

# Inhaltsverzeichnis

---

## I Physikalische Größen und Messungen

1	<b>Physikalische Größen und Messungen</b> .....	3
1.1	Vom Wesen der Physik .....	5
1.2	Maßeinheiten .....	7
1.3	Dimensionen physikalischer Größen .....	11
1.4	Signifikante Stellen und Größenordnungen .....	13
1.5	Messgenauigkeit und Messfehler .....	16
	Im Kontext: Naturkonstanten und das Internationale Einheitensystem (SI) .....	25
	Zusammenfassung .....	27
	Aufgaben .....	28

## II Mechanik

2	<b>Mechanik von Massenpunkten</b> .....	33
2.1	Verschiebung .....	35
2.2	Geschwindigkeit .....	37
2.3	Beschleunigung .....	49
2.4	Gleichförmig beschleunigte Bewegung in einer Dimension .....	53
2.5	Gleichförmig beschleunigte Bewegung in mehreren Dimensionen .....	62
	Im Kontext: Nutzung von GNSS in der Landwirtschaft – der Schlüssel zu Precision Farming, Smart Farming und Digital Farming .....	72
	Zusammenfassung .....	74
	Aufgaben .....	75
3	<b>Die Newton'schen Axiome</b> .....	79
3.1	Das erste Newton'sche Axiom: Das Trägheitsgesetz .....	81
3.2	Kraft und Masse .....	82
3.3	Das zweite Newton'sche Axiom .....	86
3.4	Gravitationskraft und Gewicht .....	89
3.5	Kräftediagramme und ihre Anwendung .....	90
3.6	Das dritte Newton'sche Axiom .....	96
3.7	Kräfte bei der Kreisbewegung .....	96
	Im Kontext: Achterbahnen auf Geschwindigkeitsjagd .....	102
	Zusammenfassung .....	103
	Aufgaben .....	104
4	<b>Weitere Anwendungen der Newton'schen Axiome</b> .....	107
4.1	Reibung .....	109
4.2	Widerstandskräfte .....	119
4.3	Trägheits- oder Scheinkräfte .....	123
4.4	Die Gravitationskraft und die Kepler'schen Gesetze .....	128
4.5	Das Gravitationsfeld .....	138
	Im Kontext: Bremsenquietschen und Erdbeben – Probleme von Reibungsinstabilitäten ..	145
	Zusammenfassung .....	146
	Aufgaben .....	147
5	<b>Energie und Arbeit</b> .....	151
5.1	Arbeit .....	153
5.2	Leistung .....	161
5.3	Kinetische Energie .....	162

5.4	<b>Potenzielle Energie</b> .....	167
5.5	<b>Energieerhaltung</b> .....	175
	Im Kontext: Pumpspeicherwerk (PSpKW) – Energie auf Abruf im Kontext	
	der Energiewende .....	187
	Zusammenfassung .....	189
	Aufgaben .....	190
6	<b>Der Impuls</b> .....	193
6.1	<b>Impulserhaltung</b> .....	195
6.2	<b>Stoßarten</b> .....	199
6.3	<b>Kraftstoß und zeitliches Mittel der Kraft</b> .....	200
6.4	<b>Inelastische Stöße</b> .....	203
6.5	<b>Elastische Stöße</b> .....	205
	Im Kontext: Der Impuls im Fahrzeugcrash .....	212
	Zusammenfassung .....	214
	Aufgaben .....	215
7	<b>Teilchensysteme</b> .....	219
7.1	<b>Mehrkörperprobleme</b> .....	221
7.2	<b>Der Massenmittelpunkt</b> .....	224
7.3	<b>Massenmittelpunktsbewegung und Impulserhaltung</b> .....	230
7.4	<b>Massenmittelpunktsarbeit und Energieerhaltung</b> .....	233
7.5	<b>*Stöße im Schwerpunktsystem</b> .....	238
7.6	<b>Systeme mit veränderlicher Masse und Strahltriebwerk</b> .....	240
	Im Kontext: Neuheiten bei Strahltriebwerken .....	245
	Zusammenfassung .....	248
	Aufgaben .....	249
8	<b>Drehbewegungen</b> .....	253
8.1	<b>Kinematik der Drehbewegung: Winkelgeschwindigkeit und Winkelbeschleunigung</b> ..	255
8.2	<b>Die kinetische Energie der Drehbewegung</b> .....	260
8.3	<b>Berechnung von Trägheitsmomenten</b> .....	261
8.4	<b>Das Drehmoment</b> .....	269
8.5	<b>Gleichgewicht und Stabilität</b> .....	279
8.6	<b>Der Drehimpuls</b> .....	283
8.7	<b>Die Drehimpulserhaltung</b> .....	290
8.8	<b>Rollende Körper</b> .....	296
8.9	<b>Der Kreisel</b> .....	302
	Im Kontext: Die Kunst, Pulsare zu recyceln .....	306
	Zusammenfassung .....	308
	Aufgaben .....	310
9	<b>Mechanik deformierbarer Körper</b> .....	315
9.1	<b>Spannung und Dehnung</b> .....	317
9.2	<b>Kompression</b> .....	320
9.3	<b>Scherung</b> .....	321
9.4	<b>Zusammenhang zwischen <math>E</math>, <math>K</math>, <math>G</math> und <math>\mu</math></b> .....	322
9.5	<b>Elastische Energie und Hysterese</b> .....	324
9.6	<b>Biegung</b> .....	324
	Im Kontext: Kohlenstoffnanoröhrchen: Klein und kräftig .....	331
	Zusammenfassung .....	333
	Aufgaben .....	334
10	<b>Fluide</b> .....	337
10.1	<b>Dichte</b> .....	339
10.2	<b>Druck in einem Fluid</b> .....	341

10.3	<b>Auftrieb und archimedisches Prinzip</b>	348
10.4	<b>Molekulare Phänomene</b>	353
10.5	<b>Bewegte Fluide ohne Reibung</b>	354
10.6	<b>Bewegte Fluide mit Reibung</b>	361
10.7	<b>*Turbulenz</b>	367
	Im Kontext: Coil-Rope-Effekt – Weshalb sich Honig wickelt wie ein Seil	370
	Zusammenfassung	372
	Aufgaben	374

### **III Schwingungen und Wellen**

11	<b>Schwingungen</b>	379
11.1	<b>Harmonische Schwingungen</b>	381
11.2	<b>Energie des harmonischen Oszillators</b>	388
11.3	<b>Beispiele für schwingende Systeme</b>	391
11.4	<b>Gedämpfte Schwingungen</b>	401
11.5	<b>Erzwungene Schwingungen und Resonanz</b>	406
	Im Kontext: Erdbebengerechtes Bauen in Japan – Von der Pagode zum Hochhaus	413
	Zusammenfassung	415
	Aufgaben	416
12	<b>Wellen</b>	421
12.1	<b>Einfache Wellenbewegungen</b>	423
12.2	<b>Periodische Wellen, harmonische Wellen</b>	431
12.3	<b>Energietransport und Intensität</b>	435
12.4	<b>Der Doppler-Effekt</b>	440
12.5	<b>Wellenausbreitung an Hindernissen</b>	445
12.6	<b>Überlagerung von Wellen</b>	452
12.7	<b>Stehende Wellen</b>	460
12.8	<b>*Harmonische Zerlegung und Wellenpakete</b>	468
	Im Kontext: Die Physik der Musikinstrumente	474
	Zusammenfassung	476
	Aufgaben	480

### **IV Thermodynamik**

13	<b>Temperatur und der Nullte Hauptsatz der Thermodynamik</b>	487
13.1	<b>Temperatur und der Nullte Hauptsatz</b>	489
13.2	<b>Temperaturmessgeräte und Temperaturskalen</b>	490
13.3	<b>Thermische Ausdehnung</b>	494
	Im Kontext: Negative absolute Temperaturen	499
	Zusammenfassung	500
	Aufgaben	501
14	<b>Die kinetische Gastheorie</b>	503
14.1	<b>Die Zustandsgleichung für das ideale Gas</b>	505
14.2	<b>Druck und Teilchengeschwindigkeit</b>	511
14.3	<b>Der Gleichverteilungssatz</b>	517
14.4	<b>Die mittlere freie Weglänge</b>	517
14.5	<b>*Die Van-der-Waals-Gleichung und Flüssigkeits-Dampf-Isothermen</b>	519
	Im Kontext: Stau – Ein Beispiel für ein Vielteilchensystem	522
	Zusammenfassung	525
	Aufgaben	526

15	<b>Wärme und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik</b>	529
15.1	Wärmekapazität und spezifische Wärmekapazität	531
15.2	Phasenübergänge und latente Wärme	534
15.3	Phasendiagramme	536
15.4	Joules Experiment und der Erste Hauptsatz der Thermodynamik	537
15.5	Die innere Energie eines idealen Gases	539
15.6	Volumenarbeit und das $p$ - $V$ -Diagramm eines Gases	540
15.7	Wärmekapazitäten von Festkörpern	544
15.8	Wärmekapazitäten von Gasen	545
15.9	Die reversible adiabatische Expansion eines Gases	550
	Im Kontext: Bleibt bei der Expansion des Universums die Gesamtenergie erhalten?	554
	Zusammenfassung	556
	Aufgaben	558
16	<b>Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik</b>	561
16.1	Wärmekraftmaschinen und der Zweite Hauptsatz	563
16.2	Kältemaschinen und der Zweite Hauptsatz	568
16.3	Der Carnot'sche Kreisprozess	570
16.4	*Wärmepumpen	575
16.5	Irreversibilität, Unordnung und Entropie	576
16.6	Entropie und die Verfügbarkeit der Energie	582
16.7	Entropie und Wahrscheinlichkeit	582
16.8	*Der Dritte Hauptsatz	583
	Im Kontext: Der Zweite Hauptsatz der Thermodynamik – warum es kein Patent auf ein Perpetuum mobile geben kann	585
	Zusammenfassung	587
	Aufgaben	588
17	<b>Wärmeübertragung</b>	591
17.1	Wärmeübertragungsarten	593
17.2	Wärmeleitung	593
17.3	Konvektion	599
17.4	Wärmestrahlung	599
	Im Kontext: Die städtische Wärmeinsel	602
	Zusammenfassung	604
	Aufgaben	605

## V Elektrizität und Magnetismus

18	<b>Das elektrische Feld I: Diskrete Ladungsverteilungen</b>	609
18.1	Die elektrische Ladung	611
18.2	Leiter und Nichtleiter	614
18.3	Das Coulomb'sche Gesetz	615
18.4	Das elektrische Feld	619
18.5	Elektrische Feldlinien	627
18.6	Wirkung von elektrischen Feldern auf Ladungen	631
	Im Kontext: Das elektrische Feld und die Verbrechensaufklärung	637
	Zusammenfassung	639
	Aufgaben	640
19	<b>Das elektrische Feld II: Kontinuierliche Ladungsverteilungen</b>	643
19.1	Das Konzept der Ladungsdichte	645
19.2	Berechnung von $E$ mit dem Coulomb'schen Gesetz	645
19.3	Das Gauß'sche Gesetz	651
19.4	Berechnung von $E$ mit dem Gauß'schen Gesetz	655
19.5	Diskontinuität von $E_n$	660

19.6	<b>Ladung und Feld auf Leiteroberflächen</b> .....	661
19.7	*Die Äquivalenz des Gauß'schen und des Coulomb'schen Gesetzes.....	664
	Im Kontext: Warum Gewitter nicht überall gleich häufig auftreten .....	666
	Zusammenfassung .....	668
	Aufgaben .....	669
20	<b>Das elektrische Potenzial</b> .....	673
20.1	Die Potenzialdifferenz.....	675
20.2	Das Potenzial eines Punktladungssystems .....	678
20.3	Die Berechnung des elektrischen Felds aus dem Potenzial .....	684
20.4	Die Berechnung des elektrischen Potenzials $\phi$ kontinuierlicher Ladungsverteilungen .	687
20.5	Äquipotenzialflächen .....	695
20.6	Die elektrische Energie .....	701
	Im Kontext: Blitze am Saturn .....	704
	Zusammenfassung .....	706
	Aufgaben .....	708
21	<b>Die Kapazität</b> .....	711
21.1	Die Kapazität .....	713
21.2	Speicherung elektrischer Energie.....	717
21.3	Kondensatoren, Batterien und elektrische Stromkreise .....	721
21.4	Dielektrika .....	729
21.5	Molekulare Betrachtung von Dielektrika.....	735
	Im Kontext: „Kapazität“ – von der Schwierigkeit, elektrische Energie zu speichern .....	740
	Zusammenfassung .....	742
	Aufgaben .....	743
22	<b>Elektrischer Strom – Gleichstromkreise</b> .....	747
22.1	Elektrischer Strom und die Bewegung von Ladungsträgern .....	749
22.2	Widerstand und Ohm'sches Gesetz .....	753
22.3	Energetische Betrachtung elektrischer Stromkreise .....	757
22.4	Zusammenschaltung von Widerständen.....	762
22.5	Die Kirchhoff'schen Regeln .....	768
22.6	<b>RC-Stromkreise</b> .....	778
	Im Kontext: Elektromobilität – ein Thema in Bewegung .....	785
	Zusammenfassung .....	787
	Aufgaben .....	788
23	<b>Das Magnetfeld</b> .....	793
23.1	Die magnetische Kraft .....	795
23.2	Die Bewegung einer Punktladung in einem Magnetfeld.....	801
23.3	Das auf Leiterschleifen und Magnete ausgeübte Drehmoment .....	809
23.4	*Der Hall-Effekt .....	813
	Im Kontext: Wie geomagnetische Stürme die Orientierung von Pottwalen stören können	817
	Zusammenfassung .....	819
	Aufgaben .....	820
24	<b>Quellen des Magnetfelds</b> .....	823
24.1	Das Magnetfeld bewegter Punktladungen .....	825
24.2	Das Magnetfeld von Strömen: Das Biot-Savart'sche Gesetz .....	826
24.3	Der Gauß'sche Satz für Magnetfelder .....	841
24.4	Das Ampère'sche Gesetz .....	842
24.5	<b>Magnetismus in Materie</b> .....	847
	Im Kontext: Magnetfelder für die Forschung .....	857
	Zusammenfassung .....	859
	Aufgaben .....	861

25	<b>Die magnetische Induktion</b>	865
25.1	Der magnetische Fluss	867
25.2	Induktionsspannung und Faraday'sches Gesetz	868
25.3	Die Lenz'sche Regel	872
25.4	Induktion durch Bewegung	876
25.5	Wirbelströme	881
25.6	Induktivität	882
25.7	Die Energie des Magnetfelds	884
25.8	RL-Stromkreise	886
	Im Kontext: Energiesparen mit dem Induktionsherd	890
	Zusammenfassung	892
	Aufgaben	893
26	<b>Wechselstromkreise</b>	897
26.1	Wechselspannung an einem Ohm'schen Widerstand	899
26.2	Wechselstromkreise	902
26.3	Der Transformator	905
26.4	LC- und RLC-Stromkreise ohne Wechselspannungsquelle	908
26.5	*Zeigerdiagramme	913
26.6	*Erzwungene Schwingungen in RLC-Stromkreisen	914
	Im Kontext: Smart Grids – Herausforderungen an das Stromnetz durch die Energiewende	922
	Zusammenfassung	924
	Aufgaben	925
27	<b>Die Maxwell'schen Gleichungen – Elektromagnetische Wellen</b>	931
27.1	Der Maxwell'sche Verschiebungsstrom	933
27.2	Die Maxwell'schen Gleichungen	936
27.3	Die Wellengleichung für elektromagnetische Wellen	937
27.4	Elektromagnetische Strahlung	941
	Im Kontext: Kreisel im Magnetfeld	951
	Zusammenfassung	952
	Aufgaben	953

## VI Optik

28	<b>Eigenschaften des Lichts</b>	957
28.1	Die Lichtgeschwindigkeit	959
28.2	Die Ausbreitung des Lichts	962
28.3	Reflexion und Brechung	962
28.4	*Herleitung des Reflexions- und des Brechungsgesetzes	972
28.5	Polarisation	975
28.6	Lichtspektren	982
	Im Kontext: Licht als Werkzeug in der Biophysik	984
	Zusammenfassung	986
	Aufgaben	987
29	<b>Geometrische Optik</b>	991
29.1	Spiegel	992
29.2	Linsen	1002
29.3	Abbildungsfehler	1015
29.4	Optische Instrumente	1016
	Im Kontext: Hieroglyphen aus Licht	1024
	Zusammenfassung	1026
	Aufgaben	1028

## Inhaltsverzeichnis

30	<b>Interferenz und Beugung</b>	1033
30.1	Phasendifferenz und Kohärenz	1035
30.2	Interferenz an dünnen Schichten	1036
30.3	Interferenzmuster beim Doppelspalt	1039
30.4	Beugungsgitter	1042
30.5	Fraunhofer'sche und Fresnel'sche Beugung	1044
30.6	Beugungsmuster beim Einzelpunkt	1046
30.7	*Vektoraddition harmonischer Wellen	1050
30.8	Beugung und Auflösung	1056
	Im Kontext: Interferenz in der optischen Messtechnik	1060
	Zusammenfassung	1062
	Aufgaben	1063

**VII Einstein's Relativitätstheorien**

31	<b>Die Relativitätstheorien</b>	1069
31.1	Das Relativitätsprinzip	1071
31.2	Die Einstein'schen Postulate	1072
31.3	Die Lorentz-Transformation	1073
31.4	Uhrensynchronisation und Gleichzeitigkeit	1080
31.5	Die Geschwindigkeitstransformation	1086
31.6	*Der relativistische Impuls	1089
31.7	*Die relativistische Energie	1091
31.8	*Minkowski-Diagramme	1096
31.9	*Die allgemeine Relativitätstheorie	1098
	Im Kontext: Die Glocken des Universums – Neutronensterne und Schwarze Löcher	1102
	Zusammenfassung	1105
	Aufgaben	1107

**VIII Quantenmechanik**

32	<b>Einführung in die Quantenphysik</b>	1111
32.1	Wellen und Teilchen	1113
32.2	Licht als Teilchen: Photonen	1113
32.3	Teilchen als Materiewellen	1118
32.4	Die Schrödinger-Gleichung	1121
32.5	Der Welle-Teilchen-Dualismus	1124
32.6	*Erwartungswerte und klassischer Grenzfall	1125
	Im Kontext: Zwischen Quantenmechanik und klassischer Mechanik	1130
	Zusammenfassung	1131
	Aufgaben	1132
33	<b>Anwendungen der Schrödinger-Gleichung</b>	1135
33.1	Ein Teilchen im Kasten mit unendlich hohem Potenzial	1137
33.2	Ein Teilchen im Kasten mit endlich hohem Potenzial	1140
33.3	Der harmonische Oszillator	1142
33.4	Reflexion und Transmission von Elektronenwellen an Potenzialbarrieren	1145
33.5	*Die Schrödinger-Gleichung in drei Dimensionen	1150
33.6	Die Schrödinger-Gleichung für zwei identische Teilchen	1153
	Im Kontext: Spinnetzwerke und -schäume: Auf der Suche nach einer Quantisierung der Relativitätstheorie	1155
	Zusammenfassung	1157
	Aufgaben	1158

**IX Atome und Moleküle**

34	<b>Atome</b>	1163
34.1	Das Atom und die Atomspektren	1165
34.2	Das Bohr'sche Modell des Wasserstoffatoms	1166
34.3	Quantentheorie der Atome	1170
34.4	Quantentheorie des Wasserstoffatoms	1172
34.5	*Spin-Bahn-Kopplung und Feinstruktur	1179
34.6	Das Periodensystem der Elemente	1181
34.7	Spektren im sichtbaren und im Röntgenbereich	1190
34.8	Laser	1194
	Im Kontext: Superschwere Elemente	1198
	Zusammenfassung	1200
	Aufgaben	1202
35	<b>Moleküle</b>	1205
35.1	Die chemische Bindung	1206
35.2	*Mehratomige Moleküle	1213
35.3	*Energieniveaus und Spektren zweiatomiger Moleküle	1215
35.4	*Freiheitsgrade und der Gleichverteilungssatz	1221
	Im Kontext: Molekülschwingungen und Infrarotspektroskopie	1225
	Zusammenfassung	1227
	Aufgaben	1228

**X Festkörperphysik**

36	<b>Festkörper</b>	1233
36.1	Die Struktur von Festkörpern	1234
36.2	Kristallgitter	1234
36.3	Streuung an periodischen Strukturen	1238
	Im Kontext: Die Wunderwelt des Kohlenstoffs	1240
	Zusammenfassung	1242
	Aufgaben	1242
37	<b>Elektrische Eigenschaften von Festkörpern</b>	1245
37.1	Eine mikroskopische Betrachtung der elektrischen Leitfähigkeit	1247
37.2	Freie Elektronen im Festkörper	1249
37.3	Die Quantentheorie der elektrischen Leitfähigkeit	1255
37.4	Das Bändermodell der Festkörper	1256
37.5	Halbleiter	1259
37.6	*Halbleiterübergangsschichten und Bauelemente	1260
37.7	*Supraleitung	1265
37.8	*Die Fermi-Dirac-Verteilung	1268
	Im Kontext: Supraleitung und Magnetismus	1271
	Zusammenfassung	1272
	Aufgaben	1274

**XI Kern- und Teilchenphysik**

38	<b>Kernphysik</b>	1279
38.1	Eigenschaften der Kerne	1281
38.2	Radioaktivität	1284
38.3	Kernreaktionen	1290
38.4	Kernspaltung und Kernfusion	1292
38.5	Dosimetrie	1299

Im Kontext: Energie aus der Fusion schwerer Wasserstoffkerne – das Großexperiment	
Wendelstein 7-X .....	1302
Zusammenfassung .....	1304
Aufgaben .....	1305
39 <b>*Teilchenphysik</b> .....	1309
39.1 <b>*Hadronen und Leptonen</b> .....	1311
39.2 <b>*Spin und Antiteilchen</b> .....	1313
39.3 <b>*Erhaltungssätze</b> .....	1315
39.4 <b>*Quarks</b> .....	1318
39.5 <b>*Feldquanten</b> .....	1321
39.6 <b>*Die Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung</b> .....	1321
39.7 <b>*Das Standardmodell</b> .....	1323
39.8 <b>*Moderne Teilchenbeschleuniger und Detektoren</b> .....	1324
Im Kontext: Die Suche nach dem Higgs .....	1332
Im Kontext: Auf Neutrinosuche mit dem weltgrößten Eiswürfel .....	1334
Zusammenfassung .....	1336
Aufgaben .....	1337

## XII Anhang

40 <b>Tabellen</b> .....	1341
40.1 <b>Einheiten, Symbole und Umrechnungsfaktoren</b> .....	1342
40.2 <b>Wichtige physikalische Größen und Konstanten</b> .....	1346
40.3 <b>Die chemischen Elemente</b> .....	1350
<b>Serviceteil</b> .....	1353
Stichwortverzeichnis .....	1355