

# **Inhalt**

## **Kapitel 1 Elektromagnetismus**

1–1	Elektrische Kräfte . . . . .	21
1–2	Elektrische und magnetische Felder . . . . .	25
1–3	Charakteristische Merkmale von Vektorfeldern . . . . .	26
1–4	Die Gesetze des Elektromagnetismus . . . . .	29
1–5	Was sind Felder wirklich? . . . . .	34
1–6	Elektromagnetismus in Wissenschaft und Technik . . . . .	36

## **Kapitel 2 Vektoranalysis**

2–1	Die Physik verstehen . . . . .	37
2–2	Skalare- und Vektorfelder – $T$ und $\mathbf{h}$ . . . . .	38
2–3	Ableitungen von Feldern – der Gradient . . . . .	42
2–4	Der Operator $\nabla$ . . . . .	45
2–5	Operationen mit $\nabla$ . . . . .	47
2–6	Die Differentialgleichung der Wärmeströmung . . . . .	49
2–7	Zweite Ableitungen der Vektorfelder . . . . .	50
2–8	Irrtümer . . . . .	53

## **Kapitel 3 Integralsätze der Vektoranalysis**

3–1	Vektorielle Integrale; das Linienintegral von $\nabla\Psi$ . . . . .	55
3–2	Der Fluß eines Vektorfeldes . . . . .	57
3–3	Der Fluß aus einem Würfel; Gauß'scher Satz . . . . .	60
3–4	Wärmeleitung; die Diffusionsgleichung . . . . .	62
3–5	Die Zirkulation eines Vektorfeldes . . . . .	66
3–6	Die Zirkulation um ein Quadrat; Stokes'scher Satz . . . . .	68
3–7	Wirbelfreie und quellenfreie Felder . . . . .	70
3–8	Zusammenfassung . . . . .	72

## **Kapitel 4 Elektrostatik**

4–1	Elektrostatik . . . . .	74
4–2	Coulomb'sches Gesetz; Überlagerung . . . . .	75
4–3	Elektrisches Potential . . . . .	78
4–4	$E = -\nabla\phi$ . . . . .	82
4–5	Der Fluß von $E$ . . . . .	83
4–6	Gauß'sches Gesetz; die Divergenz von $E$ . . . . .	87
4–7	Feld einer geladenen Kugel . . . . .	89
4–8	Feldlinien; Äquipotentialflächen . . . . .	90

**Kapitel 5 Anwendung des Gauß'schen Gesetzes**

5–1	Elektrostatik ist gleich Gauß'sches Gesetz plus . . . . .	93
5–2	Gleichgewicht in einem elektrostatischen Feld . . . . .	93
5–3	Gleichgewicht in Anwesenheit von Leitern . . . . .	95
5–4	Stabilität von Atomen . . . . .	95
5–5	Das Feld einer geladenen Linie . . . . .	96
5–6	Eine geladene ebene Schicht; zwei ebene Schichten . . . . .	98
5–7	Eine geladene Kugel; eine geladene Kugelschale . . . . .	99
5–8	Ist das Feld einer Punktladung genau $1/r^2$ ? . . . . .	101
5–9	Das Feld eines Leiters . . . . .	104
5–10	Das Feld in einem Hohlraum im Innern eines Leiters . . . . .	106

**Kapitel 6 Das elektrische Feld in Einzelfällen**

6–1	Gleichungen für das elektrische Potential . . . . .	108
6–2	Der elektrische Dipol . . . . .	109
6–3	Bemerkungen über Vektorgleichungen . . . . .	113
6–4	Das Dipolpotential als Gradient . . . . .	114
6–5	Die Dipolnäherung für eine beliebige Verteilung . . . . .	116
6–6	Das Feld geladener Leiter . . . . .	118
6–7	Die Methode der Abbildung . . . . .	119
6–8	Eine Punktladung in der Nähe einer leitenden Ebene . . . . .	121
6–9	Eine Punktladung in der Nähe einer leitenden Kugel . . . . .	122
6–10	Kondensatoren; parallele Platten . . . . .	124
6–11	Durchschlag bei hoher Spannung . . . . .	127
6–12	Das Feldemissionsmikroskop . . . . .	128

**Kapitel 7 Das elektrische Feld in Einzelfällen (Fortsetzung)**

7–1	Methoden zur Ermittlung des elektrostatischen Feldes . . . . .	131
7–2	Zweidimensionale Felder; komplexe Funktionen . . . . .	132
7–3	Plasmaschwingungen . . . . .	137
7–4	Kolloidale Teilchen in einem Elektrolyten . . . . .	141
7–5	Das elektrostatische Feld eines Gitters . . . . .	144

**Kapitel 8 Elektrostatische Energie**

8–1	Die elektrostatische Energie von Ladungen. Eine homogen geladene Kugel . . . . .	147
8–2	Die Energie eines Kondensators. Kräfte auf geladene Leiter . . . . .	149
8–3	Die elektrostatische Energie eines Ionenkristalls . . . . .	153
8–4	Elektrostatische Energie in Kernen . . . . .	156

8–5	Energie im elektrostatischen Feld . . . . .	161
8–6	Die Energie einer Punktladung . . . . .	164

**Kapitel 9 Elektrizität in der Atmosphäre**

9–1	Der Gradient des elektrischen Potentials der Atmosphäre . . . . .	166
9–2	Elektrische Ströme in der Atmosphäre . . . . .	167
9–3	Ursprung der elektrischen Ströme in der Atmosphäre . . . . .	171
9–4	Gewitter . . . . .	172
9–5	Der Mechanismus der Ladungstrennung . . . . .	177
9–6	Der Blitz . . . . .	182

**Kapitel 10 Dielektrika**

10–1	Die Dielektrizitätskonstante . . . . .	186
10–2	Der Polarisationsvektor $P$ . . . . .	188
10–3	Polarisationsladungen . . . . .	189
10–4	Die Gleichungen der Elektrostatik in Anwesenheit von Dielektrika . . . . .	193
10–5	Felder und Kräfte in Anwesenheit von Dielektrika . . . . .	195

**Kapitel 11 Vorgänge im Innern von Dielektrika**

11–1	Molekulare Dipole . . . . .	199
11–2	Elektronenpolarisation . . . . .	200
11–3	Polare Moleküle; Orientierungspolarisation . . . . .	203
11–4	Elektrische Felder in Hohlräumen eines Dielektrikums . . . . .	206
11–5	Die Dielektrizitätskonstante von Flüssigkeiten; die Clausius-Mossotti-Formel . . . . .	209
11–6	Feste Dielektrika . . . . .	210
11–7	Ferroelektrizität; $\text{BaTiO}_3$ . . . . .	212

**Kapitel 12 Elektrostatische Analogien**

12–1	Dieselben Gleichungen haben dieselben Lösungen . . . . .	217
12–2	Wärmeströmung; eine Punktquelle in der Nähe eines unendlichen, ebenen Randes . . . . .	218
12–3	Die aufgespannte Membran . . . . .	223
12–4	Die Diffusion von Neutronen; eine gleichmäßige kugelförmige Quelle in einem homogenen Medium . . . . .	226
12–5	Wirbelfreie Flüssigkeitsströmung; die Strömung um eine Kugel . . . . .	229

---

12–6	Beleuchtung; die gleichmäßige Beleuchtung einer Ebene . . . . .	232
12–7	Die „grundlegende Einheit“ der Natur . . . . .	234

**Kapitel 13 Magnetostatik**

13–1	Das magnetische Feld . . . . .	236
13–2	Der elektrische Strom; die Erhaltung der Ladung . . . . .	237
13–3	Die auf einen Strom ausgeübte magnetische Kraft . . . . .	239
13–4	Das Magnetfeld stationärer Ströme; das Ampère'sche Gesetz . . . . .	240
13–5	Das Magnetfeld eines geraden Drahtes und einer Spule; atomare Ströme . . . . .	242
13–6	Die Relativität magnetischer und elektrischer Felder . . . . .	245
13–7	Die Transformation von Strömen und Ladungen . . . . .	251
13–8	Überlagerung; die Rechte-Hand-Regel . . . . .	252

**Kapitel 14 Das Magnetfeld in Einzelfällen**

14–1	Das Vektorpotential . . . . .	254
14–2	Das Vektorpotential bekannter Ströme . . . . .	258
14–3	Ein gerader Draht . . . . .	259
14–4	Ein langes Solenoid . . . . .	261
14–5	Das Feld einer kleinen Schleife; der magnetische Dipol . . . . .	264
14–6	Das Vektorpotential eines Stromkreises . . . . .	267
14–7	Das Gesetz von Biot und Savart . . . . .	268

**Kapitel 15 Das Vektorpotential**

15–1	Auf eine Stromschleife ausgeübte Kräfte; Energie eines Dipols . . . . .	270
15–2	Mechanische und elektrische Energie . . . . .	273
15–3	Die Energie stationärer Ströme . . . . .	277
15–4	Vergleich von $B$ und $A$ . . . . .	278
15–5	Das Vektorpotential in der Quantenmechanik . . . . .	280
15–6	Was für die Statik stimmt, ist für die Dynamik falsch . . . . .	288

**Kapitel 16 Induzierte Ströme**

16–1	Motoren und Generatoren . . . . .	293
16–2	Transformatoren und Induktivitäten . . . . .	298
16–3	Auf induzierte Ströme ausgeübte Kräfte . . . . .	300
16–4	Elektrotechnik . . . . .	306

**Kapitel 17 Die Induktionsgesetze**

17–1	Die Physik der Induktion . . . . .	309
17–2	Ausnahmen von der „Flußregel“ . . . . .	311
17–3	Beschleunigung von Teilchen durch ein induziertes elektrisches Feld; das Betatron . . . . .	313
17–4	Ein Paradoxon . . . . .	316
17–5	Der Wechselstromgenerator . . . . .	317
17–6	Gegeninduktion . . . . .	321
17–7	Selbstinduktion . . . . .	324
17–8	Induktivität und magnetische Energie . . . . .	326

**Kapitel 18 Die Maxwell-Gleichungen**

18–1	Maxwells Gleichungen . . . . .	331
18–2	Was der neue Term bewirkt . . . . .	334
18–3	Alles über die klassische Physik . . . . .	336
18–4	Ein Feld, das sich ausbreitet . . . . .	337
18–5	Die Lichtgeschwindigkeit . . . . .	342
18–6	Lösung der Maxwell'schen Gleichungen; die Potentiale und die Wellengleichung . . . . .	344

**Kapitel 19 Das Prinzip der kleinsten Wirkung**

Eine Spezialvorlesung – fast wortgetreu . . . . .	348
Nach der Vorlesung angefügte Randbemerkung . . . . .	369

**Kapitel 20 Lösungen der Maxwell'schen Gleichungen im leeren Raum**

20–1	Wellen im leeren Raum; ebene Wellen . . . . .	370
20–2	Wellen in drei Dimensionen . . . . .	380
20–3	Vorstellungsvermögen in der Naturwissenschaft . . . . .	382
20–4	Kugelwellen . . . . .	385

**Kapitel 21 Lösungen der Maxwell-Gleichungen in Anwesenheit von Strömen und Ladungen**

21–1	Licht und elektromagnetische Wellen . . . . .	390
21–2	Von einer Punktquelle ausgehende Kugelwellen . . . . .	392
21–3	Die allgemeine Lösung der Maxwell-Gleichungen . . . . .	394
21–4	Das Feld eines schwingenden Dipols . . . . .	396
21–5	Das Potential einer bewegten Ladung; die allgemeine Lösung von Liénard und Wiechert . . . . .	402
21–6	Das Potential einer Ladung, die sich mit konstanter Geschwindigkeit bewegt; die Lorentz-Formel . . . . .	406

**Kapitel 22 Wechselstromschaltungen**

22–1	Impedanzen . . . . .	410
22–2	Generatoren . . . . .	416
22–3	Netzwerke von idealen Schaltelementen; die Kirchhoff'schen Gesetze . . . . .	420
22–4	Ersatzschaltungen . . . . .	426
22–5	Energie . . . . .	427
22–6	Ein leiterförmiges Netzwerk . . . . .	429
22–7	Filter . . . . .	432
22–8	Andere Schaltelemente . . . . .	436

**Kapitel 23 Hohlraumresonatoren**

23–1	Wirkliche Schaltelemente . . . . .	440
23–2	Ein Kondensator bei hohen Frequenzen . . . . .	442
23–3	Ein Hohlraumresonator . . . . .	448
23–4	Eigenschwingungen eines Hohlraums . . . . .	453
23–5	Hohlräume und Resonanzkreise . . . . .	456

**Kapitel 24 Wellenleiter**

24–1	Die Übertragungsleitung . . . . .	459
24–2	Das rechteckige Hohlrohr . . . . .	463
24–3	Die Grenzfrequenz . . . . .	467
24–4	Die Geschwindigkeit der geleiteten Wellen . . . . .	469
24–5	Der Nachweis geleiteter Wellen . . . . .	470
24–6	Hohlleiter-Klempnerei . . . . .	471
24–7	Eigenschwingungen von Hohlleitern . . . . .	474
24–8	Eine andere Betrachtungsweise geleiteter Wellen . . . . .	475

**Kapitel 25 Elektrodynamik in relativistischer Bezeichnungsweise**

25–1	Vierervektoren . . . . .	479
25–2	Das Skalarprodukt . . . . .	482
25–3	Der vierdimensionale Gradient . . . . .	486
25–4	Elektrodynamik in vierdimensionaler Bezeichnungs- weise . . . . .	490
25–5	Das Viererpotential einer bewegten Ladung . . . . .	491
25–6	Die Invarianz der Gleichungen der Elektrodynamik . . . . .	492

**Kapitel 26 Lorentztransformation der Felder**

26–1	Das Viererpotential einer bewegten Ladung . . . . .	495
26–2	Das Feld einer Punktladung mit konstanter Geschwindigkeit . . . . .	497

---

26–3 Relativistische Transformation der Felder . . . . .	502
26–4 Die Bewegungsgleichungen in relativistischer Schreibweise . . . . .	510
<b>Kapitel 27 Energie und Impuls des Feldes</b>	
27–1 Lokale Erhaltung . . . . .	515
27–2 Energieerhaltung und Elektromagnetismus . . . . .	516
27–3 Energiedichte und Energieströmung im elektromagnetischen Feld . . . . .	518
27–4 Die Mehrdeutigkeit der Feldenergie . . . . .	521
27–5 Beispiele für Energieströmung . . . . .	522
27–6 Impuls des Feldes . . . . .	527
<b>Kapitel 28 Elektromagnetische Masse</b>	
28–1 Die Energie des Feldes einer Punktladung . . . . .	532
28–2 Der Impuls des Feldes einer bewegten Ladung . . . . .	533
28–3 Elektromagnetische Masse . . . . .	535
28–4 Die Kraft eines Elektrons auf sich selbst . . . . .	537
28–5 Versuche einer Abänderung der Maxwell'schen Theorie . . . . .	539
28–6 Das Feld der Kernkräfte . . . . .	548
<b>Kapitel 29 Die Bewegung von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern</b>	
29–1 Bewegung in einem homogenen elektrischen oder magnetischen Feld . . . . .	551
29–2 Analyse nach Impulsen . . . . .	552
29–3 Eine elektrostatische Linse . . . . .	554
29–4 Eine magnetische Linse . . . . .	555
29–5 Das Elektronenmikroskop . . . . .	556
29–6 Führungsfelder in Beschleunigern . . . . .	558
29–7 Fokussierung mit alternierendem Gradienten . . . . .	561
29–8 Bewegung in gekreuzten elektrischen und magnetischen Feldern . . . . .	565
<b>Kapitel 30 Innere Geometrie von Kristallen</b>	
30–1 Die innere Geometrie von Kristallen . . . . .	566
30–2 Chemische Bindung in Kristallen . . . . .	569
30–3 Das Wachstum von Kristallen . . . . .	570
30–4 Kristallgitter . . . . .	570
30–5 Symmetrien in zwei Dimensionen . . . . .	572
30–6 Symmetrien in drei Dimensionen . . . . .	576

---

30–7	Die mechanische Festigkeit von Metallen . . . . .	578
30–8	Versetzungen und Kristallwachstum . . . . .	580
30–9	Das Kristallmodell von Bragg-Nye . . . . .	581

**Kapitel 31 Tensoren**

31–1	Der Polarisationstensor . . . . .	607
31–2	Transformation von Tensorkomponenten . . . . .	609
31–3	Das Energieellipsoid . . . . .	611
31–4	Andere Tensoren; der Trägheitstensor . . . . .	615
31–5	Das Vektorprodukt . . . . .	617
31–6	Der Spannungstensor . . . . .	618
31–7	Tensoren höherer Stufe . . . . .	623
31–8	Der Vierertensor des elektromagnetischen Impulses . . . . .	624

**Kapitel 32 Der Brechungsindex dichter Materialien**

32–1	Polarisation von Materie . . . . .	627
32–2	Maxwells Gleichungen in einem Dielektrikum . . . . .	630
32–3	Wellen in einem Dielektrikum . . . . .	632
32–4	Der komplexe Brechungsindex . . . . .	636
32–5	Der Index einer Mischung . . . . .	637
32–6	Wellen in Metallen . . . . .	639
32–7	Näherungen für niedrige und hohe Frequenzen; die Eindringtiefe und die Plasmafrequenz . . . . .	641

**Kapitel 33 Reflexion an Oberflächen**

33–1	Reflexion und Brechung von Licht . . . . .	646
33–2	Wellen in dichten Materialien . . . . .	647
33–3	Die Randbedingungen . . . . .	651
33–4	Reflektierte und durchgelassene Wellen . . . . .	656
33–5	Reflexion an Metallen . . . . .	662
33–6	Totalreflexion . . . . .	663

**Kapitel 34 Der Magnetismus der Materie**

34–1	Diamagnetismus und Paramagnetismus . . . . .	666
34–2	Magnetische Momente und Drehimpuls . . . . .	668
34–3	Die Präzession atomarer Magnete . . . . .	671
34–4	Diamagnetismus . . . . .	672
34–5	Der Larmorsche Satz . . . . .	674
34–6	Die klassische Physik ergibt weder Diamagnetismus noch Paramagnetismus . . . . .	676
34–7	Der Drehimpuls in der Quantenmechanik . . . . .	677
34–8	Die magnetische Energie von Atomen . . . . .	681

**Kapitel 35 Paramagnetismus und magnetische Resonanz**

35–1	Quantisierte magnetische Zustände . . . . .	683
35–2	Der Stern-Gerlach-Versuch . . . . .	685
35–3	Die Rabi'sche Molekularstrahl-Methode . . . . .	687
35–4	Der Paramagnetismus der Stoffe . . . . .	691
35–5	Kühlung durch adiabatische Entmagnetisierung . . . . .	695
35–6	Magnetische Kernresonanz . . . . .	697

**Kapitel 36 Ferromagnetismus**

36–1	Magnetisierungsströme . . . . .	701
36–2	Das Feld $\mathbf{H}$ . . . . .	708
36–3	Die Magnetisierungskurve . . . . .	710
36–4	Induktivitäten mit Eisenkern . . . . .	713
36–5	Elektromagneten . . . . .	715
36–6	Spontane Magnetisierung . . . . .	718

**Kapitel 37 Magnetische Materialien**

37–1	Den Ferromagnetismus verstehen . . . . .	726
37–2	Thermodynamische Eigenschaften . . . . .	730
37–3	Die Hysteresiskurve . . . . .	733
37–4	Ferromagnetische Materialien . . . . .	740
37–5	Ungewöhnliche magnetische Materialien . . . . .	742

**Kapitel 38 Elastizität**

38–1	Das Hooke'sche Gesetz . . . . .	746
38–2	Homogene Deformationen . . . . .	748
38–3	Der Torsionsstab; Scherungswellen . . . . .	754
38–4	Der gebogene Balken . . . . .	758
38–5	Knicken . . . . .	762

**Kapitel 39 Elastische Materialien**

39–1	Der Verzerrungstensor . . . . .	766
39–2	Der Elastizitätstensor . . . . .	770
39–3	Bewegungen in einem elastischen Körper . . . . .	773
39–4	Unelastisches Verhalten . . . . .	778
39–5	Berechnung der elastischen Konstanten . . . . .	780

**Kapitel 40 Die Strömung von trockenem Wasser**

40–1	Hydrostatik . . . . .	786
40–2	Die Bewegungsgleichungen . . . . .	788
40–3	Stationäre Strömung – das Theorem von Bernoulli . . . . .	793
40–4	Zirkulation . . . . .	799
40–5	Wirbellinien . . . . .	801

**Kapitel 41 Die Strömung von nassem Wasser**

41–1	Viskosität . . . . .	805
41–2	Viskose Strömung . . . . .	809
41–3	Die Reynolds'sche Zahl . . . . .	811
41–4	Die Strömung an einem kreisförmigen Zylinder vorbei . . . . .	814
41–5	Der Grenzfall verschwindender Viskosität . . . . .	817
41–6	Couette'sche Strömung . . . . .	818

**Kapitel 42 Der gekrümmte Raum**

42–1	Gekrümmte Räume mit zwei Dimensionen . . . . .	822
42–2	Die Krümmung im dreidimensionalen Raum . . . . .	829
42–3	Unser Raum ist gekrümmt . . . . .	831
42–4	Die Geometrie in Raum und Zeit . . . . .	833
42–5	Die Gravitation und das Äquivalenzprinzip . . . . .	834
42–6	Die Ganggeschwindigkeit von Uhren in einem Gravitationsfeld . . . . .	835
42–7	Die Krümmung in Raum und Zeit . . . . .	839
42–8	Bewegung in einer gekrümmten Welt . . . . .	840
42–9	Einstiens Gravitationstheorie . . . . .	843

<b>Register . . . . .</b>	<b>845</b>
---------------------------	------------