

---

# 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

<b>A.</b>	<b>OPTIK</b>	<b>1</b>
<b>1.</b>	<b>Einführung und historischer Überblick</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Die elektromagnetische Theorie des Lichtes</b>	<b>5</b>
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
<b>3.</b>	<b>Die Geometrische Optik</b>	<b>43</b>
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
<b>4.</b>	<b>Welleneigenschaften von Licht</b>	<b>93</b>
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>B.</b>	<b>Quantenphänomene und Aufbau der Atome</b>	<b>193</b>
<b>5.</b>	<b>Quantenphänomene: Wellen und Teilchen</b>	<b>193</b>
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
<b>6.</b>	<b>Aufbau der Atome</b>	<b>277</b>
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
	<b>Anhang</b>	<b>289</b>
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
	<b>Vertiefende Literatur</b>	<b>295</b>
	<b>Sachregister</b>	<b>297</b>