

# Inhaltsverzeichnis

## Felder

<b>ORIENTIERUNG</b> .....	12
<b>1 Elektrische und magnetische Felder</b> .....	14
<b>1.1 Elektrische Ladung und elektrisches Feld</b> .....	14
1.1.1 Elektrisch geladene Körper .....	14
1.1.2 Elektrische Ladung und Stromstärke .....	15
1.1.3 Kräfte zwischen geladenen Körpern .....	16
1.1.4 Elektrisches Feld .....	17
1.1.5 Elektrische Spannung und Energie .....	20
1.1.6 Elektrisches Potenzial .....	22
1.1.7 Kondensatoren .....	24
1.1.8 Kondensatoren in Stromkreisen .....	25
1.1.9 Energie des elektrischen Felds .....	27
1.1.10 Bestimmung der Elementarladung .....	28
1.1.11 Bewegung von Ladungsträgern im elektrischen Feld .....	30
<b>Technik:</b> Faraday'scher Käfig .....	15
<b>Umwelt:</b> Gewitter .....	18
<b>Technik:</b> Fotokopierer .....	23
<b>Technik:</b> Rauchgasreinigung .....	28
<b>Biologie:</b> Signalübertragung durch Nervenfasern .....	32
<b>1.2 Magnetisches Feld</b> .....	33
1.2.1 Felder um stromdurchflossene Leiter .....	33
1.2.2 Magnetische Feldstärke .....	35
1.2.3 Lorentzkraft .....	36
1.2.4 Halleffekt .....	38
1.2.5 Magnetfeld in einer langen Spule .....	39
1.2.6 Materie im magnetischen Feld .....	39
1.2.7 Bestimmung der Masse geladener Teilchen .....	42
<b>Geophysik:</b> Magnetfeld der Erde .....	34
<b>Grundgrößen:</b> Ampere und Elementarladung .....	37
<b>Forschung:</b> Elektromagnetisches Rühren .....	41
<b>Forschung:</b> Massenspektroskopie .....	42
<b>Umwelt:</b> Polarlicht .....	45
<b>Überblick: Elektrische und magnetische Felder</b> .....	48
<b>2 Induktion und Leitungsvorgänge</b> .....	50
<b>2.1 Elektromagnetische Induktion</b> .....	50
2.1.1 Induktionsgesetz .....	50
2.1.2 Folgerungen aus dem Induktionsgesetz .....	53
2.1.3 Selbstinduktion .....	56
2.1.4 Energie des magnetischen Felds .....	59
2.1.5 Wirbelströme .....	59
<b>Technik:</b> Metalldetektoren .....	51
<b>Technik:</b> Zündanlagen .....	57
<b>Technik:</b> Wirbelstrombremsen .....	60
<b>2.2 Wechselstromkreis</b> .....	62
2.2.1 Wechselstrom und Wechselspannung .....	62
2.2.2 Ohm'scher Widerstand .....	64
2.2.3 Nichtohmsche Bauelemente .....	65
2.2.4 Leistung im Wechselstromkreis .....	67
2.2.5 Einfache Schaltungen .....	68
<b>Technik:</b> Drehstrommotor .....	63
<b>Technik:</b> Fernleitung elektrischer Energie .....	65
<b>2.3 Elektrische Leitungsvorgänge</b> .....	71
2.3.1 Halbleiter und Metalle .....	71
2.3.2 Bändermodell der Festkörper .....	71
2.3.3 p- und n-Leitung .....	73
2.3.4 Der p-n-Übergang .....	74
2.3.5 Transistoren .....	78
2.3.6 Integrierte Schaltkreise .....	79
2.3.7 Supraleitung .....	81
2.3.8 Leitung in Flüssigkeiten .....	83
2.3.9 Leitung in Gasen .....	84

<b>Technik:</b> Solarzellen .....	75	<b>Forschung:</b> Nanoteilchen: mesoskopische Systeme .....	86
<b>Technik:</b> Leuchtdioden .....	77		
<b>Technik:</b> Datenspeicher .....	80		
<b>Forschung:</b> Grenzen der Miniaturisierung .....	82	<b>Überblick: Induktion und Leitungsvorgänge</b> .....	90

<b>REFLEXION: FELDER</b> .....	92
--------------------------------	----

## Schwingungen und Wellen

<b>ORIENTIERUNG</b> .....	94
---------------------------	----

<b>3 Schwingungen</b> .....	96	<b>3.3 Schwingungen und Chaos</b> .....	120
<b>3.1 Mechanische Schwingungen</b> .....	96	3.3.1 Deterministisches Chaos .....	120
3.1.1 Kenngrößen und Beschreibung einer Schwingung .....	96	3.3.2 Bifurkation .....	121
3.1.2 Harmonische Schwingungen .....	97	3.3.3 Diagramme chaotischer Schwingungen .....	122
3.1.3 Nichtharmonische Schwingungen .....	100	<b>Überblick: Schwingungen</b> .....	126
3.1.4 Energie harmonischer Schwingungen .....	100	<b>4 Wellen</b> .....	128
3.1.5 Gedämpfte harmonische Schwingungen .....	101	<b>4.1 Mechanische Wellen</b> .....	128
3.1.6 Erzwungene Schwingungen und Resonanz .....	103	4.1.1 Entstehung mechanischer Wellen .....	128
3.1.7 Überlagerung von harmonischen Schwingungen .....	106	4.1.2 Ausbreitung mechanischer Wellen .....	129
<b>Geophysik:</b> Seismometer .....	97	4.1.3 Überlagerung von Wellen .....	131
<b>Bauphysik:</b> Schwingungen von Bauten .....	102	4.1.4 Stehende Wellen .....	133
<b>Verkehr:</b> Schwingungsdämpfer .....	105	4.1.5 Huygens'sches Prinzip .....	135
<b>Tontechnik:</b> Klanganalyse .....	108	4.1.6 Beugung, Reflexion und Brechung .....	137
<b>3.2 Elektromagnetische Schwingungen</b> .....	109	<b>Biologie:</b> Ultraschall bei Tieren .....	129
3.2.1 Schwingungen in einem Schwingkreis .....	109	<b>Umwelt:</b> Meereswellen .....	134
3.2.2 Ungedämpfte Schwingungen .....	110	<b>Geophysik:</b> Seismische Wellen .....	139
3.2.3 Gedämpfte Schwingungen .....	111	<b>4.2 Akustik</b> .....	140
3.2.4 Erzwungene Schwingungen und Resonanz .....	112	4.2.1 Schallsignale .....	140
3.2.5 Rückkopplung .....	115	4.2.2 Ausbreitung des Schalls .....	140
3.2.6 Überlagerung von Schwingungen .....	116	4.2.3 Wahrnehmung des Schalls .....	141
<b>Verkehr:</b> Verkehrssteuerung .....	112	4.2.4 Reflexion von Schallwellen .....	143
<b>Tontechnik:</b> Mikrofon und Lautsprecher .....	114	4.2.5 Brechung, Beugung und Interferenz von Schallwellen .....	144
<b>Zeitmessung:</b> Schwingquarze als Taktgeber .....	117	4.2.6 Dopplereffekt und Überschall .....	145
<b>Rundfunktechnik:</b> Schwingungen in Sendeanlagen .....	119	<b>Musik:</b> Stehende Wellen an Musikinstrumenten .....	142
		<b>Medizin:</b> Sonografie .....	146
		<b>Biologie:</b> Das menschliche Ohr .....	148
		<b>4.3 Elektromagnetische Wellen</b> .....	150
		4.3.1 Entstehung von Radiowellen .....	150

4.3.2	Ausbreitungsgeschwindigkeit von Radiowellen . . . . .	152	<b>Geschichte:</b> Geschichte der Informationsübertragung . . . . .	154
4.3.3	Maxwell'sche Theorie . . . . .	153	<b>Technik:</b> Mikrowellenherd . . . . .	157
4.3.4	Eigenschaften von Radiowellen . . . . .	156	<b>Technik:</b> Radar . . . . .	159
4.3.5	Ausbreitung von Radiowellen . . . . .	158	<b>Technik:</b> Digitalisierung . . . . .	161
4.3.6	Informationsübertragung mit elektromagnetischen Wellen . . . . .	160	<b>Forschung:</b> Synchrotronstrahlung . . . . .	164
4.3.7	Elektromagnetisches Spektrum . . . . .	166	<b>Technik:</b> Wie funktioniert Fernsehen? . . . . .	168
			<b>Überblick: Wellen</b> . . . . .	172
	<b>REFLEXION: SCHWINGUNGEN UND WELLEN</b> . . . . .	174		

## Quantenobjekte und Struktur der Materie

	<b>ORIENTIERUNG</b> . . . . .	176			
<b>5</b>	<b>Licht</b> . . . . .	178	<b>5.3</b>	<b>Intensität von Licht: der Zeigerformalismus</b> . . . . .	204
<b>5.1</b>	<b>Klassische Optik</b> . . . . .	178	5.3.1	Modelle vom Licht . . . . .	204
5.1.1	Geschwindigkeit des Lichts . . . . .	178	5.3.2	Konstruktion des Zeigerformalismus . . . . .	204
5.1.2	Fermat'sches Prinzip, Reflexion und Brechung . . . . .	180	5.3.3	Interferenz am Doppelspalt . . . . .	204
5.1.3	Farbe . . . . .	182	5.3.4	Beugung am schmalen Spalt . . . . .	208
5.1.4	Wellenmodell des Lichts . . . . .	182	5.3.5	Beugung am breiten Spalt . . . . .	211
5.1.5	Interferenz am Doppelspalt . . . . .	183	5.3.6	Intensitätsoptimierung . . . . .	213
5.1.6	Interferenz am Gitter . . . . .	184	5.3.7	Interferenz am Mehrfachspalt . . . . .	213
5.1.7	Beugung am Einfachspalt . . . . .	185	5.3.8	Optische Abbildung . . . . .	216
5.1.8	Interferenz an dünnen Schichten . . . . .	187		<b>Technik:</b> Optische Beschichtung . . . . .	206
5.1.9	Michelson-Interferometer . . . . .	189		<b>Technik:</b> Holografie . . . . .	214
5.1.10	Polarisation . . . . .	190		<b>Forschung:</b> Auflösungsvermögen optischer Instrumente . . . . .	220
5.1.11	Kohärenz . . . . .	193		<b>Überblick: Licht</b> . . . . .	224
	<b>Umwelt:</b> Halos . . . . .	179			
	<b>Grundgrößen:</b>		<b>6</b>	<b>Quantenphysik</b> . . . . .	226
	Lichtgeschwindigkeit. . . . .	181	<b>6.1</b>	<b>Quantenobjekte</b> . . . . .	226
	<b>Technik:</b> Farbmischung . . . . .	186	6.1.1	Wahrscheinlichkeitsdeutung . . . . .	226
	<b>Technik:</b> TFT-Bildschirme . . . . .	192	6.1.2	Quanteninterferenz . . . . .	226
<b>5.2</b>	<b>Lichtquanten</b> . . . . .	195	6.1.3	Verschränkung . . . . .	228
5.2.1	Wechselwirkung von Licht mit Materie . . . . .	195	6.1.4	Elektronen als Quantenobjekte . . . . .	229
5.2.2	Fotoeffekt . . . . .	196	6.1.5	Neutronen, Atome und Moleküle . . . . .	233
5.2.3	Quantenhafte Emission von Licht . . . . .	198		<b>Forschung:</b> Elektronenmikroskop . . . . .	227
5.2.4	Impuls von Photonen . . . . .	200		<b>Forschung:</b> Teleportation . . . . .	230
5.2.5	Compton-Streuung . . . . .	200	<b>6.2</b>	<b>Elemente der Quantenmechanik</b> . . . . .	234
	<b>Forschung:</b> Nachweis von Photonen . . . . .	198	6.2.1	Materiewellen . . . . .	234
	<b>Astronomie:</b> Strahlungsdruck. . . . .	202	6.2.2	Interferenz von Materiewellen . . . . .	235

6.2.3	Heisenberg'sche Unbestimmtheitsrelation	237		
	<b>Forschung:</b> Rastertunnelmikroskop	238		
	<b>Überblick: Quantenphysik</b>	241		
<b>7</b>	<b>Atome</b>	242		
<b>7.1</b>	<b>Entwicklung der Atommodelle</b>	242		
7.1.1	Entstehung des Atombegriffs in der antiken Philosophie	242		
7.1.2	Rutherford'sches Atommodell	244		
7.1.3	Linienpektren	246		
7.1.4	Energieniveaus in Atomen	247		
7.1.5	Bohr'sches Atommodell	247		
	<b>Forschung:</b> Spektralanalyse	243		
	<b>Technik:</b> Atomuhren	248		
<b>7.2</b>	<b>Energieabsorption</b>	251		
7.2.1	Franck-Hertz-Experiment	251		
7.2.2	Resonanzabsorption und Resonanzfluoreszenz	253		
7.2.3	Fluoreszenz und Phosphoreszenz	256		
	<b>Geschichte:</b> Fraunhofer'sche Linien	254		
	<b>Technik:</b> Anwendung der Fluoreszenz	257		
<b>7.3</b>	<b>Atommodell der Quantenphysik</b>	258		
7.3.1	Schrödingergleichung	258		
7.3.2	Modell des linearen Potenzialtopfs	259		
7.3.3	Tunneleffekt	261		
7.3.4	Wasserstoffatom	262		
7.3.5	Orbitale und Quantenzahlen	263		
7.3.6	Periodensystem der Elemente	265		
	<b>Umwelt:</b> Farbstoffe	264		
<b>7.4</b>	<b>Laser- und Röntgenstrahlung</b>	268		
7.4.1	Laserstrahlung	268		
7.4.2	Eigenschaften von Röntgenstrahlung	273		
7.4.3	Spektrum der Röntgenstrahlung	275		
	<b>Forschung:</b> Femtosekundenlaser	270		
	<b>Forschung:</b> Laserdiode	272		
	<b>Forschung:</b> Kristallstrukturanalyse	274		
	<b>Medizin:</b> Diagnose mit Röntgenstrahlung	278		
	<b>Forschung:</b> Freie-Elektronen-Laser	280		
	<b>Überblick: Atome</b>	284		
<b>8</b>	<b>Kerne und Elementarteilchen</b>	286		
<b>8.1</b>	<b>Radioaktivität</b>	286		
8.1.1	Nachweis radioaktiver Strahlung	286		
8.1.2	Arten radioaktiver Strahlung	288		
8.1.3	Symbolschreibweise	289		
8.1.4	Aktivität und Zerfallsgesetz	289		
8.1.5	Wechselwirkung von Strahlung mit Materie	292		
8.1.6	Messgrößen des Strahlenschutzes	295		
8.1.7	Biologische Wirkung ionisierender Strahlung	296		
	<b>Umwelt:</b> Bestrahlung von Lebensmitteln	287		
	<b>Forschung:</b> Altersbestimmung	290		
	<b>Medizin:</b> Radioaktive Strahlung in der Medizin	294		
	<b>Umwelt:</b> Belastung durch ionisierende Strahlung	298		
<b>8.2</b>	<b>Aufbau der Atomkerne</b>	300		
8.2.1	Kernbausteine	300		
8.2.2	Massendefekt und Bindungsenergie	302		
8.2.3	Tröpfchenmodell des Kerns	302		
8.2.4	Schalen- und Potenzialtopfmodell des Kerns	304		
	<b>Geschichte:</b> Entdeckung des Neutrons	301		
<b>8.3</b>	<b>Kernumwandlungen</b>	306		
8.3.1	Arten radioaktiven Zerfalls	306		
8.3.2	Natürliche Zerfallsreihen	308		
8.3.3	Künstliche Kernumwandlungen	309		
8.3.4	Kernspaltung	310		
8.3.5	Kettenreaktion und Energiebilanz	311		
8.3.6	Kernfusion	314		
8.3.7	Kernreaktoren	316		
	<b>Geophysik:</b> Der Naturreaktor von Oklo	313		
	<b>Geschichte:</b> Das »Manhattan Project«	314		
	<b>Technik:</b> Moderne Kernkraftwerke	316		
	<b>Energie:</b> Fusionsreaktoren	319		

<b>8.4 Elementarteilchenphysik</b> .....	320	<b>Forschung:</b> Der »Large Hadron Collider« .....	324
8.4.1 Standardmodell .....	320	<b>Forschung:</b> Detektoren in der Teilchenphysik .....	329
8.4.2 Wechselwirkungen .....	325	<b>Überblick: Kerne und Elementarteilchen</b> .....	332
8.4.3 Vielfalt und Ordnung im Teilchenzoo .....	327		
<b>Forschung:</b> Kosmische Strahlung .....	322		
<b>REFLEXION: QUANTENOBJEKTE UND STRUKTUR DER MATERIE</b> .....	334		

## Relativität und Astrophysik

<b>ORIENTIERUNG</b> .....	336
---------------------------	-----

<b>9 Relativitätstheorie</b> .....	338	9.4.3 Krümmung der Raumzeit .....	362
<b>9.1 Grundlagen</b> .....	338	<b>Forschung:</b> Gravitationswellen- detektor .....	360
9.1.1 Relativbewegungen .....	338	<b>Überblick: Relativitätstheorie</b> .....	365
9.1.2 Lichtgeschwindigkeit .....	338		
9.1.3 Äthertheorie .....	339		
9.1.4 Einstein-Postulate .....	341		
<b>Technik:</b> Satellitennavigation .....	339	<b>10 Astrophysik</b> .....	366
<b>Geschichte:</b> Relativität und Elektrodynamik .....	342	<b>10.1 Unser Stern: die Sonne</b> .....	366
<b>9.2 Relativistische Kinematik</b> .....	343	10.1.1 Sonne und Sonnensystem .....	366
9.2.1 Gleichzeitigkeit .....	343	10.1.2 Zustandsgrößen der Sonne .....	367
9.2.2 Zeitdilatation .....	343	10.1.3 Sonnenatmosphäre .....	368
9.2.3 Längenkontraktion .....	344	10.1.4 Sonnenaktivität .....	369
9.2.4 Addition von Geschwindigkeiten .....	347	10.1.5 Innerer Aufbau der Sonne .....	370
9.2.5 Koordinatentransformation .....	348	<b>Umwelt:</b> Sonne, Leben, Energie .....	367
9.2.6 Minkowski-Diagramme .....	349	<b>Geschichte:</b> Solare Neutrinos .....	371
9.2.7 Raumzeit .....	351	<b>10.2 Physik der Sterne</b> .....	374
<b>Zeit:</b> Zwillingsparadoxon .....	345	10.2.1 Helligkeiten und Entfernungen der Sterne .....	374
<b>Forschung:</b> Myonen .....	346	10.2.2 Zustandsgrößen der Sterne .....	375
<b>Technik:</b> Atomuhrenvergleich .....	352	10.2.3 Hertzsprung-Russell- Diagramm .....	378
<b>9.3 Relativistische Dynamik</b> .....	353	10.2.4 Sternentstehung und Stern- entwicklung .....	380
9.3.1 Relativität der Masse .....	353	<b>Forschung:</b> Entfernungs- bestimmung von Sternen .....	376
9.3.2 Masse-Energie-Beziehung .....	354	<b>Forschung:</b> Bedingungen für Leben .....	380
9.3.3 Relativistische Energie .....	356	<b>Forschung:</b> Altersbestimmung von Sternen .....	385
9.3.4 Energie-Impuls-Beziehung .....	356	<b>10.3 Großstrukturen im Kosmos</b> .....	386
<b>Forschung:</b> Relativistische Effekte in Teilchenbeschleunigern .....	354	10.3.1 Milchstraßensystem .....	386
<b>9.4 Elemente der Allgemeinen Relativitätstheorie</b> .....	358		
9.4.1 Gravitationsfeld und Relativität .....	358		
9.4.2 Experimentelle Belege .....	359		

10.3.2 Außergalaktische Sternsysteme . . . . .	387	<b>Forschung:</b> Entwicklung des Kosmos . . . . .	390
10.3.3 Kosmologie . . . . .	388	<b>Überblick: Astrophysik</b> . . . . .	393
<b>Forschung:</b> Quasare . . . . .	389		
<b>REFLEXION: RELATIVITÄT UND ASTROPHYSIK</b> . . . . .			394

## Methoden der Physik

<b>M1 Experimente und ihre Auswertung</b> . . . . .			396
M 1.1 Experiment als Teil der Erkenntnis . . . . .			396
M 1.2 Regeln des Experimentierens . . . . .			396
M 1.3 Beispiel eines quantitativen Experiments . . . . .			397
M 1.4 Messgenauigkeit und Angabe von Ergebnissen . . . . .			401
M 1.5 Fehlerarten . . . . .			401
<b>M2 Modelle in der Physik</b> . . . . .			402
M 2.1 Denken in Modellen . . . . .			402
M 2.2 Eignung eines mathematischen Modells . . . . .			403
<b>M3 Mathematische Funktionen und Verfahren</b> . . . . .			404
M 3.1 Wichtige Funktionen in der Physik . . . . .			404
M 3.2 Funktionsanpassung . . . . .			406
M 3.3 Iterative Rechenmodelle . . . . .			408
M 3.4 Ableitung und Integral . . . . .			410
M 3.5 Differenzialgleichungen . . . . .			415
M 3.6 Vektorielle Größen . . . . .			417
M 3.7 Mathematische Behandlung von Messfehlern . . . . .			419
<b>Register</b> . . . . .			421