

Feynman

Vorlesungen über Physik

Band II

Hauptsächlich Elektromagnetismus
und Struktur der Materie

von

Richard E 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

2. Auflage

R. Oldenbourg Verlag München Wien

Inhalt

Kapitel 1 Elektromagnetismus

| | | |
|-----|--|----|
| 1-1 | Elektrische Kräfte | 21 |
| 1-2 | Elektrische und magnetische Felder | 25 |
| [3 | Charakteristische Merkmale von Vektorfeldern | 26 |
| 1-4 | Die Gesetze des Elektromagnetismus | 29 |
| 1-5 | Was sind Felder wirklich? | 34 |
| -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 $\mathbf{v} \cdot d\mathbf{s}$ | 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; $BaTiO_3$ | 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'sehen 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 Energieströmung 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'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 | Einsteins Gravitationstheorie | 843 |

| | | |
|-----------------|--|-----|
| Register | | 845 |
|-----------------|--|-----|