
Physik III

Optik, Quantenphänomene und
Aufbau der Atome

Einführungskurs für Studierende der
Naturwissenschaften und Elektrotechnik

von
Dr. Wolfgang Zinth
und
Dr. Hans-Joachim Körner

Mit 154 Bildern und 13 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1994

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 Fresnel'schen 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 Fermat'sche Prinzip	44
3.1.1	Das Reflexionsgesetz	46
3.1.2	Das Fermat'sche 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	Vergößernde optische Instrumente	79
3.5	Elektronenoptik	89
4.	Welleneigenschaften von Licht	93
4.1	Die Kirchhoff'sche Beugungstheorie	94

4.2	Fresnel'sche und Fraunhofer'sche Beugung	97
4.2.1	Die Fresnel'sche Beugung	99
4.2.2	Fraunhofer'sche Beugung	101
4.2.3	Das Babinet'sche Prinzip	102
4.3	Spezielle Fälle der Fraunhofer'schen 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 Abbe'sche Theorie der Bildentstehung und Fourieroptik	147
4.5.3	Holographie	152
4.6	Die Polarisation 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	201
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 Röntgenstrahlung	211
5.2.6	Paarerzeugung	212
5.2.7	Drehimpuls der Photonen	214
5.2.8	Bemerkungen zum Welle-Teilchen-Dualismus der Photonen	215
5.3	Emission von Licht	217

5.3.1	Temperaturstrahler und Strahlungsgesetze	217
5.3.2	Die Plancksche Strahlungsformel	220
5.3.3	Beispiele	223
5.3.4	Bemerkungen zur Funktionsweise des Lasers	225
5.4	Elektronen und Positronen	227
5.4.1	Fundamentale Eigenschaften	227
5.4.2	Quantisierung der elektrischen Ladung	228
5.4.3	Erzeugung freier Elektronen	229
5.4.4	Messung der Elektronenladung	230
5.4.5	Der klassische Elektronenradius	231
5.4.6	Spezifische Ladung e/m_0	232
5.4.7	Spin-Quantisierung, Stern-Gerlach-Experiment	233
5.4.8	Weiterführende Diskussion	237
5.5	Materiewellen	239
5.5.1	Einführende Bemerkungen	239
5.5.2	Interferenzphänomene mit Teilchenstrahlen	241
5.5.3	Wellenpakete	244
5.5.4	Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion $\psi(\vec{r}, t)$	247
5.5.5	Unschärferelationen	248
5.5.6	Einige Beispiele für die Bedeutung der Unschärferelation	251
5.6	Schrödinger-Gleichung	254
5.6.1	Formulierung	254
5.6.2	Eine erste Anwendung: Tunnelphänomene	257
5.7	Quantisierung gebundener Zustände	265

5.7.1	Vorbemerkung: Kontinuierliche und diskrete Energieeigenwerte . . .	265
5.7.2	Anregung und Zerfall diskreter Niveaus von Atomen und Molekülen	266
5.7.3	Quantenmechanische Analyse einiger eindimensionaler Systeme . . .	269
5.7.4	Probleme in drei Dimensionen: Lösung der Schrödinger-Gleichung im Zentralpotential	274
5.7.5	Ausgewählte Beispiele	274
6.	Aufbau der Atome	277
6.1	Einführende Bemerkungen und Nomenklatur	277
6.2	Rutherford-Streuung	278
6.3	Größe der Atome	283
6.4	Massen der Atome, Meßmethoden, Isotopie	284
6.4.1	Definitionen und Einheiten	284
6.4.2	Massenmessungen und Isotopie	285
6.5	Bindungsenergien der Atomkerne	287
	Anhang	289
A.1	Berechnung der Ausbreitung paraxialer Strahlen mit dem Matrizen- Verfahren	289
A.1.1	Allgemeines	289
A.1.2	Wirkung einer Linse	291
A.1.3	Abbildungen im Matrizenformalismus	292
	Vertiefende Literatur	295
	Sachregister	297