

---

Wolfgang Demtröder

# Experimentalphysik 2

Elektrizität und Optik

Mit 608, meist zweifarbigen Abbildungen,  
11 Farbtafeln, 17 Tabellen,  
zahlreichen durchgerechneten Beispielen  
und 132 Übungsaufgaben  
mit ausführlichen Lösungen



Springer

Professor Dr. Wolfgang Demtröder

Universität Kaiserslautern

Fachbereich Physik

D-67653 Kaiserslautern

ISBN 3-540-57095-0 Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Demtröder, Wolfgang: Experimentalphysik / Wolfgang Demtröder.

– Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokio; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer

(Springer-Lehrbuch)

2. Elektrizität und Optik: mit 17 Tabellen, zahlreichen durchgerechneten Beispielen, 132 Übungsaufgaben mit ausführlichen Lösungen. – 1995

ISBN 3-540-57095-0

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1995

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz: Datenkonvertierung und Umbruch durch Mitterweger, Planckstadt – über das Satzsystem 3B2

Druck und Einband: Appl, Wemding

SPIN: 10061375

56/3144 – 5 4 3 2 1 0 – Gedruckt auf säurefreiem Papier

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Elektrostatik

1.1	Elektrische Ladungen; Coulomb-Gesetz	1
1.2	Das elektrische Feld	5
1.2.1	Elektrische Feldstärke	5
1.2.2	Elektrischer Kraftfluß; Ladungen als Quellen des elektrischen Feldes	7
1.3	Elektrostatistisches Potential	8
1.3.1	Potential und Spannung	9
1.3.2	Potentialgleichung	10
1.3.3	Äquipotentialflächen	10
1.3.4	Spezielle Ladungsverteilungen	11
1.4	Multipole	13
1.4.1	Der elektrische Dipol	14
1.4.2	Der elektrische Quadrupol	16
1.4.3	Multipol-Entwicklung	16
1.5	Leiter im elektrischen Feld	17
1.5.1	Influenz	18
1.5.2	Kondensatoren	19
1.6	Die Energie des elektrischen Feldes	22
1.7	Dielektrika im elektrischen Feld	23
1.7.1	Dielektrische Polarisierung	23
1.7.2	Polarisationsladungen	24
1.7.3	Die Gleichungen des elektrostatischen Feldes in Materie	25
1.7.4	Die elektrische Feldenergie im Dielektrikum	28
1.8	Die atomaren Grundlagen von Ladungen und elektrischen Momenten	30
1.8.1	Der Millikan-Versuch	30
1.8.2	Ablenkung von Elektronen und Ionen in elektrischen Feldern	31
1.8.3	Molekulare Dipolmomente	31
1.9	Elektrostatik in Natur und Technik	34
1.9.1	Reibungselektrizität und Kontaktpotential	34
1.9.2	Das elektrische Feld der Erde und ihrer Atmosphäre	35
1.9.3	Die Entstehung von Gewittern	35
1.9.4	Elektrostatische Staubfilter	36

1.9.5	Elektrostatische Farbbeschichtung . . . . .	36
1.9.6	Elektrostatische Kopierer und Drucker . . . . .	37
	Zusammenfassung . . . . .	38
	Übungsaufgaben . . . . .	39

## 2. Der elektrische Strom

2.1	Strom als Ladungstransport . . . . .	41
2.2	Elektrischer Widerstand und Ohmsches Gesetz . . . . .	43
2.2.1	Driftgeschwindigkeit und Stromdichte . . . . .	43
2.2.2	Das Ohmsche Gesetz . . . . .	45
2.2.3	Beispiele für die Anwendung des Ohmschen Gesetzes . . . . .	46
2.2.4	Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes fester Körper; Supraleitung . . . . .	47
2.3	Stromleistung und Joulesche Wärme . . . . .	52
2.4	Netzwerke; Kirchhoffsche Regeln . . . . .	52
2.4.1	Reihenschaltung von Widerständen . . . . .	53
2.4.2	Parallelschaltung von Widerständen . . . . .	54
2.4.3	Wheatstonesche Brückenschaltung . . . . .	54
2.5	Meßverfahren für elektrische Ströme . . . . .	54
2.5.1	Strommeßgeräte . . . . .	55
2.5.2	Schaltung von Amperemetern . . . . .	56
2.5.3	Strommeßgeräte als Voltmeter . . . . .	56
2.6	Ionenleitung in Flüssigkeiten . . . . .	57
2.7	Stromtransport in Gasen; Gasentladungen . . . . .	58
2.7.1	Ladungsträgerkonzentration . . . . .	59
2.7.2	Erzeugungsmechanismen für Ladungsträger . . . . .	59
2.7.3	Strom-Spannungs-Kennlinie . . . . .	60
2.7.4	Mechanismus von Gasentladungen . . . . .	61
2.7.5	Verschiedene Typen von Gasentladungen . . . . .	63
2.8	Stromquellen . . . . .	65
2.8.1	Innenwiderstand einer Stromquelle . . . . .	66
2.8.2	Galvanische Elemente . . . . .	66
2.8.3	Akkumulatoren . . . . .	68
2.8.4	Verschiedene Typen von Batterien . . . . .	69
2.8.5	Chemische Brennstoffzellen . . . . .	70
2.9	Thermische Stromquellen . . . . .	71
2.9.1	Kontaktpotential . . . . .	71
2.9.2	Thermoelektrische Spannung . . . . .	72
2.9.3	Peltier-Effekt . . . . .	73
	Zusammenfassung . . . . .	74
	Übungsaufgaben . . . . .	74

## 3. Statische Magnetfelder

3.1	Permanentmagnete; Polstärke . . . . .	77
3.2	Magnetfelder stationärer Ströme . . . . .	79
3.2.1	Magnetischer Kraftfluß und magnetische Spannung . . . . .	80
3.2.2	Das Magnetfeld eines geraden Stromleiters . . . . .	81

3.2.3	Magnetfeld im Inneren einer langgestreckten Spule . . .	81
3.2.4	Das Vektorpotential . . . . .	82
3.2.5	Das magnetische Feld einer beliebigen Stromverteilung; Biot-Savart-Gesetz . . . . .	83
3.2.6	Beispiele zur Berechnung von magnetischen Feldern spezieller Stromanordnungen . . . . .	84
3.3	Kräfte auf bewegte Ladungen im Magnetfeld . . . . .	87
3.3.1	Experimentelle Demonstration der Lorentz-Kraft . . . . .	89
3.3.2	Elektronen- und Ionenoptik mit Magnetfeldern . . . . .	90
3.3.3	Kräfte auf stromdurchflossene Leiter im Magnetfeld . . .	91
3.3.4	Hall-Effekt . . . . .	92
3.3.5	Das Barlowsche Rad zur Demonstration der „Elektronenreibung“ in Metallen . . . . .	93
3.3.6	Kräfte zwischen zwei parallelen Stromleitern . . . . .	93
3.4	Elektromagnetisches Feld und Relativitätsprinzip . . . . .	94
3.4.1	Das elektrische Feld einer bewegten Ladung . . . . .	94
3.4.2	Zusammenhang zwischen elektrischem und magnetischem Feld . . . . .	96
3.4.3	Relativistische Transformation von Ladungsdichte und Strom . . . . .	97
3.4.4	Transformationsgleichungen für das elektromagnetische Feld . . . . .	99
3.5	Materie im Magnetfeld . . . . .	100
3.5.1	Magnetische Dipole . . . . .	100
3.5.2	Magnetisierung und magnetische Suszeptibilität . . . . .	102
3.5.3	Diamagnetismus . . . . .	103
3.5.4	Paramagnetismus . . . . .	105
3.5.5	Ferromagnetismus . . . . .	105
3.5.6	Antiferro-, Ferrimagnete und Ferrite . . . . .	108
3.5.7	Feldgleichungen in Materie . . . . .	109
3.5.8	Elektromagnete . . . . .	110
3.6	Das Magnetfeld der Erde . . . . .	110
	Zusammenfassung . . . . .	113
	Übungsaufgaben . . . . .	114

#### 4. Zeitlich veränderliche Felder

4.1	Faradaysches Induktionsgesetz . . . . .	117
4.2	Lenzsche Regel . . . . .	120
4.2.1	Durch Induktion angefachte Bewegung . . . . .	120
4.2.2	Elektromagnetische Schleuder . . . . .	121
4.2.3	Wirbelströme . . . . .	121
4.3	Selbstinduktion und gegenseitige Induktion . . . . .	122
4.3.1	Selbstinduktion . . . . .	122
4.3.2	Gegenseitige Induktion . . . . .	124
4.4	Die Energie des magnetischen Feldes . . . . .	126
4.5	Der Verschiebungsstrom . . . . .	126
4.6	Maxwell-Gleichungen und elektrodynamische Potentiale . . . .	128

Zusammenfassung .....	130
Übungsaufgaben .....	131

## 5. Elektrotechnische Anwendungen

5.1 Elektrische Generatoren und Motoren .....	133
5.1.1 Gleichstrommaschinen .....	135
5.1.2 Wechselstromgeneratoren .....	138
5.2 Wechselstrom .....	138
5.3 Mehrphasenstrom; Drehstrom .....	140
5.4 Wechselstromkreise mit komplexen Widerständen; Zeigerdiagramme .....	143
5.4.1 Wechselstromkreis mit Induktivität .....	143
5.4.2 Wechselstromkreis mit Kapazität .....	143
5.4.3 Allgemeiner Fall .....	144
5.5 Lineare Netzwerke; Hoch- und Tiefpässe; Frequenzfilter ...	145
5.5.1 Hochpaß .....	145
5.5.2 Tiefpaß .....	147
5.5.3 Frequenzfilter .....	147
5.6 Transformatoren .....	148
5.6.1 Unbelasteter Transformator .....	149
5.6.2 Belasteter Transformator .....	150
5.6.3 Anwendungsbeispiele .....	151
5.7 Gleichrichtung .....	152
5.7.1 Einweggleichrichtung .....	153
5.7.2 Zweiweggleichrichtung .....	153
5.7.3 Brückenschaltung .....	153
5.7.4 Kaskadenschaltung .....	155
5.8 Impedanz-Anpassung bei Wechselstromkreisen .....	155
5.9 Elektronenröhren .....	156
5.9.1 Vakuum-Dioden .....	156
5.9.2 Triode .....	156
Zusammenfassung .....	157
Übungsaufgaben .....	158

## 6. Elektromagnetische Schwingungen und die Entstehung elektromagnetischer Wellen

6.1 Der elektromagnetische Schwingkreis .....	161
6.1.1 Gedämpfte elektromagnetische Schwingungen .....	162
6.1.2 Erzwungene Schwingungen .....	163
6.2 Gekoppelte Schwingkreise .....	164
6.3 Erzeugung ungedämpfter Schwingungen .....	166
6.4 Offene Schwingkreise; Hertzscher Dipol .....	168
6.4.1 Experimentelle Realisierung eines Senders .....	169
6.4.2 Das elektromagnetische Feld des schwingenden Dipols	170
6.5 Die Abstrahlung des schwingenden Dipols .....	175
6.5.1 Die abgestrahlte Leistung .....	175

6.5.2	Strahlungsdämpfung . . . . .	176
6.5.3	Frequenzspektrum der abgestrahlten Leistung . . . . .	176
6.5.4	Die Abstrahlung einer beschleunigten Ladung . . . . .	177
	Zusammenfassung . . . . .	180
	Übungsaufgaben . . . . .	180

**7. Elektromagnetische Wellen im Vakuum**

7.1	Die Wellengleichung . . . . .	183
7.2	Ebene elektrische Wellen . . . . .	183
7.3	Periodische Wellen . . . . .	184
7.4	Polarisation elektromagnetischer Wellen . . . . .	185
7.4.1	Linear polarisierte Wellen . . . . .	185
7.4.2	Zirkular polarisierte Wellen . . . . .	186
7.4.3	Elliptisch polarisierte Wellen . . . . .	186
7.4.4	Unpolarisierte Wellen . . . . .	186
7.5	Das Magnetfeld elektromagnetischer Wellen . . . . .	186
7.6	Energie- und Impulstransport durch elektromagnetische Wellen	188
7.7	Messung der Lichtgeschwindigkeit . . . . .	191
7.7.1	Die astronomische Methode von Ole Rømer . . . . .	191
7.7.2	Die Zahnradmethode von Fizeau . . . . .	192
7.7.3	Phasenmethode . . . . .	192
7.7.4	Bestimmung von $c$ aus der Messung von Frequenz und Wellenlänge . . . . .	193
7.8	Stehende elektromagnetische Wellen . . . . .	193
7.8.1	Eindimensionale stehende Wellen . . . . .	193
7.8.2	Dreidimensionale stehende Wellen; Hohlraumresonatoren . . . . .	194
7.9	Wellen in Wellenleitern und Kabeln . . . . .	196
7.9.1	Wellen zwischen zwei planparallelen leitenden Platten	196
7.9.2	Hohlleiter mit rechteckigem Querschnitt . . . . .	198
7.9.3	Drahtwellen; Lecherleitung; Koaxialkabel . . . . .	201
7.9.4	Beispiele für Wellenleiter . . . . .	203
7.10	Das elektromagnetische Frequenzspektrum . . . . .	204
	Zusammenfassung . . . . .	206
	Übungsaufgaben . . . . .	207

**8. Elektromagnetische Wellen in Materie**

8.1	Brechungsindex . . . . .	209
8.1.1	Makroskopische Beschreibung . . . . .	210
8.1.2	Mikroskopisches Modell . . . . .	210
8.2	Absorption und Dispersion . . . . .	212
8.3	Lichtstreuung . . . . .	215
8.3.1	Kohärente Streuung; Interferenz . . . . .	215
8.3.2	Inkohärente Streuung . . . . .	217
8.3.3	Streuquerschnitte . . . . .	218
8.3.4	Lichtstreuung in unserer Atmosphäre . . . . .	219
8.3.5	Streuung an Mikropartikeln; Mie-Streuung . . . . .	221

8.4	Wellengleichung für elektromagnetische Wellen in Materie . . .	221
8.4.1	Wellen in nichtleitenden Medien . . . . .	222
8.4.2	Wellen in leitenden Medien . . . . .	223
8.4.3	Die elektromagnetische Energie von Wellen in Medien . . . . .	224
8.5	Wellen an Grenzflächen zwischen zwei Medien . . . . .	225
8.5.1	Randbedingungen für elektrische und magnetische Feldstärke . . . . .	225
8.5.2	Reflexions- und Brechungsgesetz . . . . .	226
8.5.3	Amplitude und Polarisierung von reflektierten und gebrochenen Wellen . . . . .	227
8.5.4	Reflexions- und Transmissionsvermögen einer Grenzfläche . . . . .	228
8.5.5	Brewsterwinkel . . . . .	230
8.5.6	Totalreflexion . . . . .	230
8.5.7	Änderung der Polarisierung bei schrägem Lichteinfall .	232
8.5.8	Phasenänderung bei der Reflexion . . . . .	232
8.5.9	Reflexion an Metalloberflächen . . . . .	233
8.6	Lichtausbreitung in nichtisotropen Medien; Doppelbrechung . .	235
8.6.1	Ausbreitung von Lichtwellen in anisotropen Medien . .	235
8.6.2	Brechungsindex-Ellipsoid . . . . .	237
8.6.3	Doppelbrechung . . . . .	238
8.7	Erzeugung und Anwendung von polarisiertem Licht . . . . .	239
8.7.1	Erzeugung von linear polarisiertem Licht durch Reflexion . . . . .	240
8.7.2	Erzeugung von linear polarisiertem Licht beim Durchgang durch dichroitische Kristalle . . . . .	240
8.7.3	Doppelbrechende Polarisatoren . . . . .	241
8.7.4	Polarisationsdreher . . . . .	243
8.7.5	Optische Aktivität . . . . .	243
8.7.6	Spannungsdoppelbrechung . . . . .	245
8.8	Nichtlineare Optik . . . . .	246
8.8.1	Optische Frequenzverdopplung . . . . .	246
8.8.2	Optische Frequenzmischung . . . . .	247
	Zusammenfassung . . . . .	248
	Übungsaufgaben . . . . .	249

## 9. Geometrische Optik

9.1	Grundaxiome der geometrischen Optik . . . . .	252
9.2	Die optische Abbildung . . . . .	253
9.3	Hohlspiegel . . . . .	254
9.4	Prismen . . . . .	258
9.5	Linsen . . . . .	259
9.5.1	Brechung an einer gekrümmten Fläche . . . . .	259
9.5.2	Dünne Linsen . . . . .	261
9.5.3	Dicke Linsen . . . . .	263
9.5.4	Linsensysteme . . . . .	264

9.5.5	Linsenfehler . . . . .	266
9.5.6	Die aplanatische Abbildung . . . . .	273
9.6	Matrixmethoden der geometrischen Optik . . . . .	275
9.6.1	Grundlagen der Matrixbeschreibung . . . . .	275
9.6.2	Transformationsmatrix einer Linse . . . . .	276
9.6.3	Abbildungsmatrix . . . . .	276
9.6.4	Matrizen von Linsensystemen . . . . .	277
9.7	Geometrische Optik der Erdatmosphäre . . . . .	278
9.7.1	Ablenkung von Lichtstrahlen in der Atmosphäre . . . . .	278
9.7.2	Regenbogen . . . . .	279
	Zusammenfassung . . . . .	281
	Übungsaufgaben . . . . .	281

## 10. Interferenz und Beugung

10.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz . . . . .	283
10.2	Erzeugung und Überlagerung kohärenter Wellen . . . . .	285
10.3	Experimentelle Realisierung der Zweistrahl-Interferenz . . . . .	286
10.3.1	Fresnelscher Spiegelversuch . . . . .	286
10.3.2	Youngscher Doppelspaltversuch . . . . .	287
10.3.3	Interferenz an einer planparallelen Platte . . . . .	288
10.3.4	Michelson-Interferometer . . . . .	289
10.3.5	Das Michelson-Morley-Experiment . . . . .	291
10.4	Vielstrahl-Interferenz . . . . .	294
10.4.1	Fabry-Perot-Interferometer . . . . .	296
10.4.2	Dielektrische Spiegel . . . . .	299
10.4.3	Antireflexschicht . . . . .	300
10.5	Beugung . . . . .	301
10.5.1	Beugung am Spalt . . . . .	301
10.5.2	Beugungsgitter . . . . .	303
10.6	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung . . . . .	306
10.6.1	Fresnelsche Zonen . . . . .	306
10.6.2	Fresnelsche Zonenplatte . . . . .	309
10.7	Allgemeine Behandlung der Beugung . . . . .	310
10.7.1	Das Beugungsintegral . . . . .	310
10.7.2	Fresnel-Beugung an einem Spalt . . . . .	311
10.7.3	Fresnel-Beugung an einer Kante . . . . .	312
10.7.4	Fresnel-Beugung an einer kreisförmigen Öffnung . . . . .	312
10.7.5	Babinetsches Theorem . . . . .	313
	Zusammenfassung . . . . .	314
	Übungsaufgaben . . . . .	315

## 11. Optische Instrumente und Techniken

11.1	Das Auge . . . . .	317
11.1.1	Aufbau des Auges . . . . .	317
11.1.2	Kurz- und Weitsichtigkeit . . . . .	319
11.1.3	Räumliche Auflösung und Empfindlichkeit des Auges . . . . .	319

11.2	Vergrößernde optische Instrumente . . . . .	320
11.2.1	Die Lupe . . . . .	320
11.2.2	Das Mikroskop . . . . .	321
11.2.3	Das Fernrohr . . . . .	322
11.3	Die Rolle der Beugung bei optischen Instrumenten . . . . .	324
11.3.1	Auflösungsvermögen des Fernrohrs . . . . .	324
11.3.2	Auflösungsvermögen des Auges . . . . .	326
11.3.3	Auflösungsvermögen des Mikroskops . . . . .	326
11.3.4	Abbesche Theorie der Abbildung . . . . .	327
11.4	Die Lichtstärke optischer Instrumente . . . . .	329
11.5	Konfokale Mikroskopie . . . . .	330
11.6	Spektrographen und Monochromatoren . . . . .	331
11.6.1	Prismenspektrographen . . . . .	331
11.6.2	Gittermonochromator . . . . .	332
11.6.3	Das spektrale Auflösungsvermögen von Spektrographen . . . . .	332
11.6.4	Ein allgemeiner Ausdruck für das spektrale Auflösungsvermögen . . . . .	335
11.7	Adaptive Optik . . . . .	336
11.8	Holographie . . . . .	338
11.8.1	Aufnahme eines Hologramms . . . . .	338
11.8.2	Die Rekonstruktion des Wellenfeldes . . . . .	340
11.8.3	Anwendungen der Holographie . . . . .	341
	Zusammenfassung . . . . .	342
	Übungsaufgaben . . . . .	343

**12. Thermische Strahlung; Photonen**

12.1	Emissions- und Absorptionsvermögen eines Körpers . . . . .	345
12.2	Charakteristische Größen thermischer Strahlung . . . . .	349
12.3	Hohlraumstrahlung . . . . .	351
12.4	Das Plancksche Strahlungsgesetz . . . . .	352
12.5	Wiensches Verschiebungsgesetz . . . . .	355
12.6	Das Stefan-Boltzmannsche Strahlungsgesetz . . . . .	356
12.7	Photonen . . . . .	357
	Zusammenfassung . . . . .	360
	Übungsaufgaben . . . . .	360

<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> . . . . .	363
--	-----

<b>Farbtafeln</b> . . . . .	415
-----------------------------	-----

<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	423
---------------------------------------	-----

<b>Sachwortverzeichnis</b> . . . . .	427
--------------------------------------	-----