

Horst Hänsel/Werner Neumann

Physik

Elektrizität • Optik
Raum und Zeit

Mit Übungsaufgaben
von Erich Hudel • Axel Mertens • Roland Stolle

Mit 373 Abbildungen und 26 Tabellen

Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg • Berlin • Oxford

Inhalt

	Elektrische Ladung, statische elektrische und magnetische Felder	15
1.1	Elektrische Ladung, statische elektrische Felder	15
1.1.1	Grundgrößenart elektrische Ladung, Basiseinheit Coulomb	15
1.1.2	Coulombsches Gesetz, Dielektrizitätskonstante	19
1.1.3	Elektrisches Feld, elektrische Feldstärke, elektrisches Potential	22
1.1.3.1	Einige spezielle elektrische Felder	28
1.1.3.1.1	Elektrische Punktladung	28
1.1.3.1.2	Elektrischer Dipol	29
1.1.3.1.3	Homogenes elektrisches Feld	31
1.1.4	Elektrische Ladungen auf Leitern	33
1.1.4.1	Influenz	33
1.1.4.2	Elektrische Feldstärke und elektrisches Potential im Innern und an der Oberfläche stromfreier Leiter	35
1.1.4.3	Elektrische Kapazität	41
1.1.4.3.1	Kugelkondensator	42
1.1.4.3.2	Plattenkondensator	42
1.1.5	Elektrische Verschiebung	45
1.1.6	Elektrisches Feld als Träger der elektrostatischen Energie	47
1.2	Statische magnetische Felder	48
1.2.1	Grunderscheinungen des Magnetismus	48
1.2.2	Coulombsches Gesetz für Magnetpole	49
1.2.3	Magnetische Induktion	53
1.2.4	Magnetische Feldstärke, magnetische Energiedichte	56
1.3	Aufgaben	62
	Stationärer Strom	64
2.1	Stromstärke, Stromdichte	64
2.2	Ohmsches Gesetz	67
2.3	Kirchhoffsche Gesetze der Stromverzweigung	69
2.3.1	Einige Anwendungen der Kirchhoffschen Gesetze	72
2.3.1.1	Reihenschaltung von Wirkwiderständen	72
2.3.1.2	Parallelschaltung von Wirkwiderständen	73
2.3.1.3	Potentiometer	74
2.3.1.4	Ursprung, innerer Wirkwiderstand einer Spannungsquelle, Kompensationsschaltung	75
2.4	Joulesche Wärme	77
2.5	Magnetfeld des stationären Stromes	78
2.5.1	Magnetfelder spezieller Leiteranordnungen	80
2.5.1.1	Magnetfeld des Kreisstromes	80

2.5.1.2	Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule.	82
2.6	Kraftwirkungen auf bewegte Ladungen.	83
2.6.1	Lorentz-Kraft	83
2.6.2	Kraftwirkungen zwischen Strömen.	85
2.6.2.1	Basiseinheit Coulomb.	86
2.7	Strom- und Spannungsmesser.	87
2.8	Aufgaben.	90
3	Stromleitung in Festkörpern, Flüssigkeiten und Gasen	92
3.1	Elektronen.	92
3.1.1	Elektrische Elementarladung, Versuch von Millikan.	92
3.1.2	Ladung und Masse des Elektrons	94
3.2	Elektrische Leitung in Festkörpern.	97
3.2.1	Metalle.	97
3.2.1.1	Elektronengas der Metalle.	97
3.2.1.2	Ladungsträgerbeweglichkeit, Hall-Effekt	99
3.2.1.3	Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit	102
3.2.1.4	Wärmeleitung, Wiedemann-Franz-Gesetz.	108
3.2.1.5	Elektronenemission aus Metallen.	109
3.2.1.5.1	Thermische Elektronenemission, Richardsonsche Gleichung.	110
3.2.1.5.1.1	Vakuumdiode, Triode.	113
3.2.1.5.1.2	Elektronenstrahloszillograf	115
3.2.1.5.2	Fotoemission.	117
3.2.1.5.3	Sekundärelektronenemission	118
3.2.2	Halbleiter und Isolatoren.	119
3.2.2.1	Allgemeine Leitungseigenschaften nichtmetallischer Festkörper.	119
3.2.2.2	Eigenleitung und Störstellenleitung in Halbleitern.	122
3.2.2.2.1	Eigenleitung	123
3.2.2.2.2	Störstellenleitung	125
3.2.2.3	pn-Übergang, gleichrichtende und verstärkende Bau- elemente.	127
3.2.2.4	Isolatoren.	136
3.2.2.5	Kontaktspannung	136
3.2.2.5.1	Thermospannung, Peltier-Effekt	142
3.3	Elektrische Leitung in Flüssigkeiten.	146
3.3.1	Elektrolytische Dissoziation, Faradaysches Gesetz.	146
3.3.2	Galvanische Elemente.	151
3.4	Elektrische Leitung in Gasen.	155
3.5	Aufgaben.	166
4	Induktion	167
4.1	Induktionsgesetz	167
4.1.1	Wirbelströme	174
4.2	Eigen- und Gegeninduktion in Stromkreisen	176
4.3	Aufgaben.	184

Quasistatische Felder	186
5.1	Quasistatische Näherung 186
5.2	Wechselspannung, Wechselstrom 187
5.3	Elektrische Schwingungen 189
5.3.1	Ungedämpfte elektrische Schwingungen 190
5.3.2	Gedämpfte elektrische Schwingungen, aperiodischer Fall 192
5.3.3	Erzwungene elektrische Schwingungen 194
5.4	Ohmsches Gesetz für Wechselstrom 195
5.4.1	Wirk- und Blindleistung 201
5.4.2	Elektrotechnische Eigenschaften einiger spezieller Vierpole 203
5.4.2.1	Reihenresonanzkreis 204
5.4.2.2	Parallelresonanzkreis 206
5.4.2.3	Übertragungseigenschaften von Netzwerken 207
5.4.2.3.1	Spannungsteiler 210
5.4.2.3.2	Siebglied 211
5.4.2.3.3	Anpassung einer Wechselspannungsquelle 214
5.4.2.3.4	T-Glied 215
5.4.2.3.5	n-Glied 220
5.4.2.4	Transformator 221
5.4.2.4.1	Tesla-Transformator 223
5.5	Skineffekt 224
5.6	Wirkungsweise von Generatoren und Motoren 225
5.7	Gleichrichtung und Verstärkung von Wechselspannungen 233
5.7.1	Gleichrichtung 233
5.7.2	Verstärkung 236
5.8	Rückkopplung 236
5.9	Aufgaben 239
Axiomatik der Elektrodynamik und Optik	241
6.1	Elektrische Randspannung, magnetische Spannung, magnetische Randspannung 241
6.1.1	Skalares magnetisches Potential 245
6.1.2	Magnetisches Vektorpotential 247
6.2	Verschiebungsstrom 248
6.3	Maxwellsche Gleichungen 250
6.4	Aufgaben 254
Elektrische und magnetische Wellenfelder	255
7.1	Elektromagnetische Wellen längs Drähten 255
7.2	Freie elektromagnetische Wellen 264
7.2.1	Elektromagnetische Wellen im unbegrenzten Raum 264
7.2.1.1	Ungedämpfte elektromagnetische Wellen 264
7.2.1.2	Gedämpfte elektromagnetische Wellen 267
7.2.1.3	Elektrodynamische Potentiale 270
7.2.1.4	Energiebilanz im elektromagnetischen Feld, Poynting- Vektor 271
7.2.1.5	Experimenteller Nachweis elektromagnetischer Wellen 272
7.2.2	Elektromagnetisches Spektrum 280
7.2.3	Vakuumlichtgeschwindigkeit 281
7.3	Aufgaben 286

	Einheitensysteme der Elektrizitätslehre	287
8.1	Internationales Einheitensystem (SI)	288
8.2	Elektrostatistisches CGS-System.	289
8.3	Elektromagnetisches CGS-System.	291
8.4	Gaußsches Einheitensystem	294
	 Reflexion und Brechung elektromagnetischer Wellen	 297
9.1	Stetigkeitsbedingungen für die Feldvektoren beim Durchgang durch Grenzflächen.	297
9.2	Reflexionsgesetz und Brechungsgesetz.	299
9.3	Maxwellsche Relation	305
9.4	Fresnelsche Formeln.	306
9.5	Beersches Gesetz	309
9.6	Zur Bestimmung von n und n_x eines stark absorbierenden Mediums.	311
9.7	Totalreflexion.	313
9.8	Aufgaben	320
10	 Wellencharakter des Lichtes	 321
10.1	Interferenz	321
10.1.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz	321
10.1.2	Anordnungen zum Nachweis der Interferenz.	325
10.1.2.1	Fresnel'scher Spiegelversuch (1821)	326
10.1.2.2	Fresnel'sches Biprisma (1826).	328
10.1.2.3	Lloydscher Spiegelversuch (1839).	329
10.1.2.4	Michelsonsches Interferometer (1882).	329
10.1.2.5	Interferenz an planparallelen Platten, optische Weglänge.	330
10.1.2.6	Interferenz an keilförmigen Schichten	334
10.1.2.7	Newtonsche Ringe.	336
10.1.3	Kohärenzlänge	337
10.2	Beugung.	340
10.2.1	Zur mathematischen Behandlung von Beugungserscheinungen	340
10.2.2	Einteilung der Beugungserscheinungen, Reziprozitätssatz der Beugungstheorie.	345
10.2.3	Fraunhofersche Beugung	348
10.2.3.1	Beugung am Spalt und am Rechteck.	348
10.2.3.2	Babinet'sches Theorem	354
10.2.3.3	Beugung am Gitter.	355
10.2.3.4	Beugung am Flächengitter.	360
10.2.3.5	Beugung am Raumgitter.	362
10.2.3.6	Beugung an der Lochblende.	365
10.2.3.7	Beugung an regellos verteilten identischen Zentren	367
10.2.3.7.1	Rayleigh-Streuung.	369
10.2.4	Fresnel'sche Beugung.	371
10.2.5	Beugung und optische Abbildung.	372
10.2.5.1	Auflösungsgrenze optischer Instrumente.	372
10.2.5.1.1	Auflösungsgrenze des Fernrohres.	373
10.2.5.1.2	Auflösungsgrenze des Mikroskopes.	373
10.2.6	Spektroskopie.	375

10.2.6.1	Gitter- und Prismenspektrometer	375
10.2.6.1.1	Auflösungsgrenze des Gitters	376
10.2.6.1.2	Auflösungsgrenze des Prismas	377
10.2.6.2	Einige Bemerkungen zur Interferenzspektroskopie	379
10.2.6.3	Spektroskopie in verschiedenen Wellenlängenbereichen	382
10.2.7	Grundgedanken der Holografie	384
10.3	Polarisation	390
10.3.1	Polarisiertes Licht	390
10.3.2	Methoden zur Gewinnung von polarisiertem Licht aus natürlichem Licht	395
10.3.2.1	Brewstersches Gesetz	395
10.3.2.2	Doppelbrechung	398
10.3.2.2.1	Dielektrischer Tensor, Fresnelsches Gesetz	398
10.3.2.2.2	Optisch einachsige Kristalle, Nicoisches Prisma, Polari- sationsfolien	402
10.3.2.2.3	A/4-Plättchen, Kompensatoren	405
10.3.2.2.4	Kerr-Effekt	408
10.3.2.2.5	Spannungsdoppelbrechung	409
10.3.3	Methoden zur Drehung der Schwingungsebene	410
10.3.3.1	Optisch aktive Medien	410
10.3.3.2	Faraday-Effekt	411
10.4	Aufgaben	412
11	Die geometrisch-optische Näherung der Wellenoptik (Strahlenoptik)	413
11.1	Strahlenmodell des Lichtes	413
11.1.1	Prinzip von FERMAT	416
11.2	Strahlableitung durch eben begrenzte Körper	418
11.2.1	Planparallele Platte	418
11.2.2	Prismen	419
11.2.2.1	Refraktometer	423
11.3	Dispersion	424
11.4	Optische Abbildung	428
11.4.1	Gegenstand, Bild, optische Abbildung, Abbildungsmaßstab und Vergrößerung	428
11.4.2	Abbildung durch sphärische Flächen	431
11.4.2.1	Paraxialer Strahlengang	433
11.4.2.1.1	Brechende Fläche, Abbesche Invariante	434
11.4.2.1.2	Abbildungsgesetze der sphärischen Linse	436
11.4.2.1.2.1	Listingsche Bildkonstruktion	441
11.4.2.1.2.2	Dünne Linsen	448
11.4.2.1.3	Abbildungsgesetze des Spiegels	449
11.4.2.1.3.1	Ebener Spiegel	455
11.4.2.2	Abbildungsfehler	456
11.4.2.2.1	Abbildungsfehler 3. Ordnung	458
11.4.2.2.1.1	Öffnungsfehler	459
11.4.2.2.1.2	Koma	459
11.4.2.2.1.3	Astigmatismus und Bildfeldwölbung	461
11.4.2.2.1.4	Verzeichnung	463
11.4.2.2.2	Farbfehler	463
11.4.3	Blenden	465
11.4.3.1	Öffnungsblende	465
11.4.3.2	Gesichtsfeldblende	467
11.4.3.3	Zusammenwirken mehrerer Blenden	467
11.4.4	Optische Vorrichtungen	469
11.4.4.1	Auge	469

11.4.4.2	Lupe	473
11.4.4.3	Kondensoren	475
11.4.4.3.1	Köhlersche Bele.uchtungsmethode	476
11.4.4.4	Mikroskop	476
11.4.4.5	Fernrohr	486
11.4.4.5.1	Spiegelteleskop	489
11.5	Aufgaben	491
12	Fotometrie	493
12.1	Grundgröße Lichtstärke, Basiseinheit Candela	493
12.2	Leuchtdichte, Lambertsches Gesetz	495
12.3	Lichtstrom, Beleuchtungsstärke	498
12.4	Experimentelle Methoden der Fotometrie	499
12.4.1	Visuelle Methoden	499
12.4.2	Objektive Methoden	503
12.5	Aufgaben	504
13	Grundlagen der elektronenoptischen Abbildung	505
13.1	Das elektrische und das magnetische Feld als anisotropes inhomogenes elektronenoptisches Medium	505
13.2	Elektronenoptische Abbildung durch rotationssymmetrische elektrische und magnetische Felder	508
13.2.1	Elektronenoptische Abbildungsgesetze für den paraxialen Strahlengang	508
13.2.2	Abbildungsfehler	517
13.3	Elektronenmikroskope	519
13.4	Aufgaben	522
14	Raum und Zeit	524
14.1	Inertialsystem	524
14.2	Gegeneinander unbeschleunigte Bezugssysteme	524
14.2.1	Galilei-Transformation	524
14.2.2	Zur experimentellen Überprüfung von Schlußfolgerungen aus der Galilei-Transformation	527
14.2.3	Spezielle Relativitätstheorie	533
14.2.3.1	Axiom der speziellen Relativitätstheorie, Lorentz-Transformation	533
14.2.3.1.1	Einige Folgerungen aus der Lorentz-Transformation	536
14.2.3.1.1.1	Zeitdilatation	536
14.2.3.1.1.2	Längenkontraktion	539
14.2.3.1.1.3	Relativistisches Additionstheorem der Geschwindigkeiten	540
14.2.3.1.1.4	Vakuumllichtgeschwindigkeit als Grenzgeschwindigkeit kausal verknüpfter Vorgänge	543
14.2.3.1.1.5	Optischer Doppler-Effekt und astronomische Aberration	543
14.2.3.1.1.6	Zur Gleichzeitigkeit von Ereignissen	547
14.2.3.1.1.7	Reihenfolge von kausal verknüpften Vorgängen	547
14.2.3.2	Zur Lorentz-Invarianz der Axiomensysteme von Elektrodynamik, Mechanik und Thermodynamik	548
14.2.3.2.1	Maxwellsche Gleichungen	548
14.2.3.2.1.1	Biot-Savartsches Gesetz	551

14.2.3.2.2	Newtonsche Axiome	552
14.2.3.2.2.1	Masse-Energie-Äquivalenz	556
14.2.3.2.3	Thermodynamik	559
14.2.3.3	Vierdimensionales Raum-Zeit-Kontinuum	562
14.2.3.3.1	Elektrodynamik im vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum	565
14.2.3.3.1.1	Feld- und Erregungstensor	565
14.2.3.3.1.2	Maxwellsche Gleichungen in vierdimensionaler Form	568
14.2.3.3.1.3	Vierdimensionale Potentialdarstellungen	571
14.2.3.3.2	Mechanik im vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum	573
14.3	Gegeneinander beschleunigte Bezugssysteme	576
14.3.1	Trägheitskräfte	577
14.3.1.1	Einige spezielle Trägheitskräfte	578
14.3.1.2	Die Erde als rotierendes System	580
14.3.1.2.1	Zum Einfluß der Erdrotation auf die Erdbeschleunigung	582
14.3.1.2.2	Foucaultsches Pendel	583
14.3.2	Grundgedanken der allgemeinen Relativitätstheorie	585
14.3.2.1	Einsteinsches Äquivalenzprinzip	585
14.3.2.2	Versagen der euklidischen Geometrie	587
14.3.2.3	Einige experimentell überprüfbare Folgerungen aus der allgemeinen Relativitätstheorie	589
14.3.2.3.1	Gravitationsrotverschiebung, Schwarze Löcher	589
14.3.2.3.2	Lichtstrahlkrümmung im Gravitationsfeld	594
14.3.2.3.3	Perihelwanderung der Planetenbahnellipsen	599
14.4	Aufgaben	601

Anhang 603

A. 1	Komplexe Zahlen	603
A. 2	Einige Beziehungen der Differential- und Integralrechnung....	604
A. 3	Vektoren	609
A. 4	Gradient	611
A. 5	Linienintegral	613
A. 6	Oberflächenintegral, Divergenz	616
A. 7	Rotor	618
A. 8	Gaußscher und Stokesscher Satz	622
A. 9	Vektordifferentialoperator Nabla	625
A. 10	Einige wichtige Beziehungen der Vektoranalysis	626
A. 11	Greenscher Integralsatz	627
A. 12	Linien-, Oberflächen- und Volumenelement in beliebigen Koordinaten	628
A. 13	Unbestimmte Ausdrücke	631
A. 14	Grundlagen zur Beschreibung von Schwingungen	632
A. 15	Grundlagen zur Beschreibung von Wellen	635
A. 16	Magnetfeld eines Kreisstromes	639
A. 17	Zur Kraftwirkung zwischen stromdurchflossenen Drähten	640
A. 18	Herleitung der Poissonschen Differentialgleichung	640
A. 19	Herleitung des Schottky-Langmuirschen Raumladungsgesetzes	641
A. 20	Zum Induktionsgesetz	643
A. 21	Zum Ohmschen Gesetz für Wechselstrom	644
A. 22	Zur Energieaufnahme des Wechselstromkreises	645
A. 23	Berechnung des T-Gliedes	646
A. 24	Herleitung einiger Beziehungen der Elektrostatik aus den Maxwellschen Gleichungen	648
A. 25	Herleitung des Biot-Savartschen Gesetzes	652

A. 26	Zur Theorie des Drehspulgalvanometers.	653
A. 27	Herleitung von Wellendifferentialgleichungen für E und H	659
A. 28	Berechnung von Real- und Imaginärteil der komplexen Kreiswellenzahl.	660
A. 29	Zu den elektrodynamischen Potentialen.	662
A. 30	Kirchhoffsche Formel.	663
A. 31	Zur Umformung der Kirchhoffschen Formel.	665
A. 32	Zur Beugung am Spalt.	666
A. 33	Zur Beugung am Rechteck.	668
A. 34	Zur Beugung am Strichgitter.	669
A. 35	Anwendung der Kirchhoffschen Formel auf die Beugung am Gitter.	672
A. 36	Zur Beugung an der Lochblende.	673
A. 37	Zu den Fresnelschen Formeln.	675
A. 38	Zur Symmetrie des dielektrischen Tensors.	676
A. 39	Herleitung einiger Beziehungen der Kristalloptik.	677
A. 40	Zur Drehung der Schwingungsebene linear polarisierten Lichtes durch ein optisch aktives Medium.	679
A.41	Herleitung der Cauchyschen Formeln.	680
A. 42	Zur Totalreflexion.	683
A. 43	Herleitung des Reflexionsgesetzes aus dem Fermatschen Prinzip.	687
A. 44	Minimale Strahlablenkung im Prisma.	688
A. 45	Berechnung der Schnittweite des gegenstandseitigen Brennpunktes.	691
A. 46	Abbesche Sinusbedingung.	691
A. 47	Lagrange-Funktion für ein elektrisch geladenes Teilchen im elektrischen und im magnetischen Feld.	694
A. 48	Reihenentwicklung des elektrostatischen und des skalaren magnetischen Potentials für rotationsymmetrische Felder	695
A. 49	Zur Herleitung der elektronenoptischen Abbildungs- gleichung.	696
A. 50	Lorentz-Transformation.	698
A. 51	Zur Lorentz-Invarianz der Maxwellschen Gleichungen.	700
A. 52	Zum relativistischen Kraftgesetz.	706
A. 53	Zur Transformation der elektrischen Feldgrößen beim Übergang von einem Inertialsystem zum anderen.	710
A. 54	Zum rotierenden Bezugssystem.	711
A. 55	Zur Lichtstrahlkrümmung im Gravitationsfeld eines Fixsternes.	712
A. 56	Lösungen.	715

Namen-und Sachverzeichnis