

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung. Grundlagenexperimente. Coulombsches Gesetz	1
1.1	Erste Experimente	1
1.2	Das Coulombsche Gesetz	4
2	Elektrostatik in Abwesenheit von Materie	10
2.1	Das elektrostatische Feld einer Punktladung	10
2.2	Das Feld einer beliebigen Ladungsverteilung. Ladungsdichte	11
2.3	*Mikroskopische und gemittelte Ladungsdichte und Feldstärke	15
2.4	Elektrischer Fluß	17
2.5	Quellen elektrostatischer Felder	20
2.6	Wirbelfreiheit des elektrostatischen Feldes. Feldgleichungen	22
2.7	Das elektrostatische Potential. Spannung	22
2.8	Graphische Veranschaulichung elektrostatischer Felder	25
2.9	Poisson-Gleichung. Laplace-Gleichung	27
2.10	Elektrischer Dipol	29
2.10.1	*Grenzfall verschwindenden Ladungsabstandes. Ladungsdichte des Dipols	32
2.10.2	Potentielle Energie eines Dipols im elektrostatischen Feld. Kraft und Drehmoment auf einen Dipol	38
2.11	Systeme mehrerer Punktladungen	40
2.12	Aufgaben	44
3	Elektrostatik in Anwesenheit von Leitern	48
3.1	Influenz auf großen, ebenen Platten	49
3.2	Plattenkondensator. Kapazität	51
3.2.1	Kapazität	51
3.2.2	Parallel- und Reihenschaltungen von Kondensatoren	53
3.2.3	Kraft zwischen den Kondensatorplatten	54
3.2.4	Energiespeicherung im Plattenkondensator	56

3.3	Influenz einer Punktladung auf eine große, ebene Metallplatte. Spiegelladung	56
3.4	Influenz eines homogenen Feldes auf eine Metallkugel. Induziertes Dipolmoment	59
3.5	Flächenladungen als Ursache für Unstetigkeiten der Feldstärke	63
3.6	Anwendungen homogener elektrischer Felder	65
3.6.1	Messung der Elementarladung im Millikan-Versuch	65
3.6.2	Beschleunigung von geladenen Teilchen	67
3.6.3	Ablenkung geladener Teilchen. Elektronenstrahloszillograph	68
3.7	Aufgaben	72
4	Elektrostatik in Materie	75
4.1	Einfachste Grundzüge der Struktur der Materie	75
4.2	Materie im homogenen elektrostatischen Feld. Permittivitätszahl. Elektrische Suszeptibilität. Elektrische Polarisierung	77
4.3	Das Feld der elektrischen Flußdichte. Feldgleichungen in Materie	81
4.4	Energiedichte des elektrostatischen Feldes	83
4.4.1	Energiedichte eines Feldes im Vakuum. Selbstenergie	83
4.4.2	Energiedichte eines Feldes bei Anwesenheit von Materie	86
4.5	Unstetigkeiten der elektrischen Flußdichte. Brechungsgesetz für Feldlinien	90
4.6	*Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	92
4.6.1	Mikroskopische und gemittelte Ladungsverteilungen. Feldgleichungen	92
4.6.2	Raum- und Oberflächenladungsdichten durch Polarisierung	97
4.7	Ursachen der Polarisierung	99
4.7.1	Elektronische Polarisierung	99
4.7.2	*Clausius-Mossottische Formel	101
4.7.3	Orientierungspolarisation	104
4.8	Verschiedene dielektrische Erscheinungen	105
4.9	Aufgaben	107

5	Elektrischer Strom als Ladungstransport	111
5.1	Elektrischer Strom. Stromdichte	111
5.2	Kontinuitätsgleichung	113
5.3	*Mikroskopische Formulierung der Stromdichte	115
5.4	Strom in Substanzen höherer Dichte. Ohmsches Gesetz	118
5.4.1	Einfaches Modell des Ladungstransports. Leitfähigkeit	118
5.4.2	Strom in ausgedehnten Leitern. Widerstand. Ohmsches Gesetz	121
5.5	Leistung des elektrischen Feldes. Joulesche Verluste	123
5.6	Stromkreis. Technische Stromrichtung	126
5.7	Netzwerke	129
5.7.1	Kirchhoffsche Regeln. Reihen- und Parallelschaltung ohmscher Widerstände	129
5.7.2	Messung von Strom bzw. Spannung mit einem Meßgerät	132
5.8	Ionenleitung in Flüssigkeiten. Elektrolyse	134
5.9	Elektronenleitung in Metallen. Darstellung von Strom–Spannungs–Kennlinien auf dem Oszillographen	136
5.10	Ionen- und Elektronenleitung in ionisierten Gasen	140
5.11	Aufgaben	141
6	*Grundlagen des Ladungstransports in Festkörpern.	
	Bändermodell	145
6.1	Vielteilchensystem am absoluten Temperaturnullpunkt. Fermi–Grenzenergie	145
6.2	Vielteilchensystem bei höheren Temperaturen	151
6.2.1	Fermi–Dirac–Funktion	152
6.2.2	Fermi–Dirac–Verteilung	155
6.3	Das Bändermodell der Kristalle	158
6.4	Kristalle am absoluten Temperaturnullpunkt: Leiter und Nichtleiter	160
6.5	Kristalle bei höherer Temperatur: Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	162
6.5.1	Metalle	163
6.5.2	Halbleiter und Isolatoren	164
6.6	Dotierte Halbleiter	169
6.7	Aufgaben	171

7	Ladungstransport durch Grenzflächen. Schaltelemente . . .	172
7.1	Grenzfläche Metall–Vakuum	172
7.1.1	Experiment zur thermischen Elektronenemission	173
7.1.2	Potentialverlauf an der Grenzfläche Metall–Vakuum. Bildpotential. Austrittsarbeit	173
7.1.3	Stromdichte des thermischen Emissionsstromes. Richardson-Gleichung	176
7.2	*Emissionsstrom bei äußerem Feld	179
7.2.1	Schottky-Effekt	179
7.2.2	Feldemission	182
7.3	Vakuumdiode	183
7.3.1	Kennlinie der Vakuumdiode	183
7.3.2	Schaltung der Vakuumdiode als Gleichrichter	184
7.3.3	*Deutung der Diodenkennlinie	185
7.4	Triode	187
7.4.1	Kennlinienfeld der Triode	188
7.4.2	Triode als Verstärker	189
7.5	Die Grenzfläche zwischen verschiedenen Metallen. Kontaktspannung	190
7.6	Einfachste Überlegungen und Experimente zur Halbleiterdiode	192
7.7	*Bandstruktur im Halbleiter mit räumlich veränderlicher Dotation	194
7.8	*Die Grenzfläche zwischen einem p - und einem n -dotierten Halbleiter. pn -Übergang. Schottky-Randschicht	196
7.9	*Halbleiterdiode	199
7.9.1	Halbleiterdiode in einem Stromkreis ohne äußere Stromquelle	200
7.9.2	Belastete Halbleiterdiode	202
7.10	Bipolare Transistoren	204
7.10.1	Kennlinienfeld des pn -Transistors	205
7.10.2	Transistor als Verstärker	207
7.11	*Schematische Berechnung der Transistorkennlinien	207
7.12	Feldeffekt-Transistoren	212
7.12.1	Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren	212
7.12.2	Metall–Oxid–Silizium-Feldeffekt-Transistoren	214
7.13	Aufgaben	216

8	Das magnetische Flußdichtefeld des stationären Stromes.	
	Lorentz-Kraft	217
8.1	Grundlegende Experimente	217
8.2	Das Feld der magnetischen Flußdichte	218
8.3	Messung der magnetischen Flußdichte. Hall-Effekt	224
8.4	Felder verschiedener stromdurchflossener Anordnungen	227
	8.4.1 Langer, gestreckter Draht	227
	8.4.2 Kreisschleife	228
	8.4.3 Helmholtz-Spule	229
8.5	Ablenkung geladener Teilchen im B -Feld. Messung des Ladungs–Masse-Quotienten des Elektrons	230
8.6	Bahnen in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern. Wien-Filter	234
8.7	Die Feldgleichungen des stationären Magnetfeldes	237
8.8	Das Vektorpotential	240
8.9	Magnetisches Dipolfeld	241
8.10	Feld einer langen Spule	246
8.11	Lorentz-Kraft und elektrischer Antrieb	247
	8.11.1 Stromdurchflossene, drehbare Drahtschleife im B -Feld	247
	8.11.2 Schema des Gleichstrommotors	251
8.12	Lorentz-Kraft und Stromerzeugung	252
	8.12.1 Einführung einer Drahtschleife in ein homogenes B -Feld	252
	8.12.2 Rotierende Drahtschleife im homogenen B -Feld	257
8.13	Faradaysches Induktionsgesetz	262
8.14	*Magnetisierbarkeit einer leitenden Kugelschale	263
8.15	Aufgaben	266
9	Magnetische Erscheinungen in Materie	269
9.1	Materie im magnetischen Flußdichtefeld. Permeabilität	269
	9.1.1 Experimente zum Ferromagnetismus. Hysterese. Elektromagnet	269
	9.1.2 Experimente zum Dia- und Paramagnetismus	272
9.2	Magnetisierung. Magnetische Suszeptibilität	273
9.3	Die magnetische Feldstärke. Feldgleichungen in Materie	276
9.4	Unstetigkeiten der magnetischen Feldgrößen B und H	278
9.5	Kraftdichte und Energiedichte des magnetischen Feldes	279
	9.5.1 Kraftdichte auf eine Stromverteilung. Energie eines Dipols im magnetischen Flußdichtefeld	279
	9.5.2 Magnetische Energiedichte	282

9.6	*Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen des stationären Magnetfeldes in Materie	285
9.6.1	Mikroskopische und makroskopische Stromverteilungen. Feldgleichungen	285
9.6.2	Durch Magnetisierung erzeugte Stromdichte	287
9.7	Ursachen der Magnetisierung	288
9.7.1	*Diamagnetismus freier Atome	288
9.7.2	*Paramagnetismus freier Atome	290
9.7.3	*Para- und Diamagnetismus freier Elektronen	294
9.7.4	*Ferromagnetismus	296
9.8	Permanentmagnete. Drehspulinstrument	300
9.9	Vergleich elektrischer und magnetischer Feldgrößen in Materie	302
9.10	Aufgaben	306
10	Quasistationäre Vorgänge. Wechselstrom	307
10.1	Übergang von zeitunabhängigen zu quasistationären Feldern	307
10.2	Gegeninduktion und Selbstinduktion	308
10.3	Magnetische Energie eines Leiterkreises	312
10.4	Ein- und Ausschaltvorgänge	314
10.4.1	Reihenschaltung aus Widerstand und Induktivität	314
10.4.2	Energieinhalt einer stromdurchflossenen Spule	317
10.4.3	Reihenschaltung aus Widerstand und Kapazität	317
10.4.4	Energieinhalt eines aufgeladenen Kondensators	320
10.4.5	Experimente zu RL - und RC -Kreisen	320
10.4.6	Einstellbare Zeitverzögerung zwischen zwei Spannungsimpulsen. Univibrator	321
10.4.7	Erzeugung von Rechteckspannungen. Multivibrator	323
10.5	Transformator	324
10.6	Wirbelströme	326
10.7	Lenzsche Regel	327
10.8	Der Schwingkreis	330
10.8.1	Gedämpfte Schwingungen	331
10.8.2	Analogien zwischen elektrischen und mechanischen Schwingungen	334
10.8.3	Erzeugung ungedämpfter elektrischer Schwingungen	335
10.9	Wechselstrom	336
10.9.1	Komplexe Schreibweise für Spannung, Stromstärke und Widerstand	336
10.9.2	Leistung im Wechselstromkreis	338

10.9.3	Wechselstromkreis mit ohmschem Widerstand oder Induktivität oder Kapazität	339
10.9.4	Kirchhoffsche Regeln für Wechselstromkreise . . .	341
10.10	Resonanz	346
10.10.1	Leistungsaufnahme des Serienresonanzkreises. Resonanz	346
10.10.2	Resonanzbreite	349
10.10.3	Analogien zur Mechanik. Einschwingvorgänge . . .	350
10.10.4	Momentane Leistung im Serienresonanzkreis . . .	351
10.11	Aufgaben	352
11	Die Maxwell'schen Gleichungen	356
11.1	Maxwell'sche Gleichungen in Abwesenheit von Materie . .	357
11.1.1	Differentielle Form der Maxwell'schen Gleichungen	357
11.1.2	Integralform der Maxwell'schen Gleichungen . . .	362
11.2	Die Potentiale des elektromagnetischen Feldes. Eichtransformationen. D'Alembertsche Gleichungen . . .	365
11.2.1	Vektorpotential und skalares Potential	365
11.2.2	Eichtransformationen	367
11.2.3	D'Alembertsche Gleichung. Lorentz-Eichung. Coulomb-Eichung	369
11.2.4	Die quasistationären Vorgänge als Näherung der Maxwell-Gleichungen	371
11.3	Maxwell'sche Gleichungen in Anwesenheit von Materie . .	372
11.3.1	Zeitabhängige Polarisation und Magnetisierung. Polarisationsstrom	372
11.3.2	*Mikroskopische Begründung der Feldgleichungen in Materie. Magnetoelektrischer Effekt	375
11.3.3	Nachwirkungseffekte	382
11.3.4	Analogien zwischen elektrischen und magnetischen Feldgrößen	383
11.4	Energieerhaltungssatz. Poynting-Vektor	385
11.5	Impulserhaltungssatz. Maxwell'scher Spannungstensor . .	391
11.6	Aufgaben	396
12	Elektromagnetische Wellen	399
12.1	Ebene Wellen als Lösungen der Maxwell-Gleichungen im Vakuum	400
12.2	Erzeugung und Nachweis elektromagnetischer Wellen . .	407
12.3	Überlagerung von Wellen. Superpositionsprinzip	411
12.3.1	Lineare, zirkulare und elliptische Polarisation . . .	411
12.3.2	Stehende Wellen	415

12.3.3	Interferenz ebener Wellen	416
12.4	Lösungen der inhomogenen d'Alembert-Gleichung	421
12.4.1	Die Green-Funktion der d'Alembert-Gleichung	421
12.5	Erzeugung elektromagnetischer Wellen	424
12.5.1	Abstrahlung eines schwingenden elektrischen Dipols	424
12.5.2	Abstrahlung eines schwingenden magnetischen Dipols	435
12.6	Strahlung eines bewegten geladenen Teilchens	438
12.6.1	Liénard-Wiechert-Potentiale. Elektromagnetische Felder	438
12.6.2	Diskussion der Felder. Abstrahlung	440
12.7	Aufgaben	446
13	Relativistische Elektrodynamik	449
13.1	Einsteins Spezielle Relativitätstheorie	449
13.1.1	Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit vom Bezugssystem	449
13.1.2	Lorentz-Transformation	449
13.1.3	Vierdimensionaler Vektorraum. Minkowski-Geometrie	454
13.1.4	Relativistische Mechanik eines Massenpunktes	458
13.2	Die magnetische Induktion als relativistischer Effekt	463
13.2.1	Lorentz-Transformation der Geschwindigkeit	465
13.2.2	Lorentz-Transformation der Coulomb-Kraft	466
13.2.3	Zerlegung der transformierten Newton-Kraft in Coulomb- und Lorentz-Kraft	468
13.2.4	Explizite Darstellung der transformierten Feldstärken	470
13.2.5	Vergleich mit Ergebnissen aus dem Experiment	472
13.2.6	Ladungserhaltung	476
13.3	Die Differentialgleichungen des \mathbf{E} - und des \mathbf{B} -Feldes im bewegten System	477
13.3.1	Rotation des elektrischen Feldes	479
13.3.2	Divergenz des elektrischen Feldes	480
13.3.3	Rotation des Feldes der magnetischen Induktion	481
13.3.4	Divergenz des Feldes der magnetischen Induktion	483
13.4	Das elektromagnetische Feld in relativistischer Formulierung	483
13.4.1	Das Feld als antisymmetrischer Tensor	483
13.4.2	Retardierte elektromagnetische Feldstärke	485
13.4.3	Feldstärketensor und Minkowski-Kraft	486

13.4.4	Die Lorentz-Transformation des elektromagnetischen Feldstärketensors	488
13.4.5	Gekreuzte elektrische und magnetische Felder	490
13.4.6	Teilchenbahnen in gekreuzten Feldern	494
13.4.7	Das Viererpotential des elektromagnetischen Feldes	503
13.4.8	Das Viererpotential des retardierten elektromagnetischen Feldes	504
13.5	Relativistische Feldgleichungen	504
13.5.1	Herleitung der Feldgleichungen durch Lorentz-Transformation aus den Gleichungen der Elektrostatik	504
13.5.2	Lorentz-Transformation der Ladungs- und Stromdichte	505
13.5.3	Kovariante Form der inhomogenen Maxwell-Gleichungen	507
13.5.4	Kovariante Form der homogenen Maxwell-Gleichungen	508
13.5.5	Relativistisches Vektorpotential	511
13.6	Erhaltungssätze. Energie–Impuls-Tensor	513
13.6.1	Kraftdichte des elektromagnetischen Feldes	513
13.6.2	Energie–Impuls-Tensor. Maxwellscher Spannungstensor	514
13.6.3	Energie–Impuls-Erhaltungssatz	517
13.7	Zusammenfassung der relativistischen Elektrodynamik	519
13.8	Klassifikation physikalischer Größen und Gesetze unter Lorentz-Transformationen	521
13.8.1	Vorbemerkungen: Rotationen im Dreidimensionalen	521
13.8.2	Klassifikation physikalischer Größen	525
13.8.3	Klassifikation physikalischer Gesetze	525
13.8.4	Lorentz-Kovarianz der Gesetze	527
13.8.5	Beispiel: Relativistische Elektrodynamik	528
13.9	Aufgaben	530
A	Formeln zur Vektoralgebra	532
A.1	Vektoren	532
A.2	Tensoren	537
B	Formeln zur Vektoranalysis	542
B.1	Differentiation eines Vektors nach einem Parameter	542
B.2	Koordinatensysteme	543
B.3	Skalarfeld	546
B.4	Vektorfeld	548
B.5	Partielle Ableitung. Richtungsableitung. Gradient	550

B.6	Divergenz	555
B.7	Rotation	557
B.8	Laplace-Operator	559
B.9	Rechenregeln für den Nabla-Operator	561
B.10	Linienintegral	561
B.11	Oberflächenintegral	562
B.12	Volumenintegral	566
B.13	Integralsatz von Stokes	568
B.14	Wegunabhängiges Linienintegral	570
B.15	Integralsatz von Gauß	571
B.16	Greensche Sätze	573
B.17	Eindeutige Bestimmung eines Vektorfeldes durch Divergenz und Rotation	574
B.18	Aufgaben	575
C	Vierervektoren und Vierertensoren	577
C.1	Minkowski-Raum. Vierervektoren	577
C.2	Vierertensoren	579
C.3	Lorentz-Transformationen	582
C.4	Nabla-Operator im Minkowski-Raum	584
D	Wahrscheinlichkeiten und Wahrscheinlichkeitsdichten	587
D.1	Wahrscheinlichkeiten	587
D.2	Wahrscheinlichkeitsdichten	589
E	Maxwell-Boltzmann-Verteilung	593
F	Distributionen	597
F.1	Anschauliche Vorbereitung	597
F.1.1	Diracsche Deltadistribution	597
F.1.2	Diracsche Deltadistribution als Ableitung der Stufenfunktion	601
F.2	Mathematische Definition der Distributionen	602
F.2.1	Testfunktionen	602
F.2.2	Temperierte Distributionen	603
F.2.3	Anwendungen	605
F.3	Aufgaben	611
G	Räumliche Mittelungen physikalischer Größen	612
H	Fermi-Dirac-Funktion	618
H.1	Herleitung	618
H.2	Näherungen	621

I	Die wichtigsten SI-Einheiten der Elektrodynamik	623
J	Physikalische Konstanten	624
K	Schaltsymbole	625
	Hinweise und Lösungen zu den Aufgaben	627
	Sachverzeichnis	663