

# Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Beispiele	XII
Verzeichnis der Tabellen	XV
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Physikalische Größen	1
1.2 Messfehler	3
<b>I Mechanik der Punktmasse und des starren Körpers</b>	<b>7</b>
<b>2 Vorbemerkungen</b>	<b>8</b>
2.1 Bezugssysteme	8
2.2 Gegenüberstellung Translation–Rotation	8
<b>3 Kinematik der geradlinigen Bewegung</b>	<b>10</b>
3.1 Orts-Zeit-Diagramme	10
3.2 Geschwindigkeit	11
3.3 Beschleunigung	13
3.4 Bestimmung der Wegstrecke $\Delta x$ und der Geschwindigkeitsänderung $\Delta v$	15
3.5 Spezielle Bewegungen	17
3.6 Senkrechter Wurf	19
3.7 Bewegung auf beliebigen Bahnen	22
3.8 Zusammenfassung	22
3.9 Aufgaben	23
<b>4 Bewegung in einer Ebene</b>	<b>27</b>
4.1 Vektoren – Grundbegriffe	27
4.2 Die Vektoren $\vec{r}$ , $\vec{v}$ und $\vec{a}$	29
4.3 Das Superpositionsprinzip	31
4.4 Spezielle Bewegungen	32
4.5 Kreisbewegungen	37
4.6 Überlagerung von Translations- und Drehbewegung	42
4.7 Zusammenfassung	43
4.8 Aufgaben	44
<b>5 Bewegung und Kraft</b>	<b>48</b>
5.1 Newtons Gesetze	48
5.2 Federkräfte und Reibungskräfte	53
5.3 Wechsel des Bezugssystems	57
5.4 Zusammenfassung	60
5.5 Aufgaben	61
<b>6 Arbeit, Energie und Leistung</b>	<b>63</b>
6.1 Arbeit	63
6.2 Arbeit und Energie	67
6.3 Leistung und Wirkungsgrad	75
6.4 Zusammenfassung	76
6.5 Aufgaben	78

<b>7</b>	<b>Impuls und Mehrkörperprobleme</b> . . . . .	79
	7.1 Impuls . . . . .	79
	7.2 Impulserhaltung bei Zweikörpersystemen . . . . .	80
	7.3 Stöße . . . . .	83
	7.4 Zusammenfassung . . . . .	87
	7.5 Aufgaben . . . . .	88
<b>8</b>	<b>Dynamik der Drehbewegung des starren Körpers</b> . . . . .	90
	8.1 Winkelgrößen als Vektoren . . . . .	90
	8.2 Grundgesetz der Dynamik für Drehungen . . . . .	95
	8.3 Arbeit, Energie und Leistung . . . . .	102
	8.4 Trägheitskräfte in rotierenden Bezugssystemen . . . . .	106
	8.5 Statisches Gleichgewicht . . . . .	110
	8.6 Drehimpulserhaltungssatz . . . . .	112
	8.7 Die Hauptachsen starrer Körper . . . . .	113
	8.8 Kreisel . . . . .	115
	8.9 Zusammenfassung . . . . .	118
	8.10 Aufgaben . . . . .	119
<b>9</b>	<b>Gravitation</b> . . . . .	122
	9.1 Kepler'sche Gesetze . . . . .	122
	9.2 Newtons Gravitationsgesetz . . . . .	123
	9.3 Herleitung der Kepler'schen Gesetze . . . . .	124
	9.4 Gravitationsfeld . . . . .	125
	9.5 Zusammenfassung . . . . .	127
	9.6 Aufgaben . . . . .	127
<b>II</b>	<b>Elastomechanik und Hydrodynamik</b>	<b>129</b>
<b>10</b>	<b>Elastizität fester Körper</b> . . . . .	130
	10.1 Grundbegriffe . . . . .	130
	10.2 Einfache Verformungen . . . . .	131
	10.3 Zusammenfassung . . . . .	139
	10.4 Aufgaben . . . . .	140
<b>11</b>	<b>Eigenschaften von Flüssigkeiten und Gasen</b> . . . . .	141
	11.1 Grundbegriffe . . . . .	141
	11.2 Ruhende Flüssigkeiten und Gase: Hydrostatik . . . . .	141
	11.3 Stationäre Strömungen: Hydrodynamik . . . . .	147
	11.4 Stationäre Strömungen mit Reibung . . . . .	155
	11.5 Zusammenfassung . . . . .	158
	11.6 Aufgaben . . . . .	159
<b>III</b>	<b>Schwingungen und Wellen</b>	<b>163</b>
<b>12</b>	<b>Schwingungen</b> . . . . .	164
	12.1 Periodische Zustandsänderungen, insbesondere harmonische Schwingungen . . . . .	164
	12.2 Harmonische Oszillatoren . . . . .	166
	12.3 Viskos gedämpfte Schwingungen . . . . .	173
	12.4 Erzwungene Schwingungen, Resonanz . . . . .	176
	12.5 Überlagerung von Schwingungen und gekoppelte Schwingungen . . . . .	180
	12.6 Zusammenfassung . . . . .	182
	12.7 Aufgaben . . . . .	185

<b>13</b>	<b>Mechanische Wellen und Akustik</b> . . . . .	190
13.1	Wellengleichung; Ausbreitung von Störungen . . . . .	190
13.2	Harmonische Wellen . . . . .	196
13.3	Energietransport in Schallwellen . . . . .	200
13.4	Reflexion von Wellen . . . . .	204
13.5	Stehende Wellen in einseitig begrenzten Medien . . . . .	206
13.6	Tonhöhe und Lautstärke . . . . .	209
13.7	Doppler-Effekt, Mach-Welle . . . . .	210
13.8	Interferenz von Wellen . . . . .	214
13.9	Beugung und Huygens'sches Prinzip . . . . .	221
13.10	Reflexion und Brechung von Wellen . . . . .	227
13.11	Ultraschall . . . . .	229
13.12	Zusammenfassung . . . . .	230
13.13	Aufgaben . . . . .	234
<b>14</b>	<b>Lichtwellen und Optik</b> . . . . .	239
14.1	Elektromagnetische Wellen und Licht . . . . .	239
14.2	Reflexion und Transmission elektromagnetischer Wellen . . . . .	242
14.3	Dispersion und Absorption elektromagnetischer Wellen . . . . .	245
14.4	Spektralzerlegung durch Prisma und Beugungsgitter . . . . .	246
14.5	Interferometrie . . . . .	247
14.6	Lichtleiter . . . . .	248
14.7	Linsen . . . . .	250
14.8	Zusammenfassung . . . . .	254
14.9	Aufgaben . . . . .	256
<b>IV</b>	<b>Elektrodynamik</b> . . . . .	<b>259</b>
<b>15</b>	<b>Elektrostatik</b> . . . . .	260
15.1	Elektrische Ladung . . . . .	260
15.2	Coulomb'sches Gesetz und Elektrische Feldstärke . . . . .	262
15.3	Elektrische Spannung und elektrisches Potenzial . . . . .	265
15.4	Ladungsverteilung . . . . .	271
15.5	Verschiebungsdichte und Verschiebungsfluss . . . . .	272
15.6	Influenz . . . . .	279
15.7	Kapazität . . . . .	280
15.8	Dielektrikum im elektrischen Feld . . . . .	283
15.9	Energie im elektrischen Feld . . . . .	288
15.10	Zusammenfassung . . . . .	290
15.11	Aufgaben . . . . .	291
<b>16</b>	<b>Das stationäre elektrische Strömungsfeld</b> . . . . .	294
16.1	Elektrischer Strom . . . . .	294
16.2	Ohm'sches Gesetz . . . . .	297
16.3	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes . . . . .	299
16.4	Leistung und Arbeit . . . . .	301
16.5	Einführung in die Gleichstromtechnik . . . . .	302
16.6	Zusammenfassung . . . . .	310
16.7	Aufgaben . . . . .	312
<b>17</b>	<b>Magnetostatik</b> . . . . .	314
17.1	Grundlegende Erscheinungen . . . . .	314
17.2	Magnetische Induktion und magnetischer Fluss . . . . .	316

17.3	Magnetische Feldstärke und Durchflutungssatz . . . . .	317
17.4	Magnetisches Moment . . . . .	320
17.5	Kraftwirkung auf bewegte Ladungen im magnetischen Feld . . . . .	322
17.6	Magnetische Polarisaton . . . . .	326
17.7	Zusammenfassung . . . . .	328
17.8	Aufgaben . . . . .	329
<b>18</b>	<b>Instationäre elektromagnetische Felder . . . . .</b>	<b>331</b>
18.1	Induktionsgesetz . . . . .	331
18.2	Selbstinduktion und Selbstinduktivität . . . . .	337
18.3	Der magnetische Kreis . . . . .	339
18.4	Energie des magnetischen Feldes . . . . .	342
18.5	Maxwell'sche Gleichungen . . . . .	344
18.6	Zusammenfassung . . . . .	345
18.7	Aufgaben . . . . .	346
<b>V</b>	<b>Thermodynamik . . . . .</b>	<b>349</b>
<b>19</b>	<b>Gleichgewicht und Zustandsgrößen . . . . .</b>	<b>350</b>
19.1	Überblick . . . . .	350
19.2	Systeme, Phasen und Zustandsgrößen . . . . .	352
19.3	Gleichgewicht und Temperatur – Nullter Hauptsatz . . . . .	354
19.4	Absolute Temperatur, Kelvin- und Celsius-Skala . . . . .	357
19.5	Druck . . . . .	359
19.6	Ideales Gas . . . . .	360
19.7	Stoffmenge und Avogadrokonstante . . . . .	363
19.8	Kinetische Theorie des idealen Gases . . . . .	367
19.9	Zustandsgleichung realer Gase . . . . .	370
19.10	Zustandsgleichung für Flüssigkeiten und Festkörper . . . . .	372
19.11	Zusammenfassung . . . . .	375
19.12	Aufgaben . . . . .	376
<b>20</b>	<b>Energieformen und Zustandsänderungen . . . . .</b>	<b>378</b>
20.1	Arbeit . . . . .	378
20.2	Wärme und Wärmekapazität . . . . .	379
20.3	Erzeugung von Wärme . . . . .	387
20.4	Reversible und irreversible Prozesse . . . . .	391
20.5	Spezielle Zustandsänderungen . . . . .	393
20.6	Zusammenfassung . . . . .	394
20.7	Aufgaben . . . . .	396
<b>21</b>	<b>Thermodynamische Hauptsätze . . . . .</b>	<b>397</b>
21.1	Nullter Hauptsatz . . . . .	397
21.2	Erster Hauptsatz . . . . .	397
21.3	Carnot'scher Kreisprozess und Entropie . . . . .	402
21.4	Zweiter Hauptsatz . . . . .	409
21.5	Entropie – mikroskopisch betrachtet . . . . .	410
21.6	Abgeschlossenes System im Gleichgewicht . . . . .	411
21.7	Thermodynamische Maschinen . . . . .	413
21.8	Zusammenfassung . . . . .	418
21.9	Aufgaben . . . . .	419

---

<b>22</b>	<b>Nichtgleichgewichtsprozesse</b> . . . . .	421
22.1	Temperaturausgleich . . . . .	421
22.2	Wärmeübertragung . . . . .	424
22.3	Zusammengesetzte Wärmeübertragung . . . . .	430
22.4	Zusammenfassung . . . . .	433
22.5	Aufgaben . . . . .	434
<b>23</b>	<b>Phasenumwandlungen</b> . . . . .	436
23.1	Aggregatzustände und Phasenübergänge . . . . .	436
23.2	Klassifikation von Phasenübergängen . . . . .	439
23.3	Phasengleichgewicht . . . . .	441
23.4	Beispiele für Phasenübergänge . . . . .	442
23.5	Zusammenfassung . . . . .	444
23.6	Aufgaben . . . . .	444
	<b>Lösungen der Aufgaben</b> . . . . .	445
	<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	452

# Verzeichnis der Beispiele

1.1	Rechnen mit Größengleichungen	3
1.2	Standardabweichung des Mittelwertes	4
3.1	Durchschnittsgeschwindigkeit eines ICE	11
3.2	Durchschnittsbeschleunigung eines ICE	14
3.3	Berechnung von $\Delta x$ aus der Fläche unter $v(t)$	16
3.4	Überholen von Fahrzeugen	17
3.5	Bremsweg und Verzögerung eines PKW	19
3.6	Hochspringer	21
4.1	Weitspringer	36
4.2	Kugelstoßer	36
4.3	Bahnkurve eines Wasserstrahls	36
4.4	Radialbeschleunigung bei einer Langspielplatte	40
4.5	Drehbewegung mit verschiedenen Winkelbeschleunigungen	41
4.6	Geschwindigkeit eines Randpunktes beim rollenden Rad	43
5.1	Gleiter auf Luftkissenbahn	49
5.2	Aufprall gegen ein Hindernis	49
5.3	Gewichtheber	51
5.4	Bewegung auf der schiefen Ebene	52
5.5	3. Newton'sches Gesetz	53
5.6	Verknüpfung von zwei Federn	54
5.7	Reibung auf der schiefen Ebene	56
5.8	Gehen	56
5.9	Antriebskraft bei Radfahrzeugen	56
5.10	Trägheitskraft beim Anfahren	59
5.11	Kräftegleichgewicht im beschleunigten System	59
5.12	Atwood-Maschine mit trägheitsloser Rolle	59
6.1	Reibungsarbeit	64
6.2	Hubarbeit	64
6.3	Verformungsarbeit	65
6.4	Fall eines Balls mit Reflexion am Boden	68
6.5	Beschleunigungsarbeit	70
6.6	Federkraft	72
6.7	Energieerhaltung bei Federn	73
6.8	Rutschen eines Schlittens auf einer schiefen Ebene mit Reibung	75
6.9	Leistung eines PKW	76
7.1	Zwei Gleiter auf der Luftkissenfahrbahn	82
7.2	Der steinschleudernde Astronaut	82
7.3	Fall mit anschließendem Stoß von zwei Kugeln	84
7.4	Ballistisches Pendel	86
8.1	Rad auf Kreisbahn	92
8.2	Fortsetzung – Rad auf Kreisbahn	94
8.3	Kräftepaar	96
8.4	Massenträgheitsmoment einer halbkreisförmigen Scheibe	100
8.5	Trägheitsmoment einer Hantel	101
8.6	Atwood-Maschine	102
8.7	Bestimmung von Drehmoment und Leistung mit dem Prony'schen Zaum	103
8.8	Energie eines Schwungrades	104
8.9	Rollende Körper auf einer schiefen Ebene	105

8.10	Ultrazentrifuge . . . . .	107
8.11	Überhöhte Eisenbahnkurve . . . . .	108
8.12	Kugel in einer rotierenden Kreisrinne . . . . .	108
8.13	Gleichgewicht einer Hantel . . . . .	111
8.14	Drehstuhlexperiment 1 . . . . .	112
8.15	Drehstuhlexperiment 2 . . . . .	113
8.16	Scheibe auf einer Kreisbahn . . . . .	117
9.1	Masse der Sonne . . . . .	124
9.2	Fluchtgeschwindigkeit . . . . .	126
10.1	Dehnung eines Drahtes . . . . .	133
10.2	Deformation eines Gummiwürfels . . . . .	135
10.3	Torsion eines Drahtes . . . . .	137
11.1	Wasser im Schwerfeld an der Erdoberfläche . . . . .	144
11.2	Füllstandsanzeiger und U-Rohr-Manometer . . . . .	145
11.3	Senkwaage . . . . .	146
11.4	Geschwindigkeitsbestimmung mit dem Prandtl'schen Staurohr . . . . .	152
11.5	Schmierung . . . . .	157
12.1	Die Dreh- oder Torsionsschwingung (Unruh einer Uhr) . . . . .	170
12.2	Das (mathematische) Schwerependel . . . . .	170
12.3	Das physikalische Pendel . . . . .	171
12.4	Zeigerinstrument . . . . .	176
12.5	Erzwungene Schwingungen in der Technik . . . . .	177
13.1	Transversale Welle auf einem elastischen Seil . . . . .	195
13.2	Longitudinale Welle längs eines elastischen Stabes . . . . .	196
13.3	Schallwelle in einer Gas- oder Flüssigkeitssäule . . . . .	196
13.4	Phasendifferenz bei einer harmonischen Welle . . . . .	198
13.5	Auslenkungsamplitude von Luftmolekülen in einer Schallwelle . . . . .	203
13.6	Schallpegel einer Schallwelle . . . . .	210
13.7	Dopplereffekt eines hupenden, fahrenden Fahrzeuges . . . . .	213
13.8	Richtung der Auslöschung, Verstärkung . . . . .	220
15.1	Elektrische Feldstärke als Gradient der Potenzialfunktion einer Punktladung . . . . .	270
15.2	Verschiebungsdichte und elektrische Feldstärke einer leitenden Kugel . . . . .	276
15.3	Verschiebungsdichte und elektrische Feldstärke einer Koaxialleitung . . . . .	277
15.4	Influenz im Plattenkondensator . . . . .	280
15.5	Kapazität eines Kugelkondensators mit konzentrischen Kugelelektroden . . . . .	286
15.6	Kapazität einer Koaxialleitung . . . . .	288
16.1	Driftgeschwindigkeit der Elektronen in einem Metalldraht . . . . .	296
16.2	Widerstand und Temperaturkoeffizient eines Metallwiderstandes bei verschiedenen Temperaturen . . . . .	300
16.3	Ströme und Spannungen in einem Gleichstromkreis . . . . .	308
16.4	Leistungen in einem Gleichstromkreis mit realer Spannungsquelle . . . . .	309
17.1	Toroidspule mit Materiefüllung . . . . .	319
17.2	Magnetische Induktion einer langen Zylinderspule . . . . .	320
17.3	Magnetisches Moment einer langen Zylinderspule . . . . .	322
17.4	Zeigerausschlag eines Drehspulmesswerkes . . . . .	324
17.5	Kraft zwischen den Drähten einer zweiadrigen Leitung . . . . .	325
18.1	Rotierende Leiterschleife im homogenen Magnetfeld . . . . .	336
18.2	Einschaltstrom bei Spulen . . . . .	338
18.3	Induktivität einer langen Zylinderspule . . . . .	341
18.4	Toroidspule mit zwei Wicklungen als Transformator . . . . .	341
18.5	Magnetische Energie einer Toroidspule . . . . .	343

19.1	Bestimmung von Stoffmengen . . . . .	364
19.2	Abhängigkeit der Dichte von Temperatur und Druck . . . . .	365
19.3	Dichte von Helium bei Normbedingungen . . . . .	365
19.4	Barometrische Höhenformel und Boltzmannfaktor . . . . .	365
19.5	Mittlere quadratische Geschwindigkeit von $H_2$ . . . . .	370
19.6	Plasmaphase von $H_2$ . . . . .	370
20.1	Wärmeerzeugung mit einem Tauchsieder . . . . .	388
20.2	Abwärme eines Widerstandes . . . . .	388
20.3	Abstoppen einer Kugel im Sandsack . . . . .	388
20.4	Kohlefeuerung . . . . .	390
20.5	Aufwärmung einer Platte in der Sonne . . . . .	390
20.6	Isotherme Expansion . . . . .	392
20.7	Arbeit eines idealen Gases . . . . .	394
21.1	Innere Energie und geleistete Arbeit bei Zustandsänderung des idealen Gases . . . . .	399
21.2	Adiabatengleichung eines idealen Gases . . . . .	400
21.3	Entropie eines idealen Gases . . . . .	406
21.4	Zimmerheizung . . . . .	417
22.1	Mischungstemperatur bei kleinem $\Delta T$ . . . . .	423
22.2	Abkühlung eines Metallwerkstücks in Luft . . . . .	427
22.3	Wärmedurchgang . . . . .	432
22.4	Wärmeleitung durch eine Wand mit mehreren Schichten . . . . .	432
23.1	Erwärmung eines Eisblocks . . . . .	436