

Feynman

Vorlesungen über Physik

Band II

Hauptsächlich Elektromagnetismus
und Struktur der Materie

von

Richard P Feynman

Richard Chace Tolman Professor of Theoretical Physics
California Institute of Technology

Robert B. Leighton

Professor of Physics
California Institute of Technology

Matthew Sands

Professor
Stanford University

mit 483 Figuren und 18 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1987

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 h	38
2-3	Ableitungen von Feldern — der Gradient	42
2-4	Der Operator ∇	45
2-5	Operationen mit ∇	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 \mathbf{v}^\wedge	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'sehen 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; 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 Ampere'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 Lienard 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 Bezeichnungweise

25-1	Vierervektoren	479
25-2	Das Skalarprodukt	482
25—3	Der vierdimensionale Gradient	486
25—4	Elektrodynamik in vierdimensionaler Bezeichnung- 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
Kapitel 27 Energie und Impuls des Feldes		
27-1	Lokale Erhaltung	515
27—2	Energieerhaltung und Elektromagnetismus.	516
27—3	Energiedichte und Energie Strömung im elektromagnetischen Feld.	518
27—4	Die Mehrdeutigkeit der Feldenergie.	521
27—5	Beispiele für Energieströmung	522
27-6	Impuls des Feldes.	527
Kapitel 28 Elektromagnetische Masse		
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
Kapitel 29 Die Bewegung von Ladungen in elektrischen und magnetischen Feldern		
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
Kapitel 30 Innere Geometrie von Kristallen		
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 Polarisationsensor	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 Rabische 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 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'sehe 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	Einsteins Gravitationstheorie	843

Register.	845
----------------------------	-----