

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>Verwendete Symbole</b>	<b>XVI</b>
<b>1 Ein kurzer Ausflug in die Geschichte</b>	<b>1</b>
1.1 Vorbemerkung . . . . .	1
1.2 Die Ursprünge . . . . .	1
1.3 Vom siebzehnten Jahrhundert an . . . . .	3
1.4 Das neunzehnte Jahrhundert . . . . .	6
1.5 Das zwanzigste Jahrhundert . . . . .	11
<b>2 Die Wellenbewegung</b>	<b>17</b>
2.1 Eindimensionale Wellen . . . . .	18
2.1.1 Die Differenzialgleichung einer Welle . . . . .	22
2.2 Harmonische Wellen . . . . .	25
2.3 Phase und Phasengeschwindigkeit . . . . .	30
2.4 Das Superpositionsprinzip . . . . .	34
2.5 Die komplexe Darstellung . . . . .	36
2.6 Zeiger und die Addition von Wellen . . . . .	39
2.7 Ebene Wellen . . . . .	42
2.8 Die dreidimensionale Wellengleichung . . . . .	47
2.9 Kugelwellen . . . . .	49
2.10 Zylinderwellen . . . . .	53
Aufgaben . . . . .	55
<b>3 Theorie des Elektromagnetismus, Photonen und Licht</b>	<b>63</b>
3.1 Die Grundgleichungen der Theorie des Elektromagnetismus . . . . .	64
3.1.1 Das faradaysche Induktionsgesetz . . . . .	65
3.1.2 Der gaußsche Satz für das elektrische Feld . . . . .	69
3.1.3 Der gaußsche Satz für das magnetische Feld . . . . .	72
3.1.4 Das ampèresche Verkettungsgesetz . . . . .	73
3.1.5 Die maxwellschen Gleichungen . . . . .	77
3.2 Elektromagnetische Wellen . . . . .	78
3.2.1 Transversalwellen . . . . .	82
3.3 Energie und Impuls . . . . .	85

---

3.3.1	Der Poynting-Vektor . . . . .	85
3.3.2	Die Bestrahlungsstärke . . . . .	89
3.3.3	Photonen . . . . .	91
3.3.4	Strahlungsdruck und Impuls . . . . .	100
3.4	Strahlung . . . . .	104
3.4.1	Linear beschleunigte Ladungen . . . . .	104
3.4.2	Synchrotronstrahlung . . . . .	107
3.4.3	Elektrische Dipolstrahlung . . . . .	110
3.4.4	Die Emission von Licht durch Atome . . . . .	113
3.5	Licht in Materie . . . . .	117
3.5.1	Dispersion . . . . .	120
3.6	Das elektromagnetische Spektrum . . . . .	129
3.6.1	Radiowellen . . . . .	131
3.6.2	Mikrowellen . . . . .	131
3.6.3	Infrarotstrahlung . . . . .	133
3.6.4	Sichtbares Licht . . . . .	135
3.6.5	Ultraviolettes Licht . . . . .	137
3.6.6	Röntgenstrahlung . . . . .	139
3.6.7	Gammastrahlung . . . . .	140
3.7	Quantenfeldtheorie . . . . .	141
	Aufgaben . . . . .	144
<b>4</b>	<b>Die Ausbreitung des Lichts</b>	<b>151</b>
4.1	Einführung . . . . .	151
4.2	Rayleigh-Streuung . . . . .	152
4.2.1	Streuung und Interferenz . . . . .	154
4.2.2	Die Fortpflanzung des Lichts in dichten Medien . . . . .	157
4.2.3	Transmission und Brechungsindex . . . . .	161
4.3	Reflexion . . . . .	165
4.3.1	Das Reflexionsgesetz . . . . .	167
4.4	Brechung . . . . .	172
4.4.1	Das Brechungsgesetz . . . . .	173
4.4.2	Das huygenssche Prinzip . . . . .	179
4.4.3	Lichtstrahlen und Normalkongruenz . . . . .	181
4.5	Das fermatsche Prinzip . . . . .	182
4.6	Der elektromagnetische Ansatz . . . . .	191
4.6.1	Wellen an einer Grenzfläche . . . . .	191
4.6.2	Die fresnelschen Gleichungen . . . . .	193
4.6.3	Interpretation der fresnelschen Gleichungen . . . . .	198
4.7	Innere Totalreflexion . . . . .	209
4.7.1	Die abklingende Welle . . . . .	212
4.8	Optische Eigenschaften von Metallen . . . . .	217
4.9	Alltägliche Aspekte der Wechselwirkung zwischen Licht und Materie	224
4.10	Die stokessche Behandlung der Reflexion und Brechung . . . . .	231

4.11	Photonen, Wellen und Wahrscheinlichkeit . . . . .	233
4.11.1	Quantenelektrodynamik . . . . .	236
	Aufgaben . . . . .	240
<b>5</b>	<b>Geometrische Optik</b>	<b>253</b>
5.1	Einführung . . . . .	253
5.2	Linsen . . . . .	255
5.2.1	Asphärische Flächen . . . . .	255
5.2.2	Brechung an Kugelflächen . . . . .	260
5.2.3	Dünne Linsen . . . . .	264
5.3	Blenden . . . . .	288
5.3.1	Apertur- und Feldblenden . . . . .	288
5.3.2	Eintritts- und Austrittspupillen . . . . .	289
5.3.3	Das Öffnungsverhältnis und die Blendenzahl . . . . .	291
5.4	Spiegel . . . . .	293
5.4.1	Ebene Spiegel . . . . .	294
5.4.2	Asphärische Spiegel . . . . .	298
5.4.3	Sphärische Spiegel . . . . .	301
5.5	Prismen . . . . .	308
5.5.1	Dispersionsprismen . . . . .	308
5.5.2	Reflexionsprismen . . . . .	312
5.6	Faseroptik . . . . .	317
5.6.1	Technologie der Glasfaserübertragung . . . . .	323
5.7	Optische Systeme . . . . .	331
5.7.1	Das Auge . . . . .	331
5.7.2	Die Brille . . . . .	337
5.7.3	Die Lupe . . . . .	345
5.7.4	Okulare . . . . .	349
5.7.5	Das Mikroskop . . . . .	351
5.7.6	Die Kamera . . . . .	354
5.7.7	Das Fernrohr . . . . .	359
5.8	Wellenfrontumformung . . . . .	370
5.8.1	Adaptive Optik . . . . .	371
5.8.2	Phasenkonjugation . . . . .	376
5.9	Gravitationslinsen . . . . .	379
	Aufgaben . . . . .	382
<b>6</b>	<b>Geometrische Optik: Weiterführende Themen</b>	<b>397</b>
6.1	Dicke Linsen und Linsensysteme . . . . .	397
6.2	Strahlenverlaufsberechnung . . . . .	403
6.2.1	Matrizenmethoden . . . . .	405
6.3	Aberrationen . . . . .	414
6.3.1	Monochromatische Aberrationen . . . . .	415
6.3.2	Chromatische Aberrationen . . . . .	438

---

6.4	Gradient-Index-Systeme . . . . .	448
6.5	Abschließende Bemerkungen . . . . .	453
	Aufgaben . . . . .	453
<b>7</b>	<b>Überlagerung von Wellen</b>	<b>457</b>
7.1	Die Addition von Wellen gleicher Frequenz . . . . .	458
7.1.1	Die algebraische Methode . . . . .	458
7.1.2	Die komplexe Methode . . . . .	465
7.1.3	Zeigeraddition . . . . .	466
7.1.4	Stehende Wellen . . . . .	469
7.2	Die Addition von Wellen verschiedener Frequenz . . . . .	477
7.2.1	Schwebungen . . . . .	477
7.2.2	Gruppengeschwindigkeit . . . . .	481
7.3	Anharmonische periodische Wellen . . . . .	492
7.3.1	Fourierreihen . . . . .	492
7.4	Nichtperiodische Wellen . . . . .	502
7.4.1	Fourier-Integrale . . . . .	502
7.4.2	Impulse und Wellenpakete . . . . .	506
7.4.3	Die Kohärenzlänge . . . . .	511
7.4.4	Diskrete Fourier-Transformation . . . . .	515
	Aufgaben . . . . .	521
<b>8</b>	<b>Polarisation</b>	<b>529</b>
8.1	Die Natur des polarisierten Lichts . . . . .	529
8.1.1	Lineare Polarisation . . . . .	530
8.1.2	Zirkulare Polarisation . . . . .	532
8.1.3	Elliptische Polarisation . . . . .	533
8.1.4	Natürliches Licht . . . . .	536
8.1.5	Der Drehimpuls und das Photonenbild . . . . .	537
8.2	Polarisatoren . . . . .	539
8.2.1	Das malussche Gesetz . . . . .	540
8.3	Dichroismus . . . . .	542
8.3.1	Der Drahtgitterpolarisator . . . . .	542
8.3.2	Dichroitische Kristalle . . . . .	543
8.3.3	Das Polaroidfilter . . . . .	544
8.4	Doppelbrechung . . . . .	547
8.4.1	Kalkspat . . . . .	549
8.4.2	Doppelbrechende Kristalle . . . . .	556
8.4.3	Doppelbrechende Polarisatoren . . . . .	558
8.5	Streuung und Polarisation . . . . .	560
8.5.1	Polarisation durch Streuung . . . . .	562
8.6	Polarisation durch Reflexion . . . . .	564
8.6.1	Eine Anwendung der fresnelschen Gleichungen . . . . .	568
8.7	Phasenschieber . . . . .	570

8.7.1	Phasenplättchen und Rhomboeder . . . . .	570
8.7.2	Kompensatoren . . . . .	577
8.8	Zirkularpolarisatoren . . . . .	579
8.9	Polarisation von polychromatischem Licht . . . . .	580
8.9.1	Bandbreite und Kohärenzzeit einer polychromatischen Welle . . . . .	580
8.9.2	Interferenzfarben . . . . .	582
8.10	Optische Aktivität . . . . .	583
8.10.1	Ein Modell . . . . .	588
8.10.2	Optisch aktive Biomoleküle . . . . .	590
8.11	Erzwungene optische Effekte – Optische Modulatoren . . . . .	591
8.11.1	Photoelastizität . . . . .	591
8.11.2	Der Faraday-Effekt . . . . .	593
8.11.3	Der Kerr-Effekt und der Pockels-Effekt . . . . .	596
8.12	Flüssigkristalle . . . . .	600
8.13	Eine mathematische Beschreibung der Polarisation . . . . .	605
8.13.1	Die stokeschen Parameter . . . . .	605
8.13.2	Die joneschen Vektoren . . . . .	608
8.13.3	Die joneschen und die Mueller-Matrizen . . . . .	611
	Aufgaben . . . . .	615
<b>9</b>	<b>Interferenz</b>	<b>627</b>
9.1	Allgemeine Betrachtungen . . . . .	628
9.2	Interferenzbedingungen . . . . .	635
9.2.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz . . . . .	635
9.2.2	Die Fresnel-Arago-Gesetze . . . . .	638
9.3	Interferometer mit Wellenfrontaufspaltung . . . . .	639
9.3.1	Das youngsche Doppelpaltexperiment . . . . .	639
9.4	Interferometer mit Amplitudenaufspaltung . . . . .	650
9.4.1	Dielektrische Schichten – Zweistrahlinterferenz . . . . .	651
9.4.2	Spiegel-Interferometer . . . . .	662
9.5	Typen und Lokalisierung von Interferenzmustern . . . . .	671
9.6	Mehrstrahlinterferenz . . . . .	674
9.6.1	Das Fabry-Perot-Interferometer . . . . .	682
9.7	Anwendungen von Ein- und Mehrschichtfilmen . . . . .	690
9.7.1	Mathematische Behandlung . . . . .	691
9.7.2	Reflexmindernde Schichten . . . . .	695
9.7.3	Periodische Mehrschichtsysteme . . . . .	697
9.8	Anwendungen der Interferometrie . . . . .	700
9.8.1	Streulichtinterferenz . . . . .	700
9.8.2	Das Twyman-Green-Interferometer . . . . .	704
9.8.3	Das rotierende Sagnac-Interferometer . . . . .	705
9.8.4	Radarinterferometrie . . . . .	707
	Aufgaben . . . . .	711

---

<b>10 Beugung</b>	<b>719</b>
10.1 Einleitende Betrachtungen . . . . .	719
10.1.1 Das Fresnel-Huygens-Prinzip . . . . .	720
10.1.2 Undurchsichtige Hindernisse . . . . .	723
10.1.3 Fraunhofer- und Fresnelbeugung . . . . .	726
10.1.4 Mehrere kohärente Oszillatoren . . . . .	728
10.2 Fraunhoferbeugung . . . . .	733
10.2.1 Beugung am Einzelspalt . . . . .	733
10.2.2 Beugung am Doppelspalt . . . . .	740
10.2.3 Beugung an vielen Spalten . . . . .	745
10.2.4 Beugung an einer rechteckigen Öffnung . . . . .	751
10.2.5 Beugung an einer kreisrunden Öffnung . . . . .	756
10.2.6 Das Auflösungsvermögen abbildender Systeme . . . . .	763
10.2.7 Der Besselstrahl nullter Ordnung . . . . .	767
10.2.8 Das Beugungsgitter . . . . .	769
10.3 Fresnelbeugung . . . . .	783
10.3.1 Die freie Ausbreitung einer Kugelwelle . . . . .	783
10.3.2 Die Vibrationskurve . . . . .	790
10.3.3 Kreisförmige Öffnungen . . . . .	792
10.3.4 Kreisförmige Hindernisse . . . . .	797
10.3.5 Die fresnelsche Zonenplatte . . . . .	799
10.3.6 Die fresnelschen Integrale und die Beugung am rechteckigen Loch . . . . .	803
10.3.7 Die Cornu-Spirale . . . . .	807
10.3.8 Fresnelbeugung am Spalt . . . . .	813
10.3.9 Beugung am halbunendlichen, undurchsichtigen Schirm . . . . .	817
10.3.10 Beugung an einem schmalen Hindernis . . . . .	819
10.3.11 Das Prinzip von Babinet . . . . .	821
10.4 Die skalare Beugungstheorie von Kirchhoff . . . . .	823
10.5 Beugungswellen . . . . .	828
Aufgaben . . . . .	831
<b>11 Fourier-Optik</b>	<b>839</b>
11.1 Einleitung . . . . .	839
11.2 Fourier-Transformierte . . . . .	840
11.2.1 Eindimensionale Transformierte . . . . .	840
11.2.2 Zweidimensionale Transformierte . . . . .	844
11.2.3 Die diracsche Delta-Funktion . . . . .	850
11.3 Optische Anwendungen . . . . .	858
11.3.1 Lineare Systeme . . . . .	858
11.3.2 Das Faltungsintegral . . . . .	863
11.3.3 Fourier-Methoden in der Beugungstheorie . . . . .	872
11.3.4 Spektren und Korrelation . . . . .	880
11.3.5 Übertragungsfunktionen . . . . .	891
Aufgaben . . . . .	900

---

<b>12</b>	<b>Grundlagen der Kohärenztheorie</b>	<b>905</b>
12.1	Einführung . . . . .	905
12.2	Die Sichtbarkeit . . . . .	909
12.3	Die wechselseitige Kohärenzfunktion und der Kohärenzgrad . . . . .	917
12.3.1	Zeitliche und räumliche Kohärenz . . . . .	922
12.4	Kohärenz und Stellarinterferometrie . . . . .	924
12.4.1	Das Michelson-Stellarinterferometer . . . . .	924
12.4.2	Korrelationsinterferometrie . . . . .	927
	Aufgaben . . . . .	933
<b>13</b>	<b>Moderne Optik</b>	<b>937</b>
13.1	Laser und Laserstrahlung . . . . .	937
13.1.1	Strahlungsenergie und Materie im Gleichgewicht . . . . .	938
13.1.2	Induzierte Emission . . . . .	945
13.1.3	Der Laser . . . . .	951
13.1.4	Das Wunder Laserlicht . . . . .	970
13.2	Das Bild als räumliche Verteilung optischer Information . . . . .	978
13.2.1	Raumfrequenzen . . . . .	978
13.2.2	Die abbesche Bildentstehungstheorie . . . . .	982
13.2.3	Räumliche Filterung . . . . .	985
13.2.4	Phasenkontrast . . . . .	993
13.2.5	Die Dunkelfeld- und die Schlierenmethode . . . . .	999
13.3	Holographie . . . . .	1002
13.3.1	Verfahren . . . . .	1002
13.3.2	Entwicklungen und Anwendungen . . . . .	1017
13.4	Nichtlineare Optik . . . . .	1024
13.4.1	Optische Gleichrichtung . . . . .	1026
13.4.2	Erzeugung von Harmonischen . . . . .	1027
13.4.3	Frequenzmischung . . . . .	1030
13.4.4	Selbstfokussierung von Licht . . . . .	1032
	Aufgaben . . . . .	1032
<b>Anhang 1: Theorie des Elektromagnetismus</b>		<b>1041</b>
1	Die maxwellschen Gleichungen in differenzieller Form . . . . .	1041
2	Elektromagnetische Wellen . . . . .	1042
<b>Anhang 2: Kirchhoffsche Beugungstheorie</b>		<b>1047</b>
<b>Lösungen ausgewählter Aufgaben</b>		<b>1049</b>
<b>Literatur</b>		<b>1099</b>
<b>Sachverzeichnis</b>		<b>1107</b>