
Physik III

Optik, Quantenphänomene und
Aufbau der Atome

Einführungskurs für Studierende der
Naturwissenschaften und Elektrotechnik

von
Wolfgang Zinth
und
Hans-Joachim Körner

2., verbesserte Auflage

Mit 154 Bildern und 13 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1996

Inhalt

A.	Optik	1
1.	Einführung und historischer Überblick	1
2.	Die elektromagnetische Theorie des Lichtes	5
2.1	Die Wellengleichung und ihre Lösungen	5
2.2	Energie und Impuls von Licht	11
2.3	Phasen- und Gruppengeschwindigkeit	13
2.4	Dispersion von Licht	15
2.4.1	Die Frequenzabhängigkeit der Dielektrizitätskonstante	16
2.4.2	Der Brechungsindex	17
2.4.3	Die Absorption von Licht	18
2.4.4	Die Dispersion von dichten Medien	21
2.4.5	Brechungsindex und Absorption von Metallen	23
2.5	Elektromagnetische Wellen an Grenzflächen	24
2.5.1	Reflexions- und Brechungsgesetz	25
2.5.2	Die Fresnelschen Formeln für den Reflexionsgrad einer Grenzfläche .	27
2.5.3	Anwendungen der Totalreflexion	32
2.5.4	Totalreflexion und evaneszente Wellen	36
2.5.5	Das Reflexionsvermögen absorbierender Medien	37
2.5.6	Die Farbe von Gegenständen	38
2.5.7	Streuung von elektromagnetischen Wellen	40

3.	Die Geometrische Optik	43
3.1	Das Fermatsche Prinzip	44
3.1.1	Das Reflexionsgesetz	46
3.1.2	Das Fermatsche Prinzip und das Brechungsgesetz	47
3.2	Strahlenablenkung durch ein Prisma	50
3.3	Die optische Abbildung	51
3.3.1	Reelle und virtuelle Abbildungen	52
3.3.2	Abbildung an einem Kugelspiegel	53
3.3.3	Abbildung durch brechende Kugelflächen	55
3.3.4	Abbildungsgleichung für dünne Linsen	57
3.3.5	Dicke Linsen und Linsensysteme	60
3.3.6	Linsenfehler	64
3.3.7	Begrenzungen in optischen Systemen	69
3.3.8	Design und Herstellung von Objektiven	71
3.4	Instrumente der geometrischen Optik	72
3.4.1	Der Projektionsapparat	72
3.4.2	Die photographische Kamera	73
3.4.3	Das Auge	77
3.4.4	Vergrößernde optische Instrumente	79
3.5	Elektronenoptik	89
4.	Welleneigenschaften von Licht	93
4.1	Die Kirchhoffsche Beugungstheorie	94
4.2	Fresnelsche und Fraunhofersche Beugung	97
4.2.1	Die Fresnelsche Beugung	99

4.2.2 Fraunhofersche Beugung	101
4.2.3 Das Babinetsche Prinzip	102
4.3 Spezielle Fälle der Fraunhoferschen Beugung	102
4.3.1 Beugung an einem langen Spalt	102
4.3.2 Beugung an einer Rechteckblende	105
4.3.3 Beugung an einer kreisförmigen Öffnung	106
4.3.4 Beugung am Doppelspalt	107
4.3.5 Beugung am Gitter	111
4.3.6 Gitterspektrometer	115
4.3.7 Beugung an mehrdimensionalen Gittern	117
4.4 Interferenz	121
4.4.1 Die Kohärenz von Lichtquellen	123
4.4.2 Spezielle Interferometeranordnungen	125
4.4.3 Interferenzen dünner Schichten	129
4.4.4 Vielfachinterferenzen am Beispiel des Fabry-Perot-Interferometers	135
4.5 Anwendungen von Beugung und Interferenz	141
4.5.1 Das Auflösungsvermögen optischer Geräte	141
4.5.2 Die Abbesche Theorie der Bildentstehung und Fourieroptik	147
4.5.3 Holographie	152
4.6 Die Polarisierung von Licht	155
4.6.1 Polarisationszustände von Licht	156
4.6.2 Polarisatoren	158
4.6.3 Doppelbrechung	164
4.6.4 Anwendungen der Doppelbrechung	171
4.6.5 Induzierte Doppelbrechung	174

4.6.6	Optische Aktivität und Faraday-Effekt	178
4.7	Nichtlineare Optik	182
4.7.1	Phänomene, die mit der nichtlinearen Suszeptilität zweiter Ordnung verknüpft sind	183
4.7.2	Phänomene, die mit der nichtlinearen Suszeptilität dritter Ordnung verknüpft sind	186
4.7.3	Nichtlineare optische Schaltelemente	189
B.	Quantenphänomene und Aufbau der Atome	193
5.	Quantenphänomene: Wellen und Teilchen	193
5.1	Einführung und Überblick	193
5.2	Photonen	195
5.2.1	Die Energie der Photonen: Der Photoeffekt	196
5.2.2	Anwendungen des Photoeffekts	200
5.2.3	Der Impuls der Photonen: Der Compton-Effekt	203
5.2.4	Anwendungen des Compton-Effekts	207
5.2.5	Erzeugung von Bremsstrahlung und charakteristischer Röntgenstrah- lung	210
5.2.6	Paarerzeugung	211
5.2.7	Drehimpuls der Photonen	213
5.2.8	Bemerkungen zum Welle-Teilchen-Dualismus der Photonen	215
5.3	Emission von Licht	216
5.3.1	Temperaturstrahler und Strahlungsgesetze	216
5.3.2	Die Plancksche Strahlungsformel	219
5.3.3	Beispiele	222
5.3.4	Bemerkungen zur Funktionsweise des Lasers	224

5.4	Elektronen und Positronen	226
5.4.1	Fundamentale Eigenschaften	226
5.4.2	Quantisierung der elektrischen Ladung	227
5.4.3	Erzeugung freier Elektronen	227
5.4.4	Messung der Elektronenladung	228
5.4.5	Der klassische Elektronenradius	230
5.4.6	Spezifische Ladung e/m_0	230
5.4.7	Spin-Quantisierung, Stern-Gerlach-Experiment	232
5.4.8	Weiterführende Diskussion	236
5.5	Materiewellen	238
5.5.1	Einführende Bemerkungen	238
5.5.2	Interferenzphänomene mit Teilchenstrahlen	239
5.5.3	Wellenpakete	242
5.5.4	Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion $\psi(\vec{r}, t)$	245
5.5.5	Unschärferelationen	246
5.5.6	Einige Beispiele für die Bedeutung der Unschärferelation	249
5.6	Schrödinger-Gleichung	252
5.6.1	Formulierung	252
5.6.2	Eine erste Anwendung: Tunnelphänomene	255
5.7	Quantisierung gebundener Zustände	263
5.7.1	Vorbemerkung: Kontinuierliche und diskrete Energieeigenwerte	263
5.7.2	Anregung und Zerfall diskreter Niveaus von Atomen und Molekülen	264
5.7.3	Quantenmechanische Analyse einiger eindimensionaler Systeme	267
5.7.4	Probleme in drei Dimensionen: Lösung der Schrödinger-Gleichung im Zentralpotential	271

5.7.5	Ausgewählte Beispiele	272
6.	Aufbau der Atome	275
6.1	Einführende Bemerkungen und Nomenklatur	275
6.2	Rutherford-Streuung	275
6.3	Größe der Atome	281
6.4	Massen der Atome, Meßmethoden, Isotopie	282
6.4.1	Definitionen und Einheiten	282
6.4.2	Massenmessungen und Isotopie	283
6.5	Bindungsenergien der Atomkerne	285
	Anhang	287
A.1	Berechnung der Ausbreitung paraxialer Strahlen mit dem Matrizen- Verfahren	287
A.1.1	Allgemeines	287
A.1.2	Wirkung einer Linse	289
A.1.3	Abbildungen im Matrizenformalismus	290
	Vertiefende Literatur	293
	Sachregister	295