

# Inhaltsverzeichnis

## Teil I Mechanik

<b>1</b>	<b>Einführung, Längen- und Zeitmessung</b>	<b>3</b>
1.1	Einführung	3
1.2	Messung von Längen, echte Längenmessung	4
1.3	Die Längeneinheit Meter	6
1.4	Unechte Längenmessung bei sehr großen Längen	7
1.5	Winkelmessung	9
1.6	Zeitmessung, echte Zeitmessung	10
1.7	Uhren, graphische Aufzeichnung	11
1.8	Messung periodischer Folgen gleicher Zeiten und Längen	13
1.9	Unechte Zeitmessung	15
	Aufgaben	16
<b>2</b>	<b>Darstellung von Bewegungen, Kinematik</b>	<b>17</b>
2.1	Definition von Bewegung, Bezugssystem	17
2.2	Definition der Geschwindigkeit, Beispiel einer Geschwindigkeitsmessung	18
2.3	Definition der Beschleunigung, die beiden Grenzfälle	20
2.4	Bahnbeschleunigung, gerade Bahn	22
2.5	Konstante Radialbeschleunigung, Kreisbahn	27
2.6	Die Unterscheidung physikalischer Größen und ihrer Zahlenwerte	28
2.7	Grundgrößen und abgeleitete Größen	29
	Aufgaben	30

<b>3</b>	<b>Grundlagen der Dynamik</b> . . . . .	<b>33</b>
	3.1 Kraft und Masse . . . . .	33
	3.2 Messverfahren für Kraft und Masse, die Grundgleichung der Mechanik . . . . .	36
	3.3 Einheiten von Kraft und Masse, Größengleichungen . . . . .	39
	3.4 Dichte und spezifisches Volumen . . . . .	40
	Aufgaben . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Anwendungen der Grundgleichung</b> . . . . .	<b>43</b>
	4.1 Konstante Beschleunigung auf gerader Bahn . . . . .	43
	4.2 Kreisbahn, Radialkraft . . . . .	46
	4.3 Sinusförmige Schwingungen, Schwerependel als Sonderfall . . . . .	52
	4.4 Zentralbewegungen . . . . .	56
	4.5 Ellipsenbahnen, elliptisch polarisierte Schwingungen . . . . .	58
	4.6 LISSAJOUS-Bahnen . . . . .	60
	4.7 Die KEPLER-Ellipse und das Gravitationsgesetz . . . . .	61
	4.8 Die Konstante des Gravitationsgesetzes . . . . .	62
	4.9 Gravitationsgesetz und Himmelsmechanik . . . . .	64
	Aufgaben . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Drei nützliche Begriffe: Arbeit, Energie, Impuls</b> . . . . .	<b>69</b>
	5.1 Vorbemerkung . . . . .	69
	5.2 Arbeit und Leistung . . . . .	69
	5.3 Energie und Energiesatz . . . . .	73
	5.4 Erste Anwendungen des mechanischen Energiesatzes . . . . .	76
	5.5 Kraftstoß und Impuls . . . . .	77
	5.6 Der Impulssatz . . . . .	78
	5.7 Erste Anwendungen des Impulssatzes . . . . .	79
	5.8 Impuls- und Energiesatz beim elastischen Stoß von Körpern . . . . .	81
	5.9 Der Impulssatz beim unelastischen Stoß zweier Körper und das Stoßpendel . . . . .	82
	5.10 Nichtzentraler Stoß . . . . .	84
	5.11 Bewegungen gegen energieverzehrende Widerstände . . . . .	84
	5.12 Erzeugung von Kräften ohne und mit Leistungsaufwand . . . . .	88
	5.13 Schlussbemerkung . . . . .	89
	Aufgaben . . . . .	90

<b>6</b>	<b>Drehbewegungen fester Körper</b> . . . . .	93
6.1	Vorbemerkung . . . . .	93
6.2	Definition des Drehmomentes . . . . .	93
6.3	Herstellung bekannter Drehmomente, die Winkelrichtgröße $D^*$ , die Winkelgeschwindigkeit $\omega$ als Vektor . . . . .	96
6.4	Trägheitsmoment, Grundgleichung für Drehbewegungen, Drehschwingungen . . . . .	99
6.5	Das physikalische Pendel und die Balkenwaage . . . . .	104
6.6	Der Drehimpuls . . . . .	106
6.7	Freie Achsen . . . . .	110
6.8	Freie Achsen bei Mensch und Tier . . . . .	113
6.9	Definition des Kreisels und seiner drei Achsen . . . . .	114
6.10	Die Nutation des kräftefreien Kreisels und sein raumfester Drehimpuls . . . . .	116
6.11	Kreisel unter Einwirkung von Drehmomenten, die Präzession der Drehimpulsachse . . . . .	119
6.12	Präzessionskegel mit Nutationen . . . . .	124
6.13	Kreisel mit nur zwei Freiheitsgraden . . . . .	126
	Aufgaben . . . . .	128
<b>7</b>	<b>Beschleunigte Bezugssysteme</b> . . . . .	131
7.1	Vorbemerkung, Trägheitskräfte . . . . .	131
7.2	Bezugssystem mit reiner Bahnbeschleunigung . . . . .	132
7.3	Bezugssystem mit reiner Radialbeschleunigung, Zentrifugalkraft und CORIOLIS-Kraft . . . . .	135
7.4	Fahrzeuge als beschleunigte Bezugssysteme . . . . .	143
7.5	Das Schwerependel als Lot in beschleunigten Fahrzeugen . . . . .	146
7.6	Die Erde als beschleunigtes Bezugssystem: Zentrifugal- beschleunigung ruhender Körper . . . . .	148
7.7	Die Erde als beschleunigtes Bezugssystem: CORIOLIS-Beschleunigung bewegter Körper . . . . .	150
	Aufgaben . . . . .	153
<b>8</b>	<b>Einige Eigenschaften fester Körper</b> . . . . .	155
8.1	Vorbemerkung . . . . .	155
8.2	Elastische Verformung, Fließen und Verfestigung . . . . .	155
8.3	HOOKÉ'sches Gesetz und POISSON'sche Beziehung . . . . .	157

8.4	Scherung . . . . .	158
8.5	Normal-, Schub- und Hauptspannung . . . . .	159
8.6	Biegung und Verdrillung (Torsion) . . . . .	162
8.7	Zeitabhängigkeit der Verformung, elastische Nachwirkung und Hysterese . . . . .	167
8.8	Zerreißfestigkeit und spezifische Oberflächenarbeit fester Körper .	169
8.9	Haft- und Gleitreibung . . . . .	171
8.10	Rollreibung . . . . .	174
	Aufgaben . . . . .	175
<b>9</b>	<b>Ruhende Flüssigkeiten und Gase . . . . .</b>	<b>177</b>
9.1	Die freie Verschiebbarkeit der Flüssigkeitsmoleküle . . . . .	177
9.2	Druck in Flüssigkeiten, Manometer . . . . .	180
9.3	Allseitigkeit des Drucks und Anwendungen . . . . .	182
9.4	Druckverteilung im Schwerfeld und Auftrieb . . . . .	185
9.5	Der Zusammenhalt der Flüssigkeiten, ihre Zerreißfestigkeit, spezifische Oberflächenarbeit und Oberflächenspannung . . . . .	188
9.6	Gase als Flüssigkeiten geringer Dichte ohne Oberfläche, BOYLE-MARIOTTE'sches Gesetz . . . . .	195
9.7	Modell eines Gases, der Gasdruck als Folge der ungeordneten Bewegung („Wärmebewegung“) . . . . .	198
9.8	Grundgleichung der kinetischen Gastheorie, Geschwindigkeit der Gasmoleküle . . . . .	199
9.9	Die Lufthülle der Erde, der Luftdruck in Schauversuchen . . . . .	201
9.10	Druckverteilung der Gase im Schwerfeld, barometrische Höhen- formel . . . . .	205
9.11	Der statische Auftrieb in Gasen . . . . .	207
9.12	Gase und Flüssigkeiten in beschleunigten Bezugssystemen . . . . .	209
	Aufgaben . . . . .	211
<b>10</b>	<b>Bewegungen in Flüssigkeiten und Gasen . . . . .</b>	<b>215</b>
10.1	Drei Vorbemerkungen . . . . .	215
10.2	Innere Reibung und Grenzschicht . . . . .	216
10.3	Laminare, unter entscheidender Mitwirkung der Reibung entstehende Flüssigkeitsbewegung . . . . .	218
10.4	Die REYNOLDS'sche Zahl . . . . .	221
10.5	Reibungsfreie Flüssigkeitsbewegung, BERNOULLI'sche Gleichung . .	224

10.6	Ausweichströmung, Quellen und Senken, drehungsfreie oder Potentialströmung	230
10.7	Drehungen von Flüssigkeiten und ihre Messung, das drehungsfreie Wirbelfeld	233
10.8	Wirbel und Trennungsflächen in praktisch reibungsfreien Flüssigkeiten	237
10.9	Widerstand und Stromlinienprofil	239
10.10	Die dynamische Querkraft	242
10.11	Anwendungen der Querkraft	246
	Aufgaben	249

## Teil II Akustik

<b>11</b>	<b>Schwingungslehre</b>	<b>253</b>
11.1	Vorbemerkung	253
11.2	Erzeugung ungedämpfter Schwingungen	253
11.3	Darstellung nichtsinusförmiger periodischer Vorgänge und Strukturen mithilfe von Sinuskurven	257
11.4	Spektraldarstellung komplizierter Schwingungsvorgänge	262
11.5	Elastische Transversalschwingungen gespannter linearer fester Körper	265
11.6	Elastische Longitudinal- und Torsionsschwingungen gespannter linearer fester Körper	269
11.7	Elastische Schwingungen in Säulen von Flüssigkeiten und Gasen	271
11.8	Eigenschwingungen starrer linearer Körper	276
11.9	Eigenschwingungen flächenhaft und räumlich ausgedehnter Gebilde, Wärmeschwingungen	277
11.10	Erzwungene Schwingungen	279
11.11	Durch Resonanz stimulierte Energieabgabe	284
11.12	Die Resonanz in ihrer Bedeutung für den Nachweis einzelner Sinusschwingungen, Spektralapparate	285
11.13	Die Bedeutung erzwungener Schwingungen für die verzerrungsfreie Aufzeichnung nichtsinusförmiger Schwingungen	287
11.14	Verstärkung von Schwingungen	288
11.15	Zwei gekoppelte Pendel und ihre erzwungenen Schwingungen	290
11.16	Gedämpfte und ungedämpfte Wackelschwingungen	293
11.17	Relaxations- oder Kippschwingungen	294
	Aufgaben	296

<b>12</b>	<b>Fortschreitende Wellen und Strahlung</b>	<b>299</b>
12.1	Fortschreitende Wellen	299
12.2	DOPPLER-Effekt	301
12.3	Interferenz	303
12.4	Interferenz bei zwei etwas verschiedenen Senderfrequenzen	304
12.5	Stehende Wellen	305
12.6	Ausbreitung fortschreitender Wellen	307
12.7	Reflexion und Brechung	310
12.8	Abbildung	311
12.9	Totalreflexion	312
12.10	Keilwellen beim Überschreiten der Wellengeschwindigkeit	315
12.11	Das HUYGHENS'sche Prinzip	316
12.12	Modellversuche zur Wellenausbreitung	317
12.13	Quantitatives zur Beugung an einem Spalt	319
12.14	FRESNEL'sche Zonenkonstruktion	322
12.15	Verschärfung der Interferenzstreifen durch gitterförmige Anordnung der Wellenzentren	325
12.16	Interferenz von Wellenzügen begrenzter Länge	329
12.17	Entstehung von Longitudinalwellen, ihre Geschwindigkeit	329
12.18	Hochfrequente Longitudinalwellen in Luft, Schallabdruckverfahren	331
12.19	Strahlungsdruck des Schalls, Schallradiometer	334
12.20	Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz von räumlichen Wellen	336
12.21	Die Entstehung von Wellen auf der Oberfläche von Flüssigkeiten	344
12.22	Dispersion und Gruppengeschwindigkeit	349
12.23	Die Umwandlung unperiodischer Vorgänge in Wellen	353
12.24	Energie des Schallfeldes, Schallwellenwiderstand	356
12.25	Schallsender	359
12.26	Unperiodische Schallsender und Überschallgeschwindigkeit	362
12.27	Schallempfänger	363
12.28	Vom Hören	365
12.29	Phonometrie	368
12.30	Das Ohr	370
	Aufgaben	374

### Teil III Wärmelehre

<b>13</b>	<b>Grundbegriffe</b> . . . . .	379
13.1	Vorbemerkungen, Definition des Begriffs Stoffmenge . . . . .	379
13.2	Definition und Messung der Temperatur . . . . .	380
13.3	Definition der Begriffe Wärme und Wärmekapazität . . . . .	383
13.4	Latente Wärme . . . . .	386
	Aufgaben . . . . .	389
<b>14</b>	<b>Erster Hauptsatz und Zustandsgleichung idealer Gase</b> . . . . .	391
14.1	Ausdehnungsarbeit und technische Arbeit . . . . .	391
14.2	Thermische Zustandsgrößen . . . . .	394
14.3	Innere Energie $U$ und erster Hauptsatz . . . . .	394
14.4	Die Zustandsgröße Enthalpie $H$ . . . . .	396
14.5	Die beiden spezifischen Wärmekapazitäten $c_p$ und $c_v$ . . . . .	398
14.6	Thermische Zustandsgleichung idealer Gase, die absolute Temperatur . . . . .	401
14.7	Addition der Partialdrücke . . . . .	404
14.8	Kalorische Zustandsgleichungen idealer Gase, GAY-LUSSAC'scher Drosselversuch . . . . .	405
14.9	Zustandsänderungen idealer Gase . . . . .	408
14.10	Anwendungsbeispiele für polytrope und adiabatische Zustandsänderungen, Messungen von $\kappa = c_p/c_v$ . . . . .	414
14.11	Druckluftmotor und Gaskompressor . . . . .	416
	Aufgaben . . . . .	418
<b>15</b>	<b>Reale Gase</b> . . . . .	419
15.1	Zustandsänderungen realer Gase . . . . .	419
15.2	Unterscheidung von Gas und Flüssigkeit . . . . .	421
15.3	Die VAN DER WAALS'sche Zustandsgleichung realer Gase . . . . .	424
15.4	Der JOULE-THOMSON'sche Drosselversuch . . . . .	426
15.5	Herstellung tiefer Temperaturen und Gasverflüssigung . . . . .	428
15.6	Technische Verflüssigung und Entmischung von Gasen . . . . .	430
15.7	Dampfdruck und Siedetemperatur, Tripelpunkt . . . . .	431
15.8	Behinderung des Phasenüberganges flüssig $\rightarrow$ fest, unterkühlte Flüssigkeiten . . . . .	434
15.9	Behinderung des Phasenüberganges flüssig $\leftrightarrow$ gasförmig, Zerreißfestigkeit der Flüssigkeiten . . . . .	435
	Aufgaben . . . . .	436

<b>16</b>	<b>Wärme als ungeordnete Bewegung</b> . . . . .	439
16.1	Die Temperatur im molekularen Bild . . . . .	439
16.2	Rückstoß der Gasmoleküle bei der Reflexion, Radiometerkraft . . .	443
16.3	Geschwindigkeitsverteilung und mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle . . . . .	445
16.4	Molare Wärmekapazitäten im molekularen Bild, das Gleichverteilungsprinzip . . . . .	447
16.5	Osmose und osmotischer Druck . . . . .	450
16.6	Experimentelle Bestimmung der BOLTZMANN-Konstante $k$ aus der barometrischen Höhenformel . . . . .	455
16.7	Statistische Schwankungen und Individuenzahl . . . . .	458
16.8	Die BOLTZMANN-Verteilung . . . . .	459
<b>17</b>	<b>Transportvorgänge: Diffusion und Wärmeleitung</b> . . . . .	463
17.1	Vorbemerkung . . . . .	463
17.2	Diffusion und Durchmischung . . . . .	463
17.3	Erstes FICK'sches Gesetz und Diffusionskonstante . . . . .	464
17.4	Quasistationäre Diffusion . . . . .	467
17.5	Nichtstationäre Diffusion . . . . .	468
17.6	Allgemeines über Wärmeleitung und Wärmetransport . . . . .	470
17.7	Stationäre Wärmeleitung . . . . .	472
17.8	Nichtstationäre Wärmeleitung . . . . .	474
17.9	Transportvorgänge in Gasen und ihre Unabhängigkeit vom Druck .	475
17.10	Bestimmung der mittleren freien Weglänge . . . . .	478
17.11	Wechselseitige Verknüpfung der Transportvorgänge in Gasen . . . .	480
<b>18</b>	<b>Die Zustandsgröße Entropie</b> . . . . .	485
18.1	Reversible Vorgänge . . . . .	485
18.2	Irreversible Vorgänge . . . . .	487
18.3	Messung der Irreversibilität mithilfe der Zustandsgröße Entropie $S$	489
18.4	Die Entropie im molekularen Bild . . . . .	492
18.5	Beispiele für die Berechnung von Entropien . . . . .	494
18.6	Anwendung der Entropie auf reversible Zustandsänderungen in abgeschlossenen Systemen . . . . .	497
18.7	Das $HS$ - oder MOLLIER-Diagramm mit Anwendungen, Gasströmung mit Überschallgeschwindigkeit . . . . .	499
	Aufgaben . . . . .	503



<b>19</b>	<b>Umwandlung von Wärme in Arbeit, zweiter Hauptsatz</b>	<b>505</b>
19.1	Wärmekraftmaschinen und zweiter Hauptsatz	505
19.2	CARNOT'scher Kreisprozess	507
19.3	Der STIRLING-Motor	508
19.4	Technische Wärmekraftmaschinen	510
19.5	Wärmepumpe (Kältemaschine)	511
19.6	Die thermodynamische Definition der Temperatur	514
19.7	Druckluftmotor, freie und gebundene Energie	515
19.8	Beispiele für die Anwendung der freien Energie	516
19.9	Der Mensch als isotherme Kraftmaschine	519
	Aufgaben	520
	<b>Lösungen der Aufgaben</b>	<b>522</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>528</b>