Temperatur ferromagnetischer Stoffe . . . . .	663
Tabelle 50	Beweglichkeit von Ladungsträgern . . . . .	664
Tabelle 51	Sprungtemperatur bei Supraleitern . . . . .	665
Tabelle 52	Elektrochemisches Äquivalent . . . . .	666
Tabelle 53	Elektrochemische Spannungsreihe . . . . .	666
Tabelle 54	Ablösearbeit . . . . .	667
Tabelle 55	Elektronenanordnung bei den Elementen . . . . .	668
Tabelle 56	Chemische Elemente und ihre Isotope . . . . .	671
Tabelle 57	Halbwertszeit und Zerfallsenergie radioaktiver Isotope . . . . .	686
Tabelle 58	Schwächungskoeffizient für $\gamma$ -Strahlung . . . . .	688
Tabelle 59	Schwächungskoeffizient für $\gamma$ -Strahlung des Co-60 . . . . .	689
Tabelle 60	Halbwertsschichtdicke für $\gamma$ -Strahlung . . . . .	689
Tabelle 61	Maximale Reichweite und Halbwertsschichtdicke für $\beta$ -Strahlung in Aluminium . . . . .	689
Tabelle 62	Dosisleistungskonstante . . . . .	690
Tabelle 63	Griechische Buchstaben . . . . .	690
<b>S</b>	<b>SACHWORTVERZEICHNIS . . . . .</b>	<b>691</b>

---

# VORWORT

---

Von diesem sehr erfolgreichen „Taschenbuch der Physik“ wurden bis zu dieser **Jubiläumsausgabe** in verschiedenen Sprachen insgesamt **70 Auflagen** gedruckt.

Das Buch entstand vor etwa **50 Jahren** als „Nachschlagebuch für das Grundlagenfach Physik“, sollte Schülern und Studenten eine Hilfe bei der Ausbildung sein und später im Beruf zum Nachschlagen dienen.

Ständig aktualisiert, verbessert und erweitert wurde es so zu einem **Standardwerk** für Lernende aller Altersstufen und Fachrichtungen. Es informiert präzise und verständlich über alle Teilgebiete der Physik. An vielen Hoch- und Fachhochschulen sowie Gymnasien wird es empfohlen; in der beruflichen Praxis ist es bekannt und eingeführt.

Dieses Taschenbuch

- **hilft** Studenten und Schülern beim Erarbeiten und Wiederholen des Stoffes;
- ist **unentbehrlich** bei der Vorbereitung auf Klausuren und Prüfungen;
- **nützt** im Beruf bei der Auffrischung früher erworbenen Wissens;
- **informiert** zuverlässig über Einheiten, Naturkonstanten und Materialwerte;
- **ersetzt** kein Lehrbuch; denn quantitativ nicht erfassbare, also nur beschreibende Fakten sind nicht oder nur stichwortartig dargestellt;
- **ist viel mehr** als eine Formelsammlung, denn es enthält alle wichtigen Formeln und Gesetze, erläutert ihre Anwendung und gibt Hinweise auf Einheiten und Gültigkeitsgrenzen;
- **eignet** sich auch für Benutzer mit geringeren mathematischen Kenntnissen;
- **enthält** mehr als 500 den Text erläuternde Zeichnungen;
- **ermöglicht** schnellen Zugriff durch ein gut gegliedertes Inhaltsverzeichnis, das Daumenregister und ein umfangreiches Sachwortverzeichnis.

Für die vorliegende aktualisierte **21. Auflage** wurden erkannte Fehler beseitigt, Zahlenwerte auf den neuesten Stand gebracht, sowie neue Erkenntnisse, Bestimmungen und Festlegungen berücksichtigt. Sinnvolle Vorschläge aus dem Leserkreis wurden, soweit sie realisierbar waren, berücksichtigt. Unverändert jedoch blieb die bewährte Darstellungsform.

Seine Aufgabe, eine Brücke zwischen reiner Formelsammlung und Lehrbuch zu sein, erfüllt es vor Allem durch die didaktisch geschickte Gestaltung sowie leicht verständliche Texte und Abbildungen.

Für Anregungen, Verbesserungsvorschläge sowie Hinweise auf Fehler sind Verlag und Autor auch in Zukunft dankbar.

Dem Verlag gilt mein Dank für die stets gute Zusammenarbeit, insbesondere Herrn Dipl.-Phys. Vogelsang für seine fachkundige Hilfe bei der Entstehung des Buches, sowie besonders Herrn Dipl.-Phys. Jochen Horn für die immer verständnisvolle Unterstützung meiner Wünsche bei der weiteren Verbesserung des Buches.

Meinem Sohn, Dr. Thomas Kuchling, danke ich für die wertvolle Hilfe bei der Vorbereitung dieser Auflage.

Möge das Taschenbuch den vielen Benutzern beim Lernen, Studieren und Arbeiten auch weiterhin ein **unentbehrlicher**, sowie **zuverlässiger Helfer** und **Ratgeber** sein.

Mittweida, im August 2014

Horst Kuchling

## 16 Wärmeenergie

Wärmeenergie (meist als Wärmemenge bezeichnet) ist eine spezielle Energieform wie z. B. auch die mechanische Energie oder die elektrische Energie. Sie unterliegt wie alle Energiearten dem Gesetz von der **Erhaltung der Energie**.

Alle Energiearten sind (wenn auch zum Teil nicht restlos) ineinander umwandelbar. Zufuhr oder Abgabe von Wärmeenergie (Wärmeaustausch) ist nötig, wenn die Temperatur oder der Aggregatzustand eines Körpers verändert werden soll.

**SI-Einheit der Wärmeenergie:**  $[Q] = \text{Joule (J)}$   
 $= \text{Newtonmeter (N} \cdot \text{m)}$ .

*Ungesetzliche Einheiten:* Kalorie (cal) und Kilokalorie (kcal).

**Umrechnung:**

1 cal = 4,186 8 J	1 kcal = 10 <sup>3</sup> cal = 4 186,8 J = 4,186 8 kJ
-------------------	---

**Beachte:**

- Weitere Umrechnungen von Energie- und Arbeitseinheiten → hintere Einbandinnenseite.

### 16.1 Wärmemenge

Die zur Erwärmung eines Körpers notwendige Wärmemenge ist proportional der Masse des Körpers und der zu erzielenden Temperaturdifferenz. Der stoffabhängige Proportionalitätsfaktor wird als *spezifische Wärmekapazität*  $c \rightarrow [16.2]$  bezeichnet

Wenn

$Q$  Wärmemenge,

$c$  spezifische Wärmekapazität des zu erwärmenden Stoffes ( $\rightarrow$  Tabellen 16 und 17),

$m$  Masse des Körpers,

$\Delta t$  Temperaturdifferenz, die mit der Wärmemenge  $Q$  erzeugt wird,  
 $= t_2 - t_1 = \Delta t = \Delta T$ ,

dann gilt

$$(W 16.1) \quad Q = cm\Delta t = cm\Delta T$$

$$\text{SI} \quad \left| \begin{array}{cccc} Q & c & m & \Delta t \\ \text{J} & \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & \text{kg} & ^\circ\text{C, K} \end{array} \right|$$

bzw. in differenzieller Schreibweise

$$(W 16.2) \quad dQ = cm dt = cm dT$$

**Beachte:**

- Die spezifische Wärmekapazität  $c$  ist nicht konstant, sondern *temperaturabhängig*. Tabellenwerte sind meist auf  $20^\circ\text{C}$  bezogen.
- Bei Abkühlung ist  $\Delta t$  negativ, auch die Wärmemenge wird negativ, d. h., sie wird nicht zu-, sondern abgeführt.

### 16.1.1 Wärmeinhalt

Als *Wärmeinhalt*  $Q_i$  eines Körpers bezeichnet man die für die Erhöhung seiner Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  auf  $t$  benötigte Wärmemenge. Bei Temperaturen  $t < 0^\circ\text{C}$  ist der Wärmeinhalt negativ.

**SI-Einheit des Wärmeinhalts:**  $[Q_i] = \text{Joule (J)}$ .

*Ungesetzliche Einheiten:* Kalorie (cal) und Kilokalorie (kcal).

Wenn

$Q_i$  Wärmeinhalt des Körpers,

$c$  spezifische Wärmekapazität des zu erwärmenden Stoffes ( $\rightarrow$  Tabellen 16 und 17),

$m$  Masse des Körpers,

$t$  Celsius-Temperatur des Körpers,

dann gilt analog zu (W 16.1)

$$(W 16.3) \quad Q_i = cmt$$

$$\text{SI} \left| \begin{array}{cccc} Q & c & m & t \\ \hline \text{J} & \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} & \text{kg} & ^\circ\text{C} \end{array} \right.$$

**Beachte:**

- Bei Temperaturen  $t > 0^\circ\text{C}$  ist der Wärmeinhalt positiv, bei Temperaturen  $t < 0^\circ\text{C}$  ist der Wärmeinhalt negativ, bei  $t = 0^\circ\text{C}$  ist er null.

### 16.1.2 Wärmekapazität

Unter der *Wärmekapazität*  $C$  eines Körpers versteht man das Verhältnis der zugeführten Wärmemenge zur erzielten Temperaturerhöhung:

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad \text{oder in differenzieller Schreibweise} \quad C = \frac{dQ}{dT}.$$

Wenn

$C$  Wärmekapazität des Körpers,

$c$  spezifische Wärmekapazität des Stoffes ( $\rightarrow$  Tabellen 16 und 17),

$m$  Masse des Körpers,

dann gilt  $C = Q/\Delta T$  und mit (W 16.1)

$$C = cm \Delta T / \Delta T \quad \text{oder}$$

(W 16.4)

$$C = cm$$

$$\text{SI} \begin{array}{l} C \quad c \quad m \\ \left[ \frac{\text{J}}{\text{K}} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad \text{kg} \right] \end{array}$$

**Beachte:**

- Die Wärmekapazität  $C$  ist die zum Erwärmen des Körpers um 1 Kelvin erforderliche Wärmemenge.
- Bei nicht homogenen Körpern lässt sich die Wärmekapazität  $C$  bestimmen aus

(W 16.5)

$$C = \frac{Q}{\Delta T} = \sum c_i m_i \quad \text{oder mit (W 16.6)}$$

(W 16.5a)

$$C = c_m m$$

### 16.1.3 Wasserwert

Für die Wärmemischung fester und flüssiger Stoffe  $\rightarrow$  [16.3] verwendet man so genannte Kalorimetergefäße. Um die Wärmeverluste während der Mischung gering zu halten, sind die Gefäße meist doppelwandig und der Zwischenraum evakuiert.

Da sich die Temperatur des Gefäßes während der Mischung ändert, muss seine Wärmekapazität bei der Rechnung berücksichtigt werden. Dies geschieht in Form des Wasserwertes  $W = c_K m_K$ , der in der Mischungsgleichung (W 16.10) zur Kapazität des Wassers (oder einer anderen Flüssigkeit) im Kalorimetergefäß addiert wird. Gleiches gilt für den eintauchenden Teil des Thermometers und den Rührer.

**SI-Einheit des Wasserwertes:**  $[W] = \text{J}/\text{K}$ .

**Beachte:**

- Der Wasserwert von Gefäßen aus schlecht wärmeleitenden Materialien (Glas u. a.) ist vom Füllstand abhängig, also keine Gerätekonstante, wie etwa die Wärmekapazität, die sich auf den ganzen Körper bezieht.

## 16.2 Spezifische Wärmekapazität

Unter der *spezifischen Wärmekapazität* eines Stoffes versteht man das Verhältnis seiner Wärmekapazität zu seiner Masse:

$$c = C/m,$$

oder unter Berücksichtigung der Definition der Wärmekapazität:

Unter der *spezifischen Wärmekapazität* eines Stoffes versteht man das Verhältnis der zugeführten Wärmemenge zum Produkt aus erwärmter Masse und Temperaturdifferenz:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T},$$

oder, weil  $c$  temperaturabhängig, in differenzieller Schreibweise

$$c = \frac{dQ}{mdT}.$$

**SI-Einheit der spezifischen Wärmekapazität:**  $[c] = \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$

*Ungesetzliche* Einheit:  $\frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot \text{K}}.$

Bei einem Stoffgemisch ergibt sich die spezifische Wärmekapazität nicht als arithmetischer Mittelwert. Vielmehr müssen die Massenanteile der einzelnen Stoffe berücksichtigt werden; also

$$(W 16.6) \quad c_m = \frac{c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots}{m_1 + m_2 + \dots}$$

### Festkörper und Flüssigkeiten

Die spezifische Wärmekapazität ist *temperaturabhängig*. Tabellenwerte ( $\rightarrow$  Tabellen 16 und 17) gelten bei  $20^\circ\text{C}$ , können aber ohne größeren Fehler bei festen Körpern im Bereich von etwa  $-40^\circ\text{C}$  bis  $+100^\circ\text{C}$  und bei Flüssigkeiten etwa von  $0^\circ\text{C}$  bis  $40^\circ\text{C}$  verwendet werden.

### Gase

Es sind zwei Arten der spezifischen Wärmekapazität zu unterscheiden.

► Die zugeführte Wärmemenge  $Q$  erhöht die Temperatur, der Druck steigt, aber das Volumen bleibt konstant:  $c_V$ .

Für die Wärmemenge gilt:  $Q = c_V m \Delta t.$

- Die zugeführte Wärmemenge  $Q$  erhöht die Temperatur, der Druck bleibt konstant, aber das Gasvolumen wächst und verrichtet mechanische Arbeit:  $c_p$ .

Für die Wärmemenge gilt:  $Q = c_p m \Delta t = c_V m \Delta t + p \Delta V$ .

Wenn

$c_p$  spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck,  
 $c_V$  spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen,  
 $R_i$  spezielle Gaskonstante,  
 $p \Delta V$  Ausdehnungsarbeit (Volumenarbeit) des Gases,

dann gilt

$$c_p m \Delta t = c_V m \Delta t + p \Delta V.$$

Nach der Zustandsgleichung der Gase (W 15.16) ist

$$p \Delta V = m R_i \Delta T, \quad \text{also}$$

$c_p m \Delta t = c_V m \Delta t + m R_i \Delta T$ . Eine Division durch  $m \Delta T$  ergibt

$$c_p = c_V + R_i \quad \text{oder}$$

$$(W 16.7) \quad \boxed{c_p - c_V = R_i} \quad \text{SI} \left| \begin{array}{c} c, R_i \\ \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{array} \right.$$

- Den Quotienten aus den beiden spezifischen Wärmekapazitäten bezeichnet man mit  $\gamma$ .

$$(W 16.8) \quad \boxed{\frac{c_p}{c_V} = \gamma}$$

**Beachte:**

- Zahlenwerte für  $c_p$  und  $c_V$  → Tabelle 18!
- $\gamma$  hat für 2-atomige Gase den Wert  $\approx 1,4$ . Genaue Zahlenwerte → Tabelle 18!
- $\gamma$  ist bei einem idealen Gas gleich dem **Isentropen-** oder **Adiabatexponenten**  $\kappa$  → [18.5].
- Aus (W 16.7) folgt eine anschauliche Erklärung der Gaskonstanten: Die spezielle Gaskonstante  $R_i$  gibt an, welche mechanische Arbeit 1 Kilogramm des Gases verrichten kann, wenn es um 1 Kelvin erwärmt wird.

### 16.3 Wärmemischung

Werden zwei (oder mehrere) Körper unterschiedlicher Temperatur in Berührung gebracht, so erfolgt ein Wärmeaustausch, die Temperaturdifferenz geht gegen null, und man spricht von einer Wärmemischung. Nach dem Gesetz von der Erhaltung der Energie gibt der Körper höherer Temperatur ebenso viel Wärmeenergie ab, wie der Körper tieferer Temperatur aufnimmt.

Wenn

$c_1, m_1, t_1$  spezifische Wärmekapazität, Masse und Temperatur der Körper 1 und 2 vor der Mischung,

$c_2, m_2, t_2$  per 1 und 2 vor der Mischung,

$t_m$  gemeinsame Temperatur beider Körper nach der Mischung,

dann gilt die

#### Richmann'sche Mischungsregel

$$(W\ 16.9) \quad c_1 m_1 (t_1 - t_m) = c_2 m_2 (t_m - t_2)$$

#### Beachte:

● (W 16.9) kann statt mit  $t$  in ( $^{\circ}\text{C}$ ) auch mit  $T$  (in K) geschrieben werden.

■ Bei einem Wärmeaustausch zwischen mehr als zwei Körpern oder wenn während des Austausches auftretende Aggregatzustandsänderungen berücksichtigt werden müssen, wird (W 16.9) unübersichtlich. Folgende Mischungsregel ist besser anwendbar.

■ Die Summe der Wärmeinhalte vor der Mischung ist gleich dem Gesamtwärmeinhalt nach der Mischung.

$$(W\ 16.10) \quad c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2 + \dots = t_m (c_1 m_1 + c_2 m_2 + \dots)$$

oder, da die Wärmekapazität  $C = cm$  (W 16.4)

$$(W\ 16.11) \quad C_1 t_1 + C_2 t_2 + \dots = t_m (C_1 + C_2 + \dots)$$

#### Beachte:

● (W 16.10) und (W 16.11) können statt mit  $t$  (in  $^{\circ}\text{C}$ ) auch mit  $T$  (in K) geschrieben werden.

- Alle an der Mischung beteiligten Körper einschließlich Gefäße (z. B. Wasserwert des Kalorimeters) sind zu berücksichtigen → [16.1.3].
- Wenn sich während der Mischung der Aggregatzustand eines Körpers ändert, muss die frei werdende Wärmemenge auf der linken Seite der Gleichung addiert bzw. die aufgenommene Wärmemenge subtrahiert werden.
- Mit (W 16.10) und (W 16.11) können spezifische Wärmekapazitäten, Mischtemperaturen und auch Wärmekapazitäten bzw. Wasserwerte bestimmt werden.

**W**

## 16.4 Wärmequellen

Nach dem Energieerhaltungsgesetz kann die Wärmeenergie immer nur durch Umwandlung aus anderen Energiearten entstehen. Diese können sein: mechanische Energie, elektrische Energie, chemische Energie, Strahlungsenergie, Kernenergie u. a.

### Gesetz von der Erhaltung der Energie:

Energie kann nicht verloren gehen und auch nicht aus nichts entstehen. Wärme und die anderen Energiearten sind gleichwertige Energieformen und ineinander (allerdings z. T. nicht restlos) umwandelbar.

### 16.4.1 Sonnenenergie

Die Sonne strahlt ständig in alle Richtungen eine Gesamtleistung von  $P \approx 3,9 \cdot 10^{26} \text{ W}$  ab → [20.5]. Ein sehr kleiner Teil davon erreicht die Erde. Die je Quadratmeter auftreffende Leistung wird ausgedrückt durch die

$$(W 16.12) \quad \text{Solarkonstante} = 1,37 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$$

#### Beachte:

- Der angegebene Zahlenwert gilt für senkrechten Strahleneinfall und bei Vernachlässigung der Schwächung beim Durchlaufen der Atmosphäre. Er ist ein langjähriger Mittelwert.

### 16.4.2 Verbrennungsenergie

Bei der Verbrennung (Oxidation) wird Wärmeenergie frei.

Unter dem spezifischen *Heizwert*  $H$  versteht man das Verhältnis der bei der Verbrennung frei werdenden Wärmemenge zur Masse des verbrannten festen oder flüssigen Brennstoffes:

$$H = \frac{Q}{m}.$$

Wenn

$H$  spezifischer Heizwert eines festen oder flüssigen Brennstoffes ( $\rightarrow$  Tabellen 19 und 20),

$m$  Masse des vollkommen verbrannten Stoffes,

$Q$  freigesetzte Wärmemenge (entstandenes Wasser in Dampfform),

dann gilt

$$(W\ 16.13) \quad \boxed{Q = mH} \quad \text{SI} \left[ \begin{array}{c} Q \quad m \quad H \\ \text{J} \quad \text{kg} \quad \frac{\text{J}}{\text{kg}} \end{array} \right]$$

#### **Beachte:**

- Früher wurde der spezifische Heizwert als „unterer Heizwert  $H_u$ “ bezeichnet, im Gegensatz zum „oberen Heizwert  $H_o$ “ (jetzt spezifischer Brennwert oder Verbrennungswärme), der um die zur Verdampfung des entstehenden Wassers nötige Wärmemenge größer ist.

Physik und Technik rechnen mit dem spezifischen Heizwert  $H$ , die Chemie dagegen mit dem spezifischen Brennwert.

- Bei gasförmigen Brennstoffen bezieht man den spezifischen Heizwert  $H$  auf das Normvolumen  $V_n$ , also auf das Volumen bei  $p_n = 101,325 \text{ kPa}$  und  $T_n = T_0 = 273,15 \text{ K} \hat{=} 0^\circ\text{C}$ .

Wenn

$H'$  spezifischer Heizwert eines gasförmigen Brennstoffes ( $\rightarrow$  Tabelle 21),

$V_n$  Volumen des vollständig verbrannten Gases im Normzustand = Normvolumen,

$Q$  frei werdende Wärmemenge (entstandenes Wasser in Dampfform),

dann gilt

$$(W\ 16.14) \quad \boxed{Q = V_n H'} \quad \text{SI} \left[ \begin{array}{c} Q \quad V \quad H' \\ \text{J} \quad \text{m}^3 \quad \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \end{array} \right]$$

### 16.4.3 Elektrische Energie

In jedem stromdurchflossenen Leiter entsteht Wärme. Die Umwandlung von elektrischer Energie in Wärmeenergie geschieht restlos, also verlustfrei, jedoch nicht umgekehrt.

Wenn

$Q$  entstehende Wärmeenergie,

$U$  elektrische Spannung,

$I$  elektrische Stromstärke,

$R$  elektrischer Widerstand,

$t$  Dauer des Stromflusses,

dann gilt

$$(W 16.15) \quad Q = UIt = I^2 R t = \frac{U^2 t}{R} \quad \text{SI} \quad \left| \begin{array}{cccccc} U & I & R & t & Q & \\ \hline \text{V} & \text{A} & \Omega & \text{s} & \text{J} & = \text{W} \cdot \text{s} \end{array} \right.$$

#### Beachte:

- Da alle Energieformen *gleichwertig* sind, wird im SI für alle die gleiche Einheit Joule (J) verwendet. **Überflüssig** ist damit das früher benutzte

**Elektrische Wärmeäquivalent:**  $1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ W} \cdot \text{s}$   
oder  $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$ .

- Umrechnung von Energie- und Arbeitseinheiten → hintere Einbandinnenseite.

### 16.4.4 Mechanische Energie

Mechanische Energie lässt sich (z. B. durch Reibung) restlos, d. h. verlustfrei, in Wärmeenergie umwandeln, jedoch nicht umgekehrt.

Wenn

$\Delta E_k$  Abnahme der kinetischen Energie,

$\Delta E_p$  Abnahme der potenziellen Energie,

$Q$  frei werdende Wärmeenergie,

dann gilt

$$(W 16.16) \quad Q = \Delta E_k + \Delta E_p \quad \text{SI} \quad \left| \begin{array}{c} Q, E \\ \hline \text{J} \end{array} \right.$$

**Beachte:**

- Wärme- und mechanische Energie sind *gleichwertig* und werden im SI in der gleichen Einheit Joule (J) angegeben. **Überflüssig** ist damit das früher benutzte  
**Mechanische Wärmeäquivalent:**  $1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$ .
- Umrechnung von Energie- und Arbeitseinheiten → hintere Einbandinnenseite.

## A

- ABBE'sche Zahl 390, 655  
Abbildungsfehler 375  
Abbildungsgesetz 373  
Abbildungsgleichung 373  
Abbildungsmaßstab 373  
Aberration, chromatische 375  
abgeleitete Größenart 26  
Abklingkoeffizient 206, 530  
Abklingzeit 209  
Ablösearbeit 499, 522, 667  
absolute Feuchte 278  
Absorption 182, 328, 577  
Absorptionsgesetz 578  
Absorptionsgrad 328  
Absorptionsspektrum 388 f.  
Achse, freie 129  
–, parallele 130  
Adhäsion 176  
Adhäsionskraft 176  
Adiabate 291  
Adiabatexponent 263  
Adsorption 177  
Aggregatzustand 269  
Aggregatzustandsänderung 269  
Ähnlichkeitsgesetz 175  
Akkommodation 379  
Akkumulator 512  
Aktivität, optische 402  
–, spezifische 576  
Akzeptor 504  
allgemeine Gaskonstante 257 f.  
 $\alpha$ -Strahlung 570  
Ampere, Definition 416  
Amplitude 192  
Amplitudenverhältnis 208  
Analysator 399  
ANDREWS-Diagramm 281  
Anion 510  
anisotrop 400  
Anode 510  
Anodenstrom 524  
Anregung 565  
–, elektrische 566  
–, Foto- 566  
–, thermische 566  
Anstieg 64  
Antibaryon 594  
Antineutrino 572  
Antiquark 593  
Antiteilchen 591  
Antrieb 118  
Antriebsmoment 139  
aperiodische Bewegung 210  
aperiodischer Grenzfall 210, 212  
Apertur, numerische 398  
Äquipartitionsprinzip 316  
Äquivalentdosis 583  
Äquivalentdosisleistung 584  
Äquivalenz von Energie und Masse  
604  
Arbeit 106  
– bei der Rotation 135  
–, elektrische 429  
– im Gravitationsfeld 144  
Archimedisches Prinzip 154  
arithmetischer Mittelwert 607  
astronomisches Fernrohr 383  
Asynchronmotor 481  
atomare Masseneinheit 547  
Atommasse 547  
–, relative 547  
Atomradius 552  
Aufenthaltswahrscheinlichkeit 569  
Auflösungsgrenze 397  
– des Auges 398  
– des Fernrohres 398  
– eines Mikroskops 398

- Auflösungsvermögen, des Auges 380  
 – optischer Geräte 397  
 Auftrieb 153  
 – in Gasen 160  
 Auftriebskraft 153  
 Auge 379  
 –, Auflösungsvermögen 380  
 Ausbreitungsgeschwindigkeit 533  
 Ausdehnung, der Gase 248  
 – fester Körper 244  
 – von Flüssigkeiten 247  
 äußerer fotoelektrischer Effekt 523  
 Ausfluss aus Gefäßen 161  
 Ausflusszahl 162  
 Auslenkung 192  
 Auslöschung 236, 346, 392  
 Ausschaltvorgang 466  
 Ausstrahlung, spezifische 405  
 Austrittsarbeit 499, 522  
 AVOGADRO-Konstante 309  
 axialer Vektor 60
- B**
- Bahngeschwindigkeit 83, 554  
 Bahngleichung des waagerechten Wurfs 80  
 Bandenspektrum 389  
 BARKHAUSEN-Gleichung 526  
 Barometer 159  
 barometrische Höhenformel 158  
 Baryon 594  
 Basis 506  
 Basiseinheit 37  
 Basisgrößenart 26  
 Basisschaltung 507  
 Basisstrom 507 f.  
 Beleuchtungsstärke 412  
 –, Messung 415  
 –, natürliche 413  
 Belichtung 413  
 Belichtungszeitenreihe 379  
 BERNOULLI, Gesetz von 164  
 BERNOULLI'sche Gleichung 165  
 Berührungsspannung 499  
 Beschleunigung 195  
 –, konstante 70  
 –, mittlere 76  
 Beschleunigungsarbeit 109, 113  
 Bestrahlung 404  
 Bestrahlungsstärke 405  
 Bestrahlungsverfahren 590  
 $\beta$ -Strahlung 570  
 $\beta^+$ -Strahlung 570  
 Betatron 586  
 $\beta^+$ -Zerfall 572  
 Beugung 237, 393  
 – am Doppelspalt 395  
 – am engen Spalt 394  
 – an kreisförmiger Öffnung 396  
 Beugungsgitter 395  
 Beugungsspektrum 396  
 Beweglichkeit, von Ladungsträgern 496, 664  
 Bewegung, aperiodische 210  
 –, krummlinige 95  
 –, Parallelogramm 79  
 –, zusammengesetzte 79  
 Bewegungsgröße 117  
 Bezugsschalldruck 352  
 Bezugsschallintensität 352  
 Bild, reelles 364  
 –, virtuelles 362  
 Bildfeldwölbung 376  
 Binnendruck 280  
 bipolarer Transistor 506  
 Bleiakkumulator 512  
 Blende 378  
 Blendenreihe 378  
 Blendenzahl 378  
 Blindleistung 491  
 Blindwiderstand 483, 486  
 BOHR'scher Radius 556  
 BOHR'sches Postulat 553  
 –, 1. 553  
 –, 2. 554  
 BOLTZMANN-Beziehung 307  
 BOLTZMANN-Konstante 310  
 BOURDON'sche Röhre 157  
 BOYLE-MARIOTTE, Gesetz von 156, 249

- BRAUN'sche Röhre 516  
 Brechung 236, 365  
 Brechungsgesetz 237, 365  
 Brechungswinkel 365  
 Brechwert 370  
 Brechzahl 365, 653  
 Bremsstrahlung 517, 567  
 Brennpunkt 362  
 Brennpunktstrahl 363, 372  
 Brennweite 362  
 Brennwert, spezifischer 266  
 BREWSTER'sches Gesetz 399  
 BRINELL-Verfahren 191  
 BROWN'sche Bewegung 180
- C**
- Candela 408  
 CARNOT-Prozess 300  
 CARNOT'scher Kreisprozess 299  
 ČERENKOV-Strahlung 345  
 charakteristische Strahlung 517, 567  
 Chemolumineszenz 386  
 chromatische Aberration 375  
 chromatische Tonleiter 336  
 COMPTON-Effekt 539, 577  
 COMPTON-Wellenlänge 541  
 CORIOLIS-Beschleunigung 126  
 CORIOLIS-Kraft 125 f.  
 COULOMB'sches Gesetz 443  
 CURIE-Temperatur 458, 663
- D**
- Dampf 275  
 –, gesättigter 275  
 –, überhitzter 276  
 –, ungesättigter 276  
 Dämpfung 205  
 Dämpfungskonstante 206  
 Dämpfungsverhältnis 208  
 Dauermagnetismus 448  
 Defektelektron 502  
 Dehnung 184  
 Dehnungsgröße 185  
 Dehnungszahl 185  
 Dekrement, logarithmisches 209  
 diamagnetisch 458  
 Diaprojektor 377  
 Diaskop 377  
 Dichroismus 401  
 Dichte 101, 614 f.  
 –, Berechnung 254  
 – des Wassers 629  
 – fester Körper 154  
 –, mittlere 102  
 –, Umrechnung 254  
 – von Flüssigkeiten 155  
 Dichteänderung 248  
 Dielektrikum 436, 439  
 Dielektrizitätskonstante 437  
 Differenzialflaschenzug 63  
 diffuse Strahlen 360  
 Dimension 28  
 Diode 505, 524  
 Dioptrie 371  
 Dipol 529  
 disperses System 181  
 Dispersion 390  
 –, Haupt- 655  
 Dissonanz 338  
 Dissoziation 510  
 divergente Strahlen 360  
 Donator 503  
 Doppel-T-Anker 478  
 DOPPLER-Effekt 342  
 Dosimetrie 581  
 Dosisgrenzwert 584  
 Dosisleistungskonstante 584, 690  
 Dotierung 503  
 Drall 138  
 Drehbewegung 84  
 Dreheiseninstrument 427  
 Drehfeld 481  
 Drehimpuls 138  
 Drehimpulserhaltungssatz 140  
 Drehimpulsquantenzahl 561  
 Drehmasse 129  
 Drehmoment 59  
 Drehmomentenstoß 139  
 Drehschwingung 199  
 Drehspulinstrument 427  
 Drehstrom 478  
 Drehstromgenerator 478

- Drehstrommotor 481  
 Drehung, spezifische 403  
 Drehwinkel 85  
 Drehzahl 86  
 –, kritische 217  
 –, mittlere 92  
 Dreieckschaltung 478  
 Dreiphasenstrom 478  
 Dreipolröhre 525  
 Driftgeschwindigkeit 498  
 Drillung 189  
 Drillwinkel 190  
 dritte astronautische Geschwindigkeit 147  
 drittes NEWTON'sches Axiom 101  
 Drossel 515  
 Druck, dynamischer 163  
 –, hydrostatischer 152  
 – in Flüssigkeiten 151  
 – in Strömungen 163  
 –, kritischer 281, 643  
 –, statischer 163, 165  
 Druckänderung 250  
 Durchflussgleichung 163  
 Durchflutung 451  
 Durchflutungsgesetz 451  
 Durchgriff 525  
 Durchlassstrom 505  
 Durchschnittsbeschleunigung 76  
 Durchschnittsgeschwindigkeit 72 f., 75  
 Durchschnittsleistung 115  
 Durchschnittswinkelgeschwindigkeit 89 f.  
 Durchstrahlungsverfahren 590  
 Dynamik 98  
 – der Drehbewegung 124  
 –, Grundgesetz 99  
 –, relativistische 601  
 – starrer Körper 124  
 dynamische Viskosität 168, 621 f.  
 dynamischer Druck 163  
 dynamisches Gleichgewicht 106  
 dynamisches Grundgesetz, der Rotation 126  
 Dynamometer 104
- E**  
 Ebene, geneigte 63  
 ebullioskopische Konstante 273, 642  
 echte Lösung 181  
 Effekt, äußerer fotoelektrischer 523  
 –, lichtelektrischer 539  
 Effektivwert 482  
 Eigendiffusion 181  
 Eigenfrequenz 209  
 Eigeninduktivität 464  
 Eigenkreisfrequenz 528, 530  
 Eigenleitung 501  
 Einfallswinkel 361, 365  
 eingeprägte Kraft 101  
 Einschaltvorgang 466  
 EINSTEIN'sche Gleichung 537  
 Einzelmessung, Standardabweichung 607  
 elastischer Stoß 119  
 Elastizität 184  
 Elastizitätsmodul 185, 624 f.  
 elektrische Anregung 566  
 elektrische Arbeit 429  
 elektrische Elementarladung 417  
 elektrische Energie 267  
 elektrische Feldkonstante 436  
 elektrische Feldstärke 432  
 elektrische Flussdichte 435  
 elektrische Kraftlinie 432  
 elektrische Ladung 416, 431  
 elektrische Leistung 430  
 elektrische Leitfähigkeit 420  
 elektrische Leitung 495  
 elektrische Maschine 475  
 elektrische Spannung 417  
 elektrische Stromstärke 416  
 elektrischer Leitwert 419  
 elektrischer Widerstand 418  
 elektrisches Feld 431  
 –, Energie 444  
 –, Kraftwirkung 443  
 elektrisches Potenzial 433  
 elektrisches Wärmeäquivalent 267  
 elektrochemische Spannungsreihe 512, 666

- elektrochemisches Äquivalent 511, 666  
 Elektrolumineszenz 386  
 Elektrolyse 510  
 Elektrolyt 510  
 elektromagnetische Induktion 461  
 elektromagnetische Schwingungen 527  
 –, gedämpfte 530  
 –, ungedämpfte 527  
 elektromagnetische Wellen 531  
 –, freie 533  
 –, Spektrum 535  
 Elektromagnetismus 449  
 Elektrometer 431  
 Elektron, freies 416, 517  
 Elektronenanordnung 668 ff.  
 Elektronenbewegung 520  
 Elektronenemission 521  
 –, thermische 522  
 Elektronengas 498  
 Elektronenradius, klassischer 551  
 Elektronenröhre 524  
 Elektronvolt 433  
 Elektrostriktion 359  
 Element, galvanisches 512  
 Elementarladung, elektrische 417  
 Elementarteilchen 591 f.  
 –, zusammengesetzte 593  
 Elongation 192, 194, 207, 214, 231  
 Emission 329  
 –,  $\gamma$ - 573  
 –, induzierte 567  
 –, spontane 566  
 Emissionsgrad 329, 648 f.  
 Emissionsspektrum 388  
 Emitter 506  
 Emitterschaltung 508  
 Emitterstrom 507  
 EMK 417  
 Emulsion 183  
 Endergebnis, Darstellung 612  
 Energie 111  
 – der Bewegung 113  
 – des Feldes 444, 472  
 –, elektrische 267  
 –, innere 286, 317  
 –, kinetische 113, 558  
 –, kinetische, eines Moleküls 315  
 –, mittlere kinetische 315  
 –, potenzielle 111, 557  
 –, wahrscheinlichste 315  
 Energiebändermodell 497  
 Energiedichte 238, 445, 473, 535  
 Energiedosis 581  
 Energiedosisleistung 581  
 Energieerhaltungssatz der Mechanik 114  
 Energie-Masse-Relation 537  
 Energieniveau 497, 558  
 Energiestrom 238  
 Enthalpie 287  
 Entladen 446  
 Entladung 514  
 –, selbstständige 515  
 –, unselbstständige 514  
 Entropie 304 f.  
 – des idealen Gases 306  
 – und Wahrscheinlichkeit 307  
 Entropieänderung 305  
 – des idealen Gases 307  
 Entropiedifferenz 305  
 Episkop 377  
 Erdbeschleunigung 77, 100  
 Erde, Magnetfeld 448  
 Erdfernrohr 384  
 Ersatzkraft 55  
 Ersatzmasse 133  
 Erstarren 269  
 erste astronautische Geschwindigkeit 144  
 erstes NEWTON'sches Axiom 98  
 erzwungene Schwingungen 213  
 Exzentrizität, numerische 148
- ## F
- Führungskraft 101  
 Fahrwiderstand 105  
 Fahrwiderstandszahl 105  
 Fall, freier 77  
 Fallbeschleunigung 77, 100, 142  
 FARADAY-Effekt 403

- FARADAY-Konstante 511  
 FARADAY'sches Gesetz, 1. 511  
 –, 2. 511  
 Farben dünner Schichten 391  
 Farbfehler 375  
 Farbmischung 387  
 –, additive 387  
 –, subtraktive 388  
 Farbtemperatur 332  
 Federkonstante 103  
 Federkraft 103  
 Federschwingungen, lineare 198  
 Federwaage 104  
 Fehler, mittlerer (quadratischer) 607  
 –, mittlerer, des Funktionswertes 610  
 –, mittlerer, des Mittelwertes 608  
 –, sphärischer 376  
 –, systematischer 605  
 –, zufälliger 605 f.  
 Fehlerbegriff 605  
 Fehlerfortpflanzung 609  
 Fehlerfortpflanzungsgesetz, lineares 611  
 –, quadratisches 610  
 Fehlergrenze 611  
 Fehlerrechnung 605  
 Fehlerschätzung 612  
 Feld, elektrisches 431  
 –, elektrisches, Energie 444  
 –, elektrisches, Kraftwirkung 443  
 –, magnetisches 448  
 –, magnetisches, Energie 472  
 –, magnetisches, Kraftwirkung 466  
 Feldeffekt-Transistor 509  
 Feldkonstante, elektrische 436  
 –, magnetische 454  
 Feldlinie 432  
 Feldstärke, elektrische 432  
 –, magnetische 449  
 Feldstecher 384  
 Fernpunkt 379  
 Fernrohr 383  
 –, astronomisches 383  
 –, Erd- 384  
 –, GALILEI'sches 385  
 –, holländisches 385  
 –, KEPLER'sches 383  
 –, terrestrisches 384  
 ferromagnetisch 458  
 feste Rolle 62  
 fester Körper, Dichte 154  
 Feuchte, absolute 278  
 –, maximale 278  
 –, relative 278  
 Fläche, Einheit 51  
 –, scheinbare 409  
 Flächenänderung 245  
 Flächenladungsdichte 435  
 Flächenwellen 230  
 Flankenkraft 64  
 Flaschenzug 62  
 Fliehkraft 125  
 Fluchtgeschwindigkeit 146  
 Fluidität 169  
 Fluoreszenz 386  
 Fluss, magnetischer 455  
 Flussdichte, elektrische 435  
 –, magnetische 454, 456  
 Flüssigkeit, Dichte 155  
 –, Druck 151  
 –, ideale 161  
 –, ruhende 150  
 Flüssigkeitsschwingungen 203  
 Flüssigkeitsthermometer 243  
 Formelzeichen 27  
 Fotoanregung 566  
 Fotoapparat 378  
 Fotodiode 506  
 Fotoeffekt 577  
 –, innerer 503  
 fotoelektrischer Effekt, äußerer 523  
 Fotoelement 506  
 Fotoemission 523  
 Fotometer 414  
 Fotometrie 406  
 fotometrisches Strahlungsäquivalent 407  
 FOURIER-Analyse 220  
 FRAUNHOFER'sche Linien 389  
 freie Achse 129  
 freie Schwingungen 213

- freier Fall 77  
 freier Vektor 60  
 freies Elektron 416, 517  
 Freiheitsgrad 316  
 Fremddiffusion 181  
 Frequenz 193, 222  
 Frequenzbedingung 554  
 Fundamentalschwingungen 227  
 Funktionswert, Größtfehler 611  
 –, Mittelwert 609
- G**
- GALILEI'sches Fernrohr 385  
 GALILEI-Transformation 595  
 galvanisches Element 512  
 Galvanometer 427  
 $\gamma$ -Emission 573  
 $\gamma$ -Strahlung 570  
 Gas, ideales 248  
 –, ideales, Entropie 306  
 –, ideales, Entropieänderung 307  
 –, ideales, Zustandsgleichung 252  
 –, reales 280  
 –, reales, Zustandsgleichung 280  
 –, ruhendes 156  
 –, Verflüssigung 282  
 Gasdichte 253  
 Gasdruck 311  
 Gasgemisch 255  
 Gasgesetz 252  
 Gaskonstante, allgemeine 257 f.  
 –, mittlere 255  
 –, spezielle 253, 628  
 GAUSS'sche Normalverteilung 607  
 gedämpfte Schwingungen 192, 205  
 Gefälle 64  
 Gefäß, Ausfluss 161  
 –, verbundenes 150  
 GEIGER-MÜLLER-Zählrohr 585  
 gekoppelte Schwingungen 226  
 Gel 183  
 geneigte Ebene 63  
 Generator 475  
 Geräusch 333  
 Gesamtdruck 166  
 Gesamtlichtstrom 656 f.  
 –, Messung 415  
 Gesamtwirkungsgrad 117  
 Geschwindigkeit 69, 195  
 –, dritte astronautische 147  
 –, erste astronautische 144  
 –, kritische 173  
 –, Mittelwert 314  
 –, mittlere 72 f., 75  
 –, mittlere quadratische 314  
 –, wahrscheinlichste 313  
 –, zweite astronautische 146  
 Geschwindigkeitsgefälle 168  
 Geschwindigkeitsgradient 168  
 Gesetz, 1. FARADAY'sches 511  
 –, 1. KIRCHHOFF'sches 424  
 –, 2. FARADAY'sches 511  
 –, 2. KIRCHHOFF'sches 423  
 –, BREWSTER'sches 399  
 –, COULOMB'sches 443  
 –, HOOKE'sches 103, 185  
 –, KIRCHHOFF'sches Strahlungs- 329  
 –, OHM'sches 419  
 –, POISSON'sches 292  
 –, STOKES'sches 172  
 –, Strahlungsgesetz von PLANCK 331  
 –, Strahlungsgesetz von STEFAN und  
 BOLTZMANN 330  
 –, Verschiebungsgesetz von WIEN  
 332  
 – von BERNOULLI 164  
 – von BOYLE-MARIOTTE 156, 249  
 – von DALTON 277  
 – von der Erhaltung der Energie  
 113, 265  
 – von der Erhaltung der Masse 604  
 – von GAY-LUSSAC 250 f.  
 – von HAGEN-POISEUILLE 171  
 –, WIEDEMANN-FRANZ-LORENZ'sches  
 324  
 gesetzliche Einheit 39  
 Gewicht 100  
 –, spezifisches 102  
 Gewichtskraft 65, 100, 140  
 Gitterkonstante 395  
 gleichförmige Rotation 87

- gleichförmige Translation 69  
 Gleichgewicht 65  
 –, dynamisches 106  
 Gleichgewichtsart 67  
 Gleichgewichtsbedingung 60  
 gleichmäßig beschleunigte Rotation 87  
 gleichmäßig beschleunigte Translation 70  
 Gleichspannung, pulsierende 477  
 Gleichstromgenerator 477  
 Gleichstrommotor 480  
 Gleichung physikalischer Größen 34  
 Gleichverteilungssatz 316  
 Gleitmodul 188  
 Gleitreibung 104  
 Glimmentladung 515  
 Goldene Regel der Mechanik 61  
 Grad Celsius 242  
 Grad Fahrenheit 242  
 Gravitation 140  
 Gravitationsfeld 143  
 –, Arbeit 144  
 Gravitationsgesetz 141  
 Grenzfall, aperiodischer 210, 212  
 Grenzfrequenz 567  
 Grenzwinkel 366, 654  
 Größe, lichttechnische 406  
 –, physikalische 26  
 –, skalare 28  
 –, strahlungsphysikalische 404  
 –, vektorielle 29  
 Größenart, abgeleitete 26  
 Größengleichung 34  
 –, zugeschnittene 34  
 Größtfehler des Funktionswertes 611  
 Grundfarbe 387  
 Grundgesetz der Dynamik 99  
 Gütefaktor 217
- H**
- Haarhygrometer 279  
 Haarröhrchen 179  
 Hadron 593  
 Haftreibung 104  
 HAGEN-POISEUILLE, Gesetz von 171  
 Halbleiter 501  
 Halbschatten 360  
 Halbwertshöhe 158  
 Halbwertsschicht 580  
 Halbwertsschichtdicke 578, 689  
 Halbwertszeit 209, 574, 686 f.  
 HALL-Effekt 471  
 HALL-Spannung 471  
 Hangabtriebskraft 63  
 harmonische Schwingungen 192  
 harmonische Tonleiter 336  
 Härte 190  
 Härteskala nach MOHS 190  
 Hauptdispersion 655  
 Hauptebene 369, 374  
 Hauptmaximum 394  
 Hauptquantenzahl 561  
 Hauptsatz, 1. 284  
 –, 2. 303, 306  
 Hauptschlussmaschine 478  
 Hauptschlussmotor 481  
 Hauptstrahl 363, 372  
 Hauptträgheitsachse 129  
 Hebel 61  
 Hebelgesetz 61  
 Hefnerkerze 408  
 HEISENBERG'sche Unschärferelation 544  
 Heizwert, spezifischer 266, 633  
 Hellempfindlichkeitsgrad, spektraler 406  
 Hitzdrahtinstrument 427  
 Höhenformel, barometrische 158  
 –, internationale 159  
 Hohlspiegel 362  
 holländisches Fernrohr 385  
 HOOKE'sches Gesetz 103, 185  
 HÖPPLER-Viskosimeter 172  
 Hörbereich 333  
 hören 354  
 Hörfläche 354  
 Hörschwelle 354  
 Hubarbeit 108, 112  
 HUYGENS'sches Prinzip 229  
 hydrostatische Waage 154

hydrostatischer Druck 152  
 Hyperschall 333  
 Hysterese 459  
**I**  
 ideale Flüssigkeit 161  
 ideale Strömung 161  
 ideales Gas 248  
 –, Entropie 306  
 –, Entropieänderung 307  
 –, Zustandsgleichung 252  
 Impuls 117  
 –, relativistischer 603  
 Impulserhaltungssatz 119  
 Impulssatz 119  
 Indikatormethode 590  
 Induktion, elektromagnetische 461  
 Induktionsgesetz 461  
 induktiver Widerstand 483  
 Induktivität 464  
 –, Schaltung 465  
 induzierte Emission 567  
 Inertialsystem 595  
 Influenz 431  
 Infraschall 333  
 Innenpolmaschine 477  
 Innenwiderstand 421, 525  
 innere Energie 286, 317  
 innerer Spannungsabfall 422  
 Intensität 239  
 Intensitätsmaximum 394 f.  
 Intensitätsminimum 394 f.  
 Interferenz 235, 391  
 internationale Höhenformel 159  
 internationale Stimmung 337  
 Internationales Einheitensystem 37  
 Intervall 338  
 Inversionstemperatur 283  
 Ion 510  
 Ionendosis 582  
 Ionisationskammer 585  
 Ionisierungsenergie 561  
 irreversibel 304  
 irreversibler Prozess 303  
 Isentrope 291, 293

isentrope Volumenänderungsarbeit  
   293  
 isentrope Zustandsänderung 291  
 Isentropenexponent 263, 292  
 Isobare 288, 546  
 isobare Zustandsänderung 288  
 isobares Nuklid 546  
 isochore Zustandsänderung 287  
 Isochromaten 401  
 Isotherme 289  
 isotherme Volumenänderungsarbeit  
   289  
 isotherme Zustandsänderung 289  
 Isotone 547  
 isotones Nuklid 547  
 Isotop 546, 671–685  
 –, Halbwertszeit 686 f.  
 –, Zerfallsenergie 686 f.  
 isotopes Nuklid 546

**J**

JOULE-THOMSON-Effekt 283

**K**

Kalorimetergefäß 261  
 Kältemaschine 302  
 –, Leistungszahl 302  
 –, Prinzip 303  
 Kältemischung 272  
 Kamera 378  
 Kammerton 337  
 Kanalstrahlen 517  
 Kapazität 438  
 kapazitiver Widerstand 485  
 Kapillare 179  
 Kapillarität 179  
 Kathode 510  
 Kathodenstrahlen 516  
 Kation 510  
 Keil 64  
 Kelvin, Definition 278  
 Kennlinie 508  
 KEPLER'sches Fernrohr 383  
 KEPLER'sches Gesetz, 1. 147  
 –, 2. 147  
 –, 3. 147

- Kernbindungsenergie 550  
Kernfusion 589  
Kernradius 552  
Kernreaktion 586  
Kernschatten 360  
Kernspurenemulsion 585  
Kernstrahlung 570  
Kernumwandlung, künstliche 586  
KERR-Effekt 400, 402  
Kettenreaktion 588  
Kilogramm, Definition 54  
Kinematik, relativistische 598  
kinematische Viskosität 169, 621 f.  
kinetische Energie 113, 315, 558  
– eines Moleküls 315  
–, mittlere 315  
Kippkante 67  
Kippmoment 67  
KIRCHHOFF'sches Gesetz, 1. 424  
–, 2. 423  
KIRCHHOFF'sches Strahlungsgesetz 329  
Klang 333  
klassischer Elektronenradius 551  
Klemmenspannung 422  
Knall 333  
Knotenpunktsatz 424  
Koerzitivfeldstärke 459  
Kohäsion 176  
Kohäsionskraft 176  
Kolbendruck 151  
Kollektor 478, 506  
Kollektorstrom 507  
Kolloid 182  
kolloiddisperses System 182  
kolloide Lösung 182  
Kommutator 477  
Komplementärfarbe 387  
Kompressibilität 188, 619  
Kompression 187  
Kompressionsmodul 187, 624 f.  
Kondensator 439  
–, Parallelschaltung 442  
–, Reihenschaltung 442  
Kondensieren 272  
Kondensator 377  
Konkavlinse 370  
Konkavspiegel 362  
Konsonanz 338  
kontinuierliches Spektrum 388  
Kontinuitätsgleichung 163  
Konvektion 321  
konvergente Strahlen 360  
Konvexlinse 369  
Konvexspiegel 364  
Konzentration 182  
Kopplungsgrad 228  
Korkenzieherregel 449  
Körper, schwarzer 329  
Körperfarbe 388  
korpuskulardisperses System 182  
Kovolumen 280  
Kraft 99  
–, eingeprägte 101  
–, parallele 57  
–, relativistische 603  
–, Zusammensetzen 55  
Krafteck 56  
Kräftepaar 59  
Kräftepolygon 56  
Kräftezug 56  
Kraftgesetz, lineares 197  
Kraftlinie, elektrische 432  
Kraftmesser 104  
Kraftstoß 117  
Kraftwirkung, im Feld 443, 466  
Kreisbahngeschwindigkeit 144  
Kreisfrequenz 193, 476  
Kreisprozess 298  
–, CARNOT'scher 299  
Kriechfall 210, 212  
kritische Drehzahl 217  
kritische Geschwindigkeit 173  
kritische Masse 588  
kritische Temperatur 643  
kritischer Druck 643  
krummlinige Bewegung 95  
kryoskopische Konstante 270, 642  
Kupplungsvorgang 140  
Kurven gleicher Lautstärke 356  
Kurzsichtigkeit 380

**L**

Laden 446  
 Ladung, elektrische 416, 431  
 Ladungsdichte, räumliche 496  
 Ladungsträger 496  
 Lageenergie 111  
 LAMBERT-Strahler 408  
 laminare Strömung 167, 169, 172  
 Länge, Einheit 50  
 Längenänderung 244  
 Längenausdehnungskoeffizient 245, 625 f.  
 Längenkontraktion 599  
 Längswellen 230  
 Läufer 477  
 Lautstärke, Kurven gleicher 356  
 Lautstärkepegel 355, 652  
 Lebensdauer, mittlere 574  
 Leistung 114, 239  
 – bei der Rotation 136  
 –, elektrische 430  
 –, mittlere 115  
 Leistungsfaktor 491  
 Leistungszahl, der Kältemaschine 302  
 – der Wärmepumpe 303  
 Leiter, metallischer 498  
 Leiterspannung 479  
 Leiterstrom 479  
 Leitungsband 498  
 LENZ'sche Regel 461  
 Lepton 592  
 Leuchtdichte 409  
 Leuchtdiode 506  
 Licht, Zerlegung 385  
 Lichtausbeute 407, 656 f.  
 Lichtausbreitung 360  
 Lichtausstrahlung, spezifische 411  
 lichtelektrischer Effekt 539  
 Lichtgeschwindigkeit 360, 652  
 Lichtmenge 411  
 Lichtquant 537  
 Lichtquelle 385  
 Lichtstärke 407  
 –, Messung 414

Lichtstärkeverteilungskurve 408  
 Lichtstrom 410  
 lichttechnische Größen 406  
 Lichtzerlegung 386  
 lineare Federschwingungen 198  
 lineare Sinuswelle 231  
 lineare Wellen 230  
 lineares Fehlerfortpflanzungsgesetz 611  
 lineares Kraftgesetz 197  
 Linienspektrum 388  
 Linke-Hand-Regel 468  
 Linse 369  
 –, asphärische 375  
 –, dicke 374  
 –, dünne 369, 371 f.  
 –, sphärische 369  
 Linsenart 369, 371  
 LISSAJOUS-Figur 223  
 Lithium-Ionen-Akkumulator 514  
 logarithmisches Dekrement 209  
 longitudinale Wellen 230  
 LORENTZ-Kraft 466, 471  
 LORENTZ-Transformation 597  
 LORENZ-Konstante 324  
 LOSCHMIDT-Konstante 309  
 lose Rolle 62  
 Lösung 181  
 –, echte 181  
 –, kolloide 182  
 Lösungswärme 272  
 Luftdichte 628  
 Luftdruck 157, 620  
 Luftdruckmessung 159  
 Luftfeuchtigkeit 278  
 –, Messung 279  
 Luftsäule, schwingende 335  
 Lumineszenz 385  
 Lupe 381  
 Luxmeter 415

**M**

MACH'scher Kegel 344  
 MACH-Zahl 344  
 Magnetfeld, der Erde 448

- magnetische Feldkonstante 454  
 magnetische Feldstärke 449  
 magnetische Flussdichte 454, 456  
 magnetische Polarisierung 456  
 magnetische Quantenzahl 562  
 magnetische Spannung 452  
 magnetische Suszeptibilität 457  
 magnetischer Fluss 455  
 magnetischer Nordpol 448  
 magnetischer Südpol 448  
 magnetisches Feld 448  
 –, Energie 472  
 –, Kraftwirkung 466  
 Magnetisierung 457  
 Magnetisierungskurve 458 f.  
 Magnetismus, permanenter 448  
 Magnetorotation 403  
 Magnetostriktion 359, 460  
 Majoritätsträger 504  
 Mangelhalbleiter 504  
 Manometer 157  
 Markierungsverfahren 590  
 Masche 423  
 Maschensatz 423  
 Maschine, thermische 301  
 Masse 98  
 – der Erde 148  
 – der Sonne 148  
 – des Mondes 148  
 – eines Moleküls 310  
 –, Einheit 54  
 –, kritische 588  
 –, molare 257  
 –, reduzierte 133  
 –, relativistische 602  
 Massenanziehung 140  
 Massendefekt 549  
 Masseneinheit, atomare 547  
 Massenkonzentration 182  
 Massenmittelpunkt 65  
 Massenschwächungskoeffizient 579  
 Massenzuwachs, relativistischer 99  
 Materiewelle 541  
 Materiewellenlänge 541  
 mathematisches Pendel 200  
 maximale Feuchte 278  
 MAXWELL, Verteilungsgesetz nach 313  
 Mechanik, relativistische 595  
 mechanisches Wärmeäquivalent 268  
 Meson 593  
 Messabweichung 605  
 Messbrücke 426  
 Messreihe, Mittelwert 606  
 Messung der Motorleistung 137  
 Messunsicherheit 605  
 metallischer Leiter 498  
 Metallthermometer 244  
 metastabiler Zustand 566  
 Meter, Definition 50  
 Mikroskop 382  
 Minoritätsträger 504  
 Mischungsregel, RICHMANN'sche 264  
 Mittelpunktstrahl 363, 372  
 Mittelwert, arithmetischer 607  
 – der Messreihe 606  
 – des Funktionswertes 609  
 –, Standardabweichung 608  
 mittlere Gaskonstante 255  
 mittlere Lebensdauer 574  
 mittlere Stoßzahl 318  
 Moderator 589  
 Mol 256  
 molare Masse 257  
 molares Normvolumen 257  
 molares Volumen 257  
 Molekül, kinetische Energie 315  
 –, Masse 310  
 molekulardisperses System 181  
 Molekularkraft 176  
 Momentanbeschleunigung 75  
 Momentangeschwindigkeit 74, 76, 81  
 Momentanleistung 115  
 Momentanspannung 476, 528  
 Momentanstrom 528  
 Momentensatz 65  
 Motor 479  
 Motorleistung, Messung 137  
 Multiplikationsfaktor 588

**N**

Nachtsehen 380  
Nahpunkt 379  
Nebelkammer, WILSON'sche 585  
Nebenmaximum 394  
Nebenquantenzahl 561  
Nebenschlussmaschine 478  
Nebenschlussmotor 481  
negative Vorspannung 525  
Neigung 64  
Neue Kerze 408  
Neukurve 459  
Newton, Definition 99  
NEWTON'sche Ringe 392  
NEWTON'sches Axiom, 1. 98  
–, 2. 98  
–, 3. 101  
Nickel-Cadmium-Akkumulator 513  
Nickel-Metallhydrid-Akkumulator 514  
NICOL'sches Prisma 401  
n-Leiter 504  
n-Leitung 503  
Nordpol, magnetischer 448  
Normalbeleuchtungsstärke 413  
Normalbeschleunigung 96  
Normalkraft 63  
Normalspektrum 396  
Normalvergrößerung 382, 384  
Normalverteilung 607  
Normdichte 102, 253 f., 616  
Normfallbeschleunigung 100  
Normort 100  
Normstimmton 337  
Normvolumen 255  
–, molares 257  
Normzustand 102, 255  
Nuklid, isobares 546  
–, isotones 547  
–, isotopes 546  
–, radioaktives 590  
Nullleiterstrom 479  
Nullphasenwinkel 193 f.  
Nullpunkt, absoluter 242  
Nullvektor 31

numerische Apertur 398  
numerische Exzentrizität 148

**O**

Oberflächenenergie 177  
Oberflächenenergiedichte 177  
Oberflächenspannung 177, 623  
Objektiv 382 f.  
offener Schwingkreis 529  
Öffnung, relative 378  
Öffnungsverhältnis 378  
Öffnungszahl 378  
Ohm, Definition 419  
ohmscher Wirkwiderstand 483  
OHM'sches Gesetz 419  
Okular 382 f.  
optische Aktivität 402  
optische Geräte 376  
–, Auflösungsvermögen 397  
Ortsvektor 33  
Osmose 181  
Oxidation 266

**P**

Paarbildung 578, 591  
Paarvernichtung 591  
Parabolspiegel 362  
parallele Achse 130  
parallele Kräfte 57  
Parallelogramm der Bewegungen 79  
Parallelschaltung 425  
– von Kondensatoren 442  
Parallelstrahl 363, 372  
Parallelverschiebung 367  
paramagnetisch 458  
Partialdruck 276  
PAULI-Prinzip 564  
PELTIER-Effekt 500  
Pendel, mathematisches 200  
–, physisches 201  
Pendellänge, reduzierte 202  
Pendelschwingungen 200  
Periodendauer 86, 192, 222  
permanenter Magnetismus 448  
Permeabilitätszahl 456, 661 ff.

Permittivität 437  
Permittivitätszahl 437, 660  
Perpetuum mobile 284  
– 2. Art 303  
Phase 478  
Phasengeschwindigkeit 232  
Phasenkonstante 193 f.  
Phasensprung 233  
Phasenverschiebung 483  
Phasenwinkel 193  
Phon 355  
Phosphoreszenz 386  
Photon 538  
physikalische Größe 26  
–, Gleichungen 34  
physikalische Stimmung 337  
physisches Pendel 201  
PITOT-Rohr 166  
PLANCK'sches Wirkungsquantum 537  
planparallele Platte 367  
Plasma 515  
p-Leiter 504  
p-Leitung 504  
pn-Übergang 504  
POISSON'sche Gleichungen 292  
POISSON'sche Isentropengleichung 293  
POISSON-Zahl 186, 624 f.  
Polarisation 398, 436, 512  
– durch Doppelbrechung 400  
– durch Reflexion 399  
–, magnetische 456  
Polarisationsfolie 401  
Polarisationswinkel 399, 654  
Polarisator 399  
Polytrope 294  
polytrope Zustandsänderung 294  
Polytropenexponent 294  
Positron 570  
Potenzial, elektrisches 433  
potenzielle Energie 111, 557  
PRANDTL'sches Staurohr 166  
Presse, hydraulische 151  
Primärelement 512  
Prinzip von D'ALEMBERT 106

Prisma 368  
Prismenfernglas 384  
Projektor 376  
Prozess, irreversibler 303  
–, reversibler 303  
Psychrometer 279  
pulsierende Gleichspannung 477  
Pyrometer 332

## Q

quadratisches Fehlerfortpflanzungs-  
gesetz 610  
Qualitätsfaktor 583  
Quant 537  
Quantenbedingung 554  
Quantenzahl 561  
–, magnetische 562  
Quark 591 ff.  
Quellenspannung 417, 422  
Querwellen 229

## R

Radialbeschleunigung 96  
radioaktive Umwandlung 570  
radioaktives Nuklid 590  
Radius, BOHR'scher 556  
Radiusvektor 33  
Randwinkel 179  
räumliche Ladungsdichte 496  
Raumwellen 230  
Raumwinkel 410  
Reaktionskraft 101  
Reaktionsprinzip 101  
reales Gas 280  
–, Zustandsgleichung 280  
Rechte-Hand-Regel 462  
reduzierte Masse 133  
reduzierte Pendellänge 202  
reduzierte Wärmemenge 304  
reelles Bild 364  
Reflexion 236, 361  
Reflexionsgesetz 236, 361  
Reflexionsgrad 328  
Reflexionswinkel 361  
Regelstab 589

- Reibung, innere 167  
 Reibungsarbeit 109  
 Reibungskraft 104  
 Reibungszahl 617 f.  
 Reichweite 580, 689  
 Reihenschaltung 424  
 – von Kondensatoren 442  
 Reizschwelle 354  
 Rekombination 502  
 relative Atommasse 547  
 relative Feuchte 278  
 relative Öffnung 378  
 relativistische Dynamik 601  
 relativistische Kinematik 598  
 relativistische Kraft 603  
 relativistische Masse 602  
 relativistische Mechanik 595  
 relativistischer Impuls 603  
 relativistischer Massenzuwachs 99  
 Remanenz 459  
 Resonanz 215, 489  
 Resonanzamplitude 216  
 Resonanzfall 215  
 Resonanzkatastrophe 217  
 Resonanzkreisfrequenz 216  
 Resonanzkurve 215  
 Resonanzüberhöhung 217  
 Resultierende 55  
 reversibel 303  
 reversibler Prozess 303  
 Reversionspendel 202  
 REYNOLDS'sche Zahl 174  
 REYNOLDS'sches Ähnlichkeitsgesetz 174  
 reziproke Sekunde 87  
 RICHARDSON'sche Gleichung 522  
 RICHMANN'sche Mischungsregel 264  
 Richtgröße 103, 197  
 ROCKWELL-Verfahren 191  
 Rolle, feste 62  
 –, lose 62  
 Rollreibung 104  
 Röntgenstrahlung 517, 567  
 Rotation 84  
 –, Arbeit 135  
 –, dynamisches Grundgesetz 126  
 –, gleichförmige 87  
 –, gleichmäßig beschleunigte 87  
 –, Leistung 136  
 –, Trägheitskraft 125  
 –, ungleichmäßig beschleunigte 91  
 Rotationsenergie 137  
 Rotor 477  
 Rückkopplung 529  
 Rückstelldrehmoment 199  
 Rückstellkraft 196  
 ruhende Flüssigkeit 150  
 ruhendes Gas 156  
 RYDBERG-Frequenz 559  
 RYDBERG-Konstante 559
- ## S
- Saite, schwingende 334  
 Sammellinse 369  
 Sättigungsdampfdruck 276  
 Sättigungsdruck 641  
 Sättigungsmenge 276, 278, 641  
 Sättigungsstrom 515  
 Satz von STEINER 133  
 Schalenmodell 553  
 Schallausbreitung 340  
 Schalldämmmaß 354, 651  
 Schalldruck 349  
 –, Effektivwert 350  
 Schalldruckpegel 352  
 Schallerzeugung 333  
 Schallfeldgröße 348  
 Schallgeschwindigkeit 340, 650 f.  
 – in Festkörpern 340  
 – in Flüssigkeiten 340  
 – in Gasen 341  
 – in Luft 341  
 Schallimpedanz, spezifische 350  
 Schallintensität 350  
 Schallintensitätspegel 351  
 Schallmauer 344  
 Schallmessung 348  
 Schallpegel 351, 357  
 –, relativer 354  
 Schallquelle 334  
 Schallschnelle 348

- Schallstärke 350, 358  
Schallwellen, Überlagerung 346  
Schaltung, von Induktivitäten 465  
– von Widerständen 424  
Schaum 183  
scheinbare Fläche 409  
Scheinkraft 105  
Scheinleistung 492  
Scheinwiderstand 483, 487  
Scheitelspannung 476  
Scherung 188  
Schiebung 189  
Schlupf 481  
Schmelzen 269  
Schmelzpunkt 270  
– von Legierungen 270  
Schmelztemperatur 634 ff.  
Schmelzwärme 271  
–, spezifische 272, 634 ff.  
Schmerzgrenze 355  
Schraube 64  
Schubkoeffizient 189  
Schubmodul 189, 624 f.  
Schubspannung 189  
Schubwinkel 188  
Schubzahl 189  
Schwächungskoeffizient 688 f.  
–, linearer 578  
schwarzer Körper 329  
Schwebung 220, 227, 346  
–, unreine 222  
Schwebungsdauer 221  
Schwebungsfrequenz 221  
Schwellenwert 354  
Schwere 99  
Schwerebeschleunigung 77, 100  
Schweredruck 152  
Schwerkraft 140  
Schwerpunkt 65  
– einer Fläche 66  
– einer Linie 66  
– eines homogenen Körpers 66  
Schwindmaß 271  
schwingende Luftsäule 335  
schwingende Saite 334  
Schwingkreis 527  
–, offener 529  
Schwingungen, elektromagnetische 527  
–, elektromagnetische, gedämpfte 530  
–, elektromagnetische, ungedämpfte 527  
–, erzwungene 213  
–, freie 213  
–, gedämpfte 192, 205  
–, gekoppelte 226  
–, harmonische 192  
–, Überlagerung 218  
–, ungedämpfte 192  
–, ungedämpfte harmonische 197  
– zirkulare 224  
Schwingungsdauer 192  
Schwingungsenergie 203  
Schwingungsgleichung 197, 206, 213  
–, THOMSON'sche 528  
Schwingungsmittelpunkt 202  
Schwungmoment 134  
Sehwinkel 380  
Sekundärelement 512  
Sekundäremission 524  
Sekunde, reziproke 87  
Selbstdiffusion 181  
Selbstinduktion 463  
Selbstinduktionskoeffizient 464  
Sicherheit, statistische 608  
Siebkreis 490  
Siedepunkt 273  
– von Lösungen 273  
Siedetemperatur 637 ff.  
– des Wassers 640  
SI-Einheit, abgeleitete 37  
–, dezimale Vielfache und Teile 38  
SIEMENS'sches Prinzip 478  
SI-fremde Einheit 38  
Sinuswelle, lineare 231  
skalare Größe 28  
Skalarprodukt 31  
Sol 183  
Solarkonstante 265  
Sonnenenergie 265

- Sonnensystem, Daten 148  
 Spannarbeit 111  
 Spannung, magnetische 452  
 Spannungsabfall 418  
 –, innerer 422  
 Spannungsdoppelbrechung 401  
 Spannungsenergie 111  
 Spannungsmesser 428  
 Spannungsoptik 401  
 Spannungsresonanzkreis 490  
 Spannungsteiler 426  
 Spannungsverstärkung 526  
 Spektralanalyse 389  
 spektraler Hellempfindlichkeitsgrad 406  
 Spektralfarbe 386  
 Spektrum 386, 388  
 – elektromagnetischer Wellen 535  
 –, kontinuierliches 388  
 Sperrkreis 490  
 Sperrstrom 505  
 spezielle Gaskonstante 253, 628  
 spezifische Aktivität 576  
 spezifische Ausstrahlung 405  
 spezifische Drehung 403  
 spezifische Lichtausstrahlung 411  
 spezifische Schallimpedanz 350  
 spezifische Schmelzwärme 272, 634 ff.  
 spezifische Verdampfungswärme 274, 637 ff.  
 spezifische Wärmekapazität 259, 262, 317, 629–632  
 spezifischer Brennwert 266  
 spezifischer elektrischer Widerstand 420, 658  
 spezifischer Heizwert 266, 633  
 spezifischer Wärmewiderstand 323  
 spezifisches Gewicht 102  
 spezifisches Volumen 257  
 sphärische Linse 369  
 sphärischer Fehler 376  
 Spiegel, ebener 362  
 –, sphärischer 362  
 Spinquantenzahl 563  
 Spitzenentladung 438  
 spontane Emission 566  
 Sprungtemperatur 499, 665  
 Stabmagnet 448  
 Standardabweichung, der Einzelmessung 607  
 – des Mittelwertes 608  
 Standfestigkeit 67  
 Standmoment 67  
 statischer Druck 163, 165  
 statistische Sicherheit 608  
 Stator 477  
 Staudruck 163, 166  
 STEFAN-BOLTZMANN-Konstante 330  
 stehende Wellen 233  
 Steighöhe 84  
 Steigung 64  
 Steigzeit 83  
 Steilheit 525  
 Steradian 410  
 Sternschaltung 479  
 Steuergitter 525  
 Stimmung, internationale 337  
 –, physikalische 337  
 Stoßzahl, mittlere 318  
 Stoffgemisch 262  
 Stoffmengenkonzentration 182  
 STOKES'sches Gesetz 172  
 Störleitung 503  
 Stoß 117  
 –, elastischer 119  
 –, teilelastischer 122  
 –, unelastischer 121  
 Stoßionisation 515  
 Stoßmittelpunkt 202  
 Stoßzahl 123, 619  
 Strahldichte 405  
 Strahlen, diffuse 360  
 –, divergente 360  
 –, konvergente 360  
 Strahlennachweis 585  
 Strahlenoptik 360  
 Strahlenschutz 584  
 Strahlstärke 405  
 Strahlung,  $\alpha$ - 570  
 –,  $\beta$ - 570  
 –,  $\beta^+$ - 570

- , charakteristische 517, 567
  - ,  $\gamma$ - 570
  - Strahlungsäquivalent, fotometrisches 407
  - Strahlungsdruck 539
  - Strahlungsemission 565
  - Strahlungsfluss 404
  - Strahlungsgesetz, KIRCHHOFF'sches 329
    - von PLANCK 331
    - von STEFAN und BOLTZMANN 330
  - strahlungsphysikalische Größen 404
  - Strahlungspyrometer 244
  - Strahlungsquant 537
  - Strang 478
  - Strangspannung 479
  - Streuung 607
  - Stromleitung, durch Festkörper 497
    - im Vakuum 517
    - in Flüssigkeiten 510
    - in Gasen 514
  - Stromlinie 161
  - Strommesser 427
  - Stromresonanzkreis 490
  - Stromrichtung, technische 417
  - Stromstärke 416
  - Strömung 161
    - , Druck 163
    - , ideale 161
    - , laminare 167, 169, 172
    - , reibungsfreie 161
    - , stationäre 161
    - , turbulente 173
  - Strömungsfeld 161
  - Strömungsleistung 174
  - Strömungswiderstand 173
  - Stromverstärkungsfaktor 507 f.
  - Stromverzweigung 424
  - Sublimieren 275
  - Südpol, magnetischer 448
  - Supraleitung 420, 499
  - Suspension 183
  - Synchronmotor 480
  - Synchro-Phasotron 586
  - Synchro-Zyklotron 586
  - System, disperses 181
    - , kolloiddisperses 182
    - , korpuskulardisperses 182
    - , molekulardisperses 181
  - Systeme dünner Linsen 372
  - systematischer Fehler 605
  - Szintillationszähler 585
- ## T
- Tagsehen 380
  - Taupunkt 279
  - Taupunktmesser 279
  - technische Stromrichtung 417
  - Teilchenbeschleuniger 586
  - teilelastischer Stoß 122
  - Temperatur 241
    - , kritische 281, 643
  - Temperaturdifferenz 243
  - Temperaturkoeffizient 421, 659
  - Temperaturskala 242
  - Temperaturstrahler 385
  - Temperaturstrahlung 328
  - temperierte chromatische Tonleiter 337
  - Termschema 497, 565
  - terrestrisches Fernrohr 384
  - thermische Anregung 566
  - thermische Elektronenemission 522
  - thermische Maschine 301
  - thermischer Wirkungsgrad, des CARNOT-Prozesses 301
    - von Wärmekraftmaschinen 300
  - Thermoelektrizität 499
  - Thermoelement 244
  - Thermometer 243
  - Thermospannung 499
  - Thermostrom 499
  - THOMSON'sche Schwingungsgleichung 528
  - Ton 333
  - Tonleiter, chromatische 336
    - , harmonische 336
    - , temperierte chromatische 337
  - Torsion 189
  - Torsionsmodul 188

Totalreflexion 366  
 Trägheit 98  
 Trägheitskraft 105  
   – bei der Rotation 125  
 Trägheitsmoment 128  
 Trägheitsradius 134  
 Transformator 493  
 Transistor, bipolarer 506  
   –, unipolarer 509  
 Translation 68  
   –, gleichförmige 69  
   –, gleichmäßig beschleunigte 70  
   –, ungleichmäßig beschleunigte 74  
 Transmissionsgrad 328  
 transversale Wellen 229  
 Triode 525  
 Tripelpunkt 277  
 Trommelanker 478  
 TSCHERENKOW-Strahlung 345  
 turbulente Strömung 173

**U**

Überdruck 157  
 Überlagerung, von Schallwellen 346  
   – von Schwingungen 218  
   – von Wellen 235  
 Überschallknall 344  
 Überschusshalbleiter 504  
 Uhrenparadoxon 599  
 ULBRICHT'Sche Fotometerkugel 415  
 Ultraschall 333, 358  
   –, Ausbreitung 358  
   –, Erzeugung 359  
 Umdrehungsfrequenz 86  
 Umfangsbewegung 94  
 Umlauffrequenz 86, 555  
 Umwandlung, radioaktive 570  
 unelastischer Stoß 121  
 ungedämpfte harmonische Schwin-  
   gungen 197  
 ungedämpfte Schwingungen 192  
 ungleichmäßig beschleunigte  
   Rotation 91  
 ungleichmäßig beschleunigte  
   Translation 74

unipolarer Transistor 509  
 Universalmotor 480  
 Unschärferelation 544  
 Uranspaltung 587  
 Urmeter 50  
 Urspannung 417, 422

**V**

Valenzband 498  
 VAN-DER-WAALS-Konstante 642  
 VAN-DER-WAALS'sche Zustandsglei-  
   chung 281  
 Vektor, axialer 60  
   – der Momentangeschwindigkeit 81  
   –, freier 60  
   –, linienflüchtiger 55  
 vektorielle Größe 29  
 Vektorprodukt 32  
 VENTURI-Rohr 166  
 verbotene Zone 497  
 Verbrennungsenergie 266  
 Verbrennungswärme 266  
 Verdampfen 272  
 Verdampfungswärme 274  
   –, spezifische 274, 637 ff.  
 Verdichtung 230  
 Verdrängungsarbeit 287  
 Verdünnung 230  
 Verdunsten 275  
 Verformungsarbeit 110, 112, 122  
 Vergrößerung 380  
 Verlustwinkel 489  
 Vermehrungsfaktor 588  
 Verschiebungsgesetz von WIEN 332  
 Verstärkung 346, 392  
 Verstärkungsfaktor, maximaler 526  
 Verteilungsgesetz nach MAXWELL  
   313  
 Vertrauensbereich 609  
 Vertrauensniveau 608  
 Verzeichnung 376  
 Verzögerung 71  
 Vickers-Verfahren 191  
 virtuelles Bild 362  
 Viskosität, dynamische 168, 621 f.  
   –, kinematische 169, 621 f.

- Volt, Definition 418  
 Volumen, Einheit 52  
 –, kritisches 281  
 –, molares 257  
 –, spezifisches 257  
 Volumenänderung 246 ff., 271, 273  
 Volumenänderungsarbeit 285  
 –, isentrope 293  
 –, isotherme 289  
 Volumenausdehnungskoeffizient 627  
 Volumenausdehnungskoeffizient 247  
 Volumenstrom 162, 167  
 Vorspannung, negative 525  
 Vorzeichenkonvention 285
- W**
- Waage, hydrostatische 154  
 Wärmeäquivalent, elektrisches 267  
 –, mechanisches 268  
 Wärmedurchgang 325  
 Wärmedurchgangskoeffizient 326, 647  
 Wärmeenergie 259  
 Wärmehalt 260  
 Wärmekapazität 260  
 –, spezifische 259, 262, 317, 629–632  
 Wärmekraftmaschine, Prinzip 303  
 –, thermischer Wirkungsgrad 300  
 Wärmeleitfähigkeit 322, 644 f.  
 Wärmeleitung 321  
 Wärmeleitwert 323  
 Wärmemenge 259  
 –, reduzierte 304  
 Wärmemischung 264  
 Wärmepumpe 302  
 –, Leistungszahl 303  
 Wärmequelle 265  
 Wärmestrahlung 329  
 Wärmestrom 322  
 Wärmeströmung 321  
 Wärmetransport 321  
 Wärmeübergang 324  
 Wärmeübergangskoeffizient 325, 646  
 Wärmewiderstand 323  
 –, spezifischer 323  
 Wasserstoffatom 554  
 Wasserwert 261  
 Wechselspannung 476  
 Wechselstrom 476  
 Wechselstromgenerator 475  
 Wechselstromkreis 482  
 Wechselstromleistung 490  
 Wechselstrommotor 480  
 Wechselstromwiderstand 483  
 Wechselwirkungsprinzip 101  
 Weglänge, mittlere freie 319 f.  
 Weitsichtigkeit 379  
 Wellen, elektromagnetische 531  
 –, elektromagnetische, freie 533  
 –, elektromagnetische, Spektrum 535  
 –, Flächen- 230  
 –, Längs- 230  
 –, lineare 230  
 –, longitudinale 230  
 –, Quer- 229  
 –, Raum- 230  
 –, stehende 233  
 –, transversale 229  
 –, Überlagerung 235  
 Wellenart 229  
 Wellenbauch 234  
 Wellenfront 230  
 Wellengleichung 231  
 Wellenknoten 234  
 Wellenlänge 230, 655  
 Wellenoptik 391  
 Wellenstrahl 230  
 Wellenwiderstand 240, 350, 532, 534  
 Wellenzahl 559  
 WHEATSTONE'sche Messbrücke 426  
 Wichte 102  
 Widerstand, elektrischer 418  
 –, induktiver 483  
 –, Innen- 421, 525  
 –, kapazitiver 485  
 –, Schaltung 424  
 –, spezifischer elektrischer 420, 658  
 Widerstandsbeiwert 173, 622

- Widerstandsthermometer 244  
 WIEDEMANN-FRANZ-LORENZ'sches  
   Gesetz 324  
 WIEN-Konstante 332  
 WILSON'sche Nebelkammer 585  
 Windungszahlverhältnis 493  
 Winkel, Einheit 52  
 Winkelbeschleunigung 88  
 –, mittlere 93  
 –, momentane 92 f.  
 Winkelfrequenz 193  
 Winkelgeschwindigkeit 87  
 –, mittlere 89 f., 92  
 –, momentane 91  
 Winkelhebel 61  
 Winkelrichtgröße 199  
 Winkelverzögerung 88  
 Wirkleistung 490  
 Wirkung 116  
 Wirkungsgrad 116  
 – des CARNOT-Prozesses 301  
 – von Wärmekraftmaschinen 300  
 Wirkungsquantum, PLANCK'sches  
   537  
 Wirkungssphäre 176  
 Wirkwiderstand 483  
 Wölbspiegel 364  
 Wurf, nach oben 78  
 – nach unten 78  
 –, schräger 82  
 –, schräger, Bahngleichung 82  
 –, senkrechter 78  
 –, waagerechter 80  
 –, waagerechter, Bahngleichung 80  
 Wurfweite, maximale 84  
 Wurfzeit 84
- Z**
- Zähigkeit 168  
 Zahlenwertgleichung 36  
 Zählrohr, GEIGER-MÜLLER- 585  
 Zehntelwertdicke 579  
 Zeigerdiagramm 219, 484  
 Zeit, Einheit 53  
 Zeitdilatation 598  
 Zentrifugalkraft 124 f.  
 Zentripetalkraft 124  
 Zerfall, radioaktiver 570  
 Zerfallsenergie 572, 686 f.  
 Zerfallsgesetz 573  
 Zerfallskonstante 573  
 Zerfallsreihe 576  
 Zerlegung des Lichts 385  
 Zerstrahlung 591  
 Zerstreuungslinse 370  
 Zerstreuungspunkt 364  
 zirkuläre Schwingungen 224  
 zufälliger Fehler 605  
 zusammengesetzte Bewegung 79  
 Zusammensetzen von Kräften 55  
 Zustand, metastabiler 566  
 Zustandsänderung, isentrope 291  
 –, isobare 288  
 –, isochore 287  
 –, isotherme 289  
 –, polytrope 294  
 –, quasistatische 291  
 Zustandsgleichung, des idealen Gases  
   252  
 – realer Gase 280  
 –, stoffmengenbezogene 258  
 –, VAN-DER-WAALS'sche 281  
 Zustandsgröße 241, 284  
 Zwangskraft 101  
 Zweipolröhre 524  
 zweite astronautische Geschwindig-  
   keit 146  
 zweites NEWTON'sches Axiom 98  
 Zyklotron 586