

Inhaltsverzeichnis

1.	<i>Einleitung. Grundlagenexperimente. Coulombsches Gesetz</i>	1
1.1	Erste Experimente	1
1.2	Das Coulombsche Gesetz	5
	Aufgabe	9
2.	<i>Vektoranalysis</i>	10
2.1	Felder	10
2.2	Gradient und Laplace-Operator	11
2.3	Divergenz	20
2.4	Rotation	23
2.5	Einfache Rechenregeln für den Nabla-Operator	24
2.6	Linienintegral	25
2.7	Oberflächenintegral	29
2.8	Volumenintegral	38
2.9	Stokesscher Satz	42
2.10	Gaußscher Satz	46
2.11	Greensche Sätze	51
2.12	Eindeutige Bestimmung eines Vektorfeldes durch Divergenz und Rotation	52
	Aufgaben	53
3.	<i>Elektrostatik in Abwesenheit von Materie</i>	55
3.1	Das Feld einer Punktladung	55
3.2	Das Feld einer beliebigen Ladungsverteilung. Ladungsdichte	56
3.3	Elektrischer Kraftfluß	59
3.4	Quellen elektrostatischer Felder	63
3.5	Wirbelfreiheit des elektrostatischen Feldes. Feldgleichungen	64
3.6	Das elektrostatische Potential. Spannung	65
3.7	Graphische Veranschaulichung elektrostatischer Felder	67
3.8	Poisson-Gleichung. Laplace-Gleichung	70
3.9	Elektrischer Dipol	71

*3.9.1	Dipol im Grenzfall verschwindenden Ladungsabstandes. Ladungsdichte des Dipols	74
3.9.2	Potentielle Energie eines Dipols im elektro- statischen Feld. Kraft und Drehmoment auf einen Dipol	78
*3.9.3	Kraft zwischen zwei Dipolen. Potentielle Energie zweier Dipole	80
*3.10	Elektrischer Quadrupol	80
*3.11	Entwicklung des Potentials einer beliebigen Ladungsver- teilung nach Multipolen	83
	Aufgaben	85
4.	<i>Elektrostatik in Anwesenheit von Leitern</i>	86
4.1	Influenz auf großen ebenen Platten	87
4.2	Plattenkondensator. Kapazität	89
4.2.1	Kapazität	89
4.2.2	Parallel- und Reihenschaltungen von Kondensatoren ..	90
4.2.3	Kraft zwischen den Kondensatorplatten	91
4.2.4	Energiespeicherung im Plattenkondensator	93
4.3	Influenz einer Punktladung auf eine große ebene Metallplatte. Spiegelladung	94
+4.4	Influenz eines homogenen Feldes auf eine Metallkugel. Induziertes Dipolmoment	96
4.5	Flächenladungen als Ursache für Unstetigkeiten der Feld- stärke	99
4.6	Anwendungen homogener elektrischer Felder	101
4.6.1	Messung der Elementarladung im Millikan-Versuch ...	102
4.6.2	Beschleunigung von geladenen Teilchen	104
4.6.3	Ablenkung geladener Teilchen. Elektronenstrahl- oszillograph	105
	Aufgaben	108
5.	<i>Elektrostatik in Materie</i>	110
5.1	Einfachste Grundzüge der Struktur der Materie	110
5.2	Materie im homogenen elektrostatischen Feld. Dielektrizitätskonstante. Suszeptibilität. Polarisation ...	112
5.3	Das Feld der dielektrischen Verschiebung. Feldgleichungen in Materie	116
5.4	Energiedichte des elektrostatischen Feldes	118
5.4.1	Energiedichte eines Feldes im Vakuum	118
5.4.2	Energiedichte eines Feldes bei Anwesenheit von Materie	120
5.5	Unstetigkeiten der dielektrischen Verschiebung. Brechungs- gesetz für Feldlinien	124

+5.6	Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	126
+5.6.1	Mikroskopische und makroskopische Ladungsverteilungen. Feldgleichungen	126
+5.6.2	Raum- und Oberflächenladungsdichten durch Polarisation	131
+5.7	Ursachen der Polarisation	133
+5.7.1	Elektronische Polarisation. Clausius-Mossottische Formel	134
+5.7.2	Orientierungspolarisation	138
5.8	Verschiedene dielektrische Erscheinungen	139
	Aufgaben	141
6.	<i>Elektrischer Strom als Ladungstransport</i>	143
6.1	Elektrischer Strom. Stromdichte	143
6.1.1	Einfache Definition. Kontinuitätsgleichung	143
+6.1.2	Mikroskopische Formulierung der Stromdichte	145
6.2	Strom in Substanzen höherer Dichte. Ohmsches Gesetz	147
6.2.1	Einfaches Modell des Ladungstransports. Leitfähigkeit	147
6.2.2	Strom in ausgedehnten Leitern. Widerstand. Ohmsches Gesetz	150
6.3	Leistung des elektrischen Feldes. Joulesche Verluste	152
6.4	Stromkreis. Technische Stromrichtung	154
6.5	Netzwerke	155
6.5.1	Kirchhoffsche Regeln. Reihen- und Parallelschaltung Ohmscher Widerstände	155
6.5.2	Messung von Strom bzw. Spannung mit einem Meßgerät	159
6.6	Ionenleitung in Flüssigkeiten. Elektrolyse	160
6.7	Elektronenleitung in Metallen. Darstellung von Strom-Spannungs-Kennlinien auf dem Oszillographen	162
6.8	Ionen- und Elektronenleitung in ionisierten Gasen	166
	Aufgaben	167
+7.	<i>Grundlagen des Ladungstransports in Festkörpern. Bändermodell</i> ..	169
+7.1	Vielteilchensystem am absoluten Temperaturnullpunkt. Fermi-Grenzenergie	169
+7.2	Vielteilchensystem bei höheren Temperaturen	176
+7.2.1	Fermi-Dirac-Funktion	176
+7.2.2	Fermi-Dirac-Verteilung	180
+*7.2.3	Herleitung der Fermi-Dirac-Funktion	180
+*7.2.4	Näherungen für die Fermi-Dirac-Funktion	184
+7.3	Das Bändermodell der Kristalle	186

+7.4	Klassifizierung der Kristalle am absoluten Temperaturnullpunkt: Leiter und Nichtleiter	189
+7.5	Klassifizierung der Kristalle bei höheren Temperaturen: Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	191
+7.5.1	Metalle	191
+7.5.2	Halbleiter und Isolatoren	193
+7.6	Dotierte Halbleiter	198
8.	<i>Ladungstransport durch Grenzflächen. Schaltelemente</i>	201
8.1	Grenzfläche Metall-Vakuum	201
8.1.1	Experiment zur thermischen Elektronenemission	201
+8.1.2	Potentialverlauf an der Grenzfläche Metall-Vakuum. Bildpotential. Austrittsarbeit	203
8.1.3	Stromdichte des thermischen Emissionsstromes. Richardson-Gleichung	205
+8.2	Herleitung der Richardson-Gleichung aus dem Bändermodell	206
+8.3	Emissionsstrom bei äußerem Feld	209
+8.3.1	Schottky-Effekt	209
+8.3.2	Feldemission	211
8.3.3	Feldelektronenmikroskop	213
8.4	Vakuumdioden	213
8.4.1	Kennlinie der Vakuumdioden	213
8.4.2	Schaltung der Vakuumdioden als Gleichrichter	214
+8.4.3	Deutung der Diodenkennlinie	215
8.5	Trioden	217
8.5.1	Kennlinienfeld der Trioden	217
8.5.2	Trioden als Verstärker	218
+8.5.3	Deutung der Triodenkennlinien	219
8.6	Die Grenzfläche zwischen verschiedenen Metallen. Kontakt-Spannung	221
8.7	Einfachste Überlegungen und Experimente zur Halbleiterdioden	223
+8.8	Bandstruktur im Halbleiter mit räumlich veränderlicher Dotation	225
+8.9	Die Grenzfläche zwischen einem p- und einem n-dotierten Halbleiter. pn-Übergang. Schottky-Randschicht	227
+8.10	Halbleiterdioden	230
+8.10.1	Halbleiterdioden in einem Stromkreis ohne äußere Stromquelle	230
+8.10.2	Belastete Halbleiterdioden	233
8.11	Bipolare Transistoren	235
8.11.1	Kennlinienfeld des pnp-Transistors	236

8.11.2	Transistor als Verstärker	237
⁺ 8.11.3	Schematische Berechnung der Transistorkennlinien ...	237
8.12	Feldeffekttransistoren	242
8.12.1	Wirkungsweise und Kennlinien verschiedener Feldeffekttransistoren	242
8.12.2	Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren	243
8.12.3	Metall-Oxid-Silizium-Feldeffekttransistoren	244
9.	<i>Das magnetische Induktionsfeld des stationären Stromes. Lorentz-Kraft</i>	247
9.1	Grundlegende Experimente	247
9.2	Das Feld der magnetischen Induktion	250
^x 9.3	Die magnetische Induktion als relativistischer Effekt	254
^x 9.4	Das elektromagnetische Feld in relativistischer Formulierung	264
9.5	Messung der magnetischen Induktion. Hall-Effekt	270
9.5.1	Hall-Effekt	270
9.6	Anwendungen: Felder verschiedener stromdurchflossener Anordnungen	271
9.6.1	Langer gestreckter Draht	272
9.6.2	Kreisschleife	274
9.6.3	Ablenkung geladener Teilchen im \vec{B} -Feld. Messung des Ladungs-Masse-Quotienten des Elektrons	276
*9.6.4	Herleitung der allgemeinen Bahnform eines geladenen Teilchens im homogenen \vec{B} -Feld	278
9.7	Die Differentialgleichungen des stationären Magnetfeldes	279
9.8	Das Vektorpotential	282
*9.9	Multipolentwicklung des stationären Magnetfeldes	283
*9.9.1	Vektorpotential, magnetische Induktion und Stromdichte eines magnetischen Dipolfeldes	283
*9.9.2	Multipolentwicklung des Vektorpotentials eines stationären Magnetfeldes	287
9.10	Anwendungen: Felder weiterer Anordnungen	289
9.10.1	Lange Spule	289
*9.10.2	Vektorpotential einer rotierenden Kugel mit homogener Ladungsbelegung	290
9.11	Lorentz-Kraft und elektrischer Antrieb	296
9.11.1	Stromdurchflossene drehbare Drahtschleife im \vec{B} -Feld	296
9.11.2	Schema des Gleichstrommotors	299
9.12	Lorentz-Kraft, und Stromerzeugung	300
9.12.1	Einführung einer Drahtschleife in ein homogenes \vec{B} -Feld	300

9.12.2	Rotierende Drahtschleife im homogenen \vec{B} -Feld	305
+9.12.3	Einführung einer leitenden Kugelschale in ein magnetisches Dipolfeld	310
	Aufgaben	315
10.	<i>Magnetische Erscheinungen in Materie</i>	317
10.1	Materie im magnetischen Induktionsfeld. Permeabilität. Suszeptibilität. Magnetisierung.....	317
10.1.1	Experimente zum Ferromagnetismus. Hysterese. Elektromagnet	317
10.1.2	Experimente zum Dia- und Paramagnetismus	319
10.1.3	Erste Deutung der Experimente. Magnetisierung. Magnetische Suszeptibilität	321
10.2	Die magnetische Feldstärke. Feldgleichungen in Materie	323
10.3	Unstetigkeiten der magnetischen Feldgrößen \vec{B} und \vec{H}	324
10.4	Kraftdichte und Energiedichte des magnetischen Feldes	326
10.4.1	Kraftdichte auf eine Stromverteilung. Energie eines Dipols im magnetischen Induktionsfeld	326
10.4.2	Energieinhalt ausgedehnter Stromverteilung im Vakuum	333
10.4.3	Energieinhalt von Stromverteilungen in Anwesenheit von Materie	335
+10.5	Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen der stationären Magnetfelder in Materie	336
+10.5.1	Mikroskopische und makroskopische Stromverteilungen. Feldgleichungen	336
+10.5.2	Durch Magnetisierung erzeugte Stromdichte	338
+10.6	Ursachen der Magnetisierung	338
+10.6.1	Diamagnetismus freier Atome	339
+10.6.2	Paramagnetismus freier Atome	341
+10.6.3	Para- und Diamagnetismus freier Elektronen	344
+10.6.4	Ferromagnetismus	346
10.7	Permanentmagnete. Drehspulinstrument	349
10.8	Vergleich zwischen elektrischen und magnetischen Feldgrößen in Materie	350
	Aufgaben	355
11.	<i>Quasistationäre Vorgänge. Wechselstrom</i>	356
11.1	Faradaysches Induktionsgesetz. Feldgleichungen quasistationärer Vorgänge	357
11.2	Gegeninduktion und Selbstinduktion	358
11.2.1	Berechnung des Gegen- und Selbstinduktionskoeffizienten	358
*11.2.2	Näherungsformeln für die Induktionskoeffizienten ...	361

*11.2.3	Anwendungen: Gegen- und Selbstinduktionskoeffizienten von Drahtschleifen und Spulen	363
11.2.4	Magnetische Energie eines Leiterkreises	367
11.3	Ein- und Ausschaltvorgänge	368
11.3.1	Reihenschaltung aus Widerstand und Induktivität	368
11.3.2	Energieinhalt einer stromdurchflossenen Spule	370
11.3.3	Reihenschaltung aus Widerstand und Kapazität	370
11.3.4	Energieinhalt eines aufgeladenen Kondensators	372
11.3.5	Experimente zu RL- und RC-Kreisen	373
11.3.6	Einstellbare Zeitverzögerung zwischen zwei Spannungsimpulsen. Univibrator	374
11.3.7	Erzeugung von Rechteckspannungen. Multivibrator	375
11.4	Transformatoren	376
11.5	Wirbelströme	378
11.6	Lenzsche Regel	379
11.7	Der Schwingkreis	381
11.7.1	Gedämpfte Schwingungen	382
11.7.2	Analogien zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungen	385
11.7.3	Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen ...	386
11.8	Wechselstrom	387
11.8.1	Komplexe Schreibweise für Spannung, Stromstärke und Widerstand	387
11.8.2	Leistung im Wechselstromkreis	389
11.8.3	Wechselstromkreis mit Ohmschem Widerstand oder Induktivität oder Kapazität	390
11.8.4	Kirchhoffsche Regeln für Wechselstromkreise	392
11.9	Resonanz	395
11.9.1	Leistungsaufnahme des Serienresonanzkreises. Resonanz	395
11.9.2	Resonanzbreite	396
11.9.3	Analogien zur Mechanik. Einschwingvorgänge	398
11.9.4	Momentane Leistung im Serienresonanzkreis	399
Aufgaben	400
12.	<i>Die Maxwell'schen Gleichungen</i>	402
12.1	Maxwell'sche Gleichungen in Abwesenheit von Materie	403
12.1.1	Differentielle Form der Maxwell'schen Gleichungen ...	403
12.1.2	Integralform der Maxwell'schen Gleichungen	408
^x 12.2	Die Maxwell'schen Gleichungen als Lorentz-kovariante Verallgemeinerungen der Feldgleichungen des elektrostatischen Feldes	411
^x 12.2.1	Rotation des elektrischen Feldes im bewegten System	412

^x 12.2.2	Divergenz des elektrischen Feldes im bewegten System	413
^x 12.2.3	Rotation des Feldes der magnetischen Induktion im bewegten System	414
^x 12.2.4	Divergenz des Feldes der magnetischen Induktion im bewegten Koordinatensystem	416
12.3	Die Potentiale des elektromagnetischen Feldes. Eichtransformationen. D'Alembertsche Gleichungen	416
12.3.1	Vektorpotential und skalares Potential	416
12.3.2	Eichtransformationen	418
12.3.3	D'Alembertsche Gleichung. Lorentz-Eichung. Coulomb-Eichung	420
[*] 12.3.4	Die quasistationären Vorgänge als Näherung der Maxwell-Gleichungen	422
^x 12.4	Relativistische Formulierung der Maxwell'schen Gleichungen	424
^x 12.4.1	Relativistische Verallgemeinerung des Gradienten ...	424
^x 12.4.2	Relativistische Feldgleichungen	428
^x 12.4.3	Relativistisches Vektorpotential	432
12.5	Maxwell'sche Gleichungen in Anwesenheit von Materie	434
12.5.1	Zeitabhängige Polarisierung und Magnetisierung. Polarisationsstrom	434
⁺ 12.5.2	Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen in Materie	437
⁺ [*] 12.5.3	Nachwirkungseffekte	441
12.5.4	Vergleich der Gleichungen für die elektrischen und magnetischen Feldgrößen	442
12.6	Energieerhaltungssatz. Poynting-Vektor	444
^x 12.7	Relativistische Formulierung der Erhaltungssätze. Energie-Impuls-Tensor	449
^x 12.7.1	Kraftdichte eines elektromagnetischen Feldes auf eine Ladungsverteilung	449
^x 12.7.2	Energie-Impuls-Tensor. Maxwell'scher Spannungstensor	451
^x 12.7.3	Relativistischer Energie-Impulserhaltungssatz	453
Aufgaben		454
13.	<i>Elektromagnetische Wellen</i>	456
13.1	Ebene Wellenlösungen der Maxwell-Gleichungen im Vakuum ...	457
13.2	Ebene Wellen in verschiedenen Koordinatensystemen. Doppler-Effekt	468
13.3	Überlagerung von Wellen. Superpositionsprinzip	469
13.3.1	Lineare, zirkulare und elliptische Polarisierung ...	470
13.3.2	Stehende Wellen	473
13.3.3	Interferenz ebener Wellen	474
^x 13.4	Relativistische Beschreibung der ebenen Wellen. Vektorpotential	478

*13.5 Drahtwellen	481
*13.5.1 Anfangsbedingungen	482
*13.5.2 Lösung der Wellengleichungen	486
*13.5.3 Physikalische Interpretation der Lösungen	489
*13.5.4 Energiebetrachtungen	493
*13.5.5 Anwendungen	494
13.6 Lösungen der inhomogenen d'Alembert-Gleichung	499
13.6.1 Die Green-Funktion der d'Alembert-Gleichung	499
^X 13.6.2 Relativistische Formulierung der Lösung	502
13.7 Erzeugung elektromagnetischer Wellen	504
13.7.1 Abstrahlung eines schwingenden elektrischen Dipols	504
13.7.2 Abstrahlung eines schwingenden magnetischen Dipols	511
*13.8 Abstrahlung eines bewegten geladenen Teilchens	513
*13.8.1 Liénard-Wiechert-Potentiale. Elektromagnetische Felder	513
*13.8.2 Diskussion der Feldstärken. Abstrahlung.	516
Aufgaben	521
 Anhang A: <i>Wahrscheinlichkeiten und Verteilungen</i>	522
A.1 Wahrscheinlichkeiten	522
A.2 Wahrscheinlichkeitsdichten	523
A.3 Verteilungen	527
 Anhang B: <i>Distributionen</i>	531
B.1 Testfunktionen	531
B.2 Distributionen	532
B.3 Anwendungen	533
 Anhang C: <i>Formelsammlung</i>	541
 Anhang D: <i>Die wichtigsten SI-Einheiten der Elektrodynamik</i>	570
 Anhang E: <i>Physikalische Konstanten</i>	571
<i>Symbole und Bezeichnungen</i>	572
<i>Schaltzeichen</i>	574
<i>Sachverzeichnis</i>	577