
Physik III

Optik und Quantenphänomene

Vorlesungsskript zur Vorlesung im WS 2002/2003

Prof. Dr. Rudolf Gross

Walther-Meissner-Institut
Bayerische Akademie der Wissenschaften
und
Lehrstuhl für Technische Physik (E23)
Technische Universität München

Walther-Meissner-Strasse 8
D-85748 Garching
Rudolf.Gross@wmi.badw.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Vorbemerkungen	1
1.2 Historischer Überblick	1
1.2.1 Die Ursprünge	2
1.2.2 Frühes Wissen	3
1.3 Die Natur des Lichts	3
1.4 Transversale oder longitudinale Wellen ?	4
1.5 Die Quantentheorie	5
1.6 Optische Instrumente	6
1.7 Der Laser	6
I Optik	7
2 Licht als elektromagnetische Welle	9
2.1 Wellen	10
2.1.1 Die Wellengleichung für dispersionsfreie Wellen	10
2.1.2 Dispersionbehaftete Wellen	12
2.1.3 Komplexe Wellenzahl, Frequenz und Geschwindigkeit	12
2.1.4 Die Gruppengeschwindigkeit	14
2.1.5 Wellen in drei Dimensionen	15
2.1.6 Wellen in inhomogenen Medien	16
2.2 Die Maxwell Gleichungen	18
2.3 Elektromagnetische Wellen	20
2.3.1 Phasengeschwindigkeit und Brechungsindex	20
2.3.2 Ebene Wellen und Dispersionsrelation	21

2.3.3	Wellenpakete	22
2.3.4	Energie und Impuls von Licht	25
2.3.5	Phasen und Gruppengeschwindigkeit	26
2.4	Klassische Dispersionstheorie	29
2.4.1	Das klassische Atom	31
2.4.2	Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex	33
2.4.3	Absorption von Licht	36
2.4.4	Dispersion von dichten Medien	37
2.4.5	Die Farbe von Gegenständen	37
2.5	Streuung von elektromagnetischen Wellen	39
2.5.1	Kohärente Streuung	39
2.5.2	Inkohärente Streuung	40
2.5.3	Inelastische Streuung	43
2.6	Elektromagnetische Wellen an Grenzflächen – Lichtbrechung und -reflexion	44
2.6.1	Reflexions- und Brechungsgesetz	45
2.6.2	Die Fresnel'schen Formeln	47
2.6.3	Totalreflexion und Brewster-Winkel	53
2.6.4	Innere Totalreflexion und evaneszente Wellen	57
2.6.5	Phasenvariation im Bereich der Totalreflexion	60
2.6.6	Reflexionsvermögen von absorbierenden Medien	63
2.6.7	Anwendungen der Brechung und Totalreflexion	65
2.7	Das elektromagnetische Spektrum	69
2.8	Anmerkungen zur Quantenfeldtheorie	72
3	Die Polarisation von Licht	77
3.1	Polarisationszustände von Licht	80
3.1.1	Linear polarisiertes Licht	80
3.1.2	Zirkular polarisiertes Licht	81
3.1.3	Elliptisch polarisiertes Licht	83
3.1.4	Polarisation und Drehimpuls	83
3.1.5	Jones Darstellung	84
3.1.6	Polarisationsgrad von Licht	84
3.1.7	Zustände orthogonaler Polarisation	86
3.2	Polarisatoren und Analysatoren	87

3.2.1	Polarisation durch Streuung	87
3.2.2	Polarisation durch Reflexion	88
3.2.3	Polarisation durch Reflexion an absorbierenden Medien	92
3.2.4	Polarisation durch Dichroismus und Doppelbrechung	96
3.2.5	Extinktionsverhältnis	96
3.3	Wellenausbreitung und Polarisation in anisotropen Medien	98
3.3.1	Dichroismus	99
3.3.2	Doppelbrechung	100
3.3.3	Lichtausbreitung in anisotropen Medien	103
3.3.4	Optische Aktivität	114
3.3.5	Anwendung der Doppelbrechung	115
3.4	Induzierte Doppelbrechung	118
3.4.1	Der elektro-optische Effekt	118
3.4.2	Der photoelastische Effekt – Spannungsoptik	119
3.4.3	Der magneto-optische Effekt	120
4	Geometrische Optik	123
4.1	Grundlegende Konzepte	126
4.1.1	Lichtquellen	126
4.1.2	Das Fermat'sche Prinzip	128
4.2	Die optische Abbildung	133
4.2.1	Abbildung an einem Kugelspiegel	136
4.2.2	Abbildung durch brechende Grenzflächen	137
4.2.3	Abbildungsgleichung für eine dünne Linse	141
4.2.4	Dicke Linsen und Linsensysteme	148
4.3	Matrixformulierung der Gauß'schen Optik	152
4.3.1	Abbildungsmatrizen	152
4.3.2	Bildentstehung	155
4.3.3	Hauptpunkte und Hauptebenen	157
4.4	Abbildungsfehler	162
4.4.1	Die monochromatische Aberration	162
4.4.2	Die chromatische Aberration	165
4.4.3	Korrektur der sphärischen Aberration	167
4.5	Begrenzungen in optischen Systemen	168
4.6	Optische Instrumente	173
4.6.1	Die photographische Kamera	173
4.6.2	Das Auge	175
4.6.3	Vergrößernde optische Instrumente	179

5	Beugung und Interferenz	191
5.1	Beugungserscheinungen	192
5.1.1	Interferenz und Beugung	193
5.1.2	Einführung in die Beugungstheorie	194
5.2	Beugung – die Näherung skalarer Wellen	195
5.2.1	Erklärung der Beugung mit dem Huygens'schen Prinzip	195
5.2.2	Vertiefungsthema: Das Fresnel-Kirchhoff-Beugungsintegral	200
5.2.3	Fraunhofer- und Fresnel-Beugung	200
5.2.4	Experimentelle Beobachtung von Beugungserscheinungen	203
5.3	Fresnel-Beugung	204
5.3.1	Radialsymmetrische Probleme	204
5.3.2	Vertiefungsthema: Fresnel-Beugung durch lineare Systeme	210
5.4	Fraunhofer-Beugung	216
5.4.1	Fraunhofer-Beugung und Fourier-Transformation	217
5.4.2	Beugung am Spalt	221
5.4.3	Vertiefungsthema: Beugung am unscharfem Spalt	223
5.4.4	Beugung an phasenschiebendem Objekt	225
5.4.5	Beugung an einer Rechteckblende	225
5.4.6	Beugung an einer Lochblende	226
5.4.7	Überlagerung von Beugungsmustern	229
5.4.8	Das Babinet'sche Prinzip	230
5.5	Interferenz	231
5.5.1	Interferenzmuster eines Doppelspaltens	231
5.5.2	Vertiefungsthema: Interferenzmuster zweier kreisförmiger Lochblenden	234
5.5.3	Interferenzmuster eines periodischen Gitters	234
5.5.4	Vertiefungsthema: Zweidimensionale Interferenz	240
5.6	Vertiefungsthema: Dreidimensionale Interferenz	244
5.6.1	Kristalle und Faltungen	244
5.6.2	Beugung an einem dreidimensionalen Gitter	245
5.6.3	Das reziproke Gitter in drei Dimensionen	247

5.6.4	Der akustooptische Effekt	250
5.7	Interferometrie	252
5.7.1	Interferometrie durch Aufspalten der Wellenfront	253
5.7.2	Beugungsgitter	257
5.7.3	Interferometrie durch Aufspalten der Wellenamplitude	265
5.7.4	Interferenz durch Mehrfachreflexion	275
5.7.5	Interferenzen dünner Schichten	283
6	Kohärenz	291
6.1	Reale Lichtwellen	292
6.1.1	Amplitude und Phase von quasi-monochromatischem Licht	293
6.1.2	Das Spektrum einer Zufallsfolge von Wellenpaketen	296
6.2	Linienbreite von Spektrallinien	298
6.2.1	Natürliche Linienbreite	298
6.2.2	Dopplerverbreiterung	298
6.2.3	Vertiefungsthema: Stoßverbreiterung	299
6.3	Das Konzept der Kohärenz – eine quantitative Analyse	302
6.3.1	Die Kohärenzfunktion	302
6.3.2	Zeitliche Kohärenz	303
6.3.3	Räumliche Kohärenz	308
7	Abbildungstheorie	315
7.1	Fourier-Optik und Abbe'sche Theorie der Bildentstehung	316
7.2	Auflösungsgrenze optischer Instrumente	320
7.2.1	Das Rayleigh-Kriterium für ein inkohärentes Objekt	320
7.2.2	Das Sparrow-Kriterium für ein inkohärentes Objekt	321
7.2.3	Rayleigh Kriterium für ein kohärent beleuchtete Objekt	322
7.2.4	Anwendung der Abbe'schen Theorie auf das Auflösungsvermögen	323
7.2.5	Köhler'sche Beleuchtung	325
7.3	Anwendungen der Abbe'schen Theorie	327
7.3.1	Dunkelfeldabbildung	327
7.3.2	Die Phasenkontrast-Mikroskopie	328
7.3.3	Die Schlierenmethode	329
7.3.4	Beugungskontrast	330

7.4	Verbesserung der Auflösung von optischen Instrumenten	331
7.4.1	Vertiefungsthema: Apodisation	332
7.4.2	Konfokale Rastermikroskopie	333
7.4.3	Optische Nahfeldmikroskopie	334
7.5	Holographie	336
7.5.1	Aufzeichnen eines Hologramms	336
7.5.2	Auslesen eines Hologramms	338
8	Nichtlineare Optik	343
8.1	Nichtlineare Polarisierbarkeit	344
8.2	Effekte zweiter Ordnung	345
8.2.1	Frequenzverdoppelung und optische Gleichrichtung	345
8.2.2	Frequenzmischung	346
8.2.3	Vertiefungsthema: Parametrischer Prozess	347
8.2.4	Vertiefungsthema: Phasenanpassung	348
8.3	Effekte dritter Ordnung	349
8.3.1	Selbstfokussierung	349
8.3.2	Selbstphasenmodulation	349
8.3.3	Vierwellenmischen	350
II	Quantenphänomene	353
9	Quantenphänomene und Strahlungsgesetze	355
9.1	Quantenphänomene – eine Einführung	356
9.1.1	Der Welle - Teilchen - Dualismus	357
9.1.2	Grundprinzipien der Quantenmechanik	365
9.1.3	Die Unschärferelation	366
9.1.4	Beziehung zwischen Welle- und Teilchenaspekten	367
9.1.5	Zusammenfassung	371
9.2	Die Emission von Licht	373
9.2.1	Die Quantisierung der elektromagnetischen Feldes	373
9.2.2	Temperaturstrahler und Strahlungsgesetze	374
9.2.3	Die Planck'sche Strahlungsformel	380

10 Quantenoptik	387
10.1 Der Photoeffekt	388
10.1.1 Experimentelle Fakten zum Photoeffekt	388
10.1.2 Einsteins Korpuskulartheorie	390
10.2 Anwendungen des Photoeffekts	395
10.2.1 Messung der Lichtstärke	395
10.2.2 Solarzellen	397
10.2.3 Inverser Photoeffekt – Erzeugung von Bremsstrahlung und charakteristischer Röntgenstrahlung	398
10.3 Die Eigenschaften von Photonen	401
10.3.1 Die Masse des Photons	401
10.3.2 Der Impuls des Photons	402
10.3.3 Der Drehimpuls des Photons	406
10.3.4 Photon-Photon-Streuung – die Größe des Photons	408
10.3.5 Zahlenbeispiel	408
10.4 Zum Welle-Teilchen-Dualismus der Photonen	410
10.4.1 Die Quantenelektrodynamik	410
10.4.2 Interferenz von Photonen	411
10.4.3 Die Unschärferelation	412
10.5 Vertiefungsthema: Weitere Folgerungen aus der Quantentheorie	415
10.5.1 Energiequantelung und Nullpunktsenergie	415
10.5.2 Maxwell-Gleichungen und Vakuumpolarisation	416
11 Der Laser	419
11.1 Spontane und stimulierte Emission	420
11.1.1 Besetzung der Energieniveaus	422
11.1.2 Beziehung zwischen stimulierter und spontaner Emissionsrate	423
11.2 Aufbau und Funktionsweise von Lasern	426
11.2.1 Aufbau eines Lasers	426
11.2.2 Physikalische Grundlagen des Lasers	426
11.2.3 Der rückkoppelnde Laserresonator	430
11.3 Lasertypen	434
11.3.1 Der Festkörperlaser	434
11.3.2 Der Flüssigkeitslaser	437

11.3.3	Der Gaslaser	437
11.4	Anwendungen des Lasers	440
11.5	Vertiefungsthema:	
	Laserlicht	441
11.5.1	Phasenfluktuation	441
11.5.2	Öffnungswinkel und räumliche Kohärenz	441
11.5.3	Bandbreite und Kohärenzlänge	441
11.5.4	Vergleich zwischen kontinuierlichen und gepulsten Lasern	442
11.5.5	Lichtverstärkung im Photonenbild	445
12	Materiewellen	449
12.1	Elementarteilchen	451
12.1.1	Elektronen und Positronen	451
12.2	Welleneigenschaften von Elektronen	462
12.2.1	Elektronenwellen	462
12.2.2	Vertiefungsthema:	
	Beugung und Interferenz mit Elektronenwellen	464
12.2.3	Elektronen als Wellenpakete	467
12.2.4	Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion	470
12.2.5	Die Unschärferelation bei Materiewellen	471
12.3	Die Schrödinger-Gleichung	476
12.3.1	Formulierung der Schrödinger-Gleichung	476
12.3.2	Vertiefungsthema:	
	Anmerkung zu quantenmechanischen Operatoren	482
12.3.3	Vertiefungsthema:	
	Wahrscheinlichkeitsstrom	483
12.4	Anwendungen der Schrödinger-Gleichung	485
12.4.1	Der kräftefreie Massenpunkt	485
12.4.2	Teilchen im eindimensionalen Potenzialtopf	487
12.4.3	Teilchen im dreidimensionalen Potenzialtopf	489
12.4.4	Vertiefungsthema:	
	Der harmonische Oszillator	490
12.4.5	Durchgang durch eine Potentialschwelle – Tunnelphänomene	496
12.5	Quantisierung gebundener Zustände	502
12.5.1	Kontinuierliche und diskrete Energieeigenwerte	502
12.5.2	Experimentelle Untersuchung der Energiequantisierung	503

III	Anhang	509
A	Kirchhoffsche Beugungstheorie	511
A.1	Das Beugungsintegral – mathematische Grundlagen	511
A.2	Beleuchtung mit einer Punktquelle	514
A.3	Der Neigungsfaktor	515
B	Fourier-Transformation	517
B.1	Fourier-Reihen periodischer Funktionen	517
B.2	Fourier-Analyse	519
B.3	Nichtperiodische Funktionen	523
B.4	Die inverse Fourier-Transformation	532
B.5	Die Faltung	533
B.6	Die Korrelationsfunktion	538
B.7	Die Autokorrelationsfunktion	539
C	Bessel Funktionen	545
C.1	Fraunhofer-Beugung an einer Ringblende	546
C.2	Fraunhofer-Beugung an einer Kreisblende	546
C.3	Fraunhofer-Beugung an Ring aus m Lochblenden	547
D	Literatur	549
E	SI-Einheiten	551
E.1	Geschichte des SI Systems	551
E.2	Die SI Basiseinheiten	553
E.3	Einige von den SI Einheiten abgeleitete Einheiten	554
E.4	Vorsätze	556
E.5	Abgeleitete Einheiten und Umrechnungsfaktoren	557
F	Physikalische Konstanten	561

Vorwort

Das vorliegende Skript richtet sich an Studierende des 3. Semesters des Experimentalphysikkurses Physik I bis IV an der Technischen Universität München. Ein wesentliches Ziel des Experimentalphysikkurses Physik III ist neben der Vermittlung der Grundkenntnisse zur Optik, die Lücke zwischen der klassischen Physik der Experimentalphysikkurse I (klassische Mechanik) und II (klassische Elektrodynamik) und der Quantenphysik (Physik IV: Physik der Atome, Moleküle und Kerne) zu schließen. Da die Optik ganz wesentlich zur Entwicklung der Quantenmechanik beigetragen hat, ist es schon aus historischen Gründen sinnvoll, eine Einführung in die Quantenphysik über die Optik zu vermitteln.

Im Rahmen des Experimentalphysikkurses Physik III muss eine wesentliche Erweiterung der physikalischen Denkweise erfolgen. Während in der klassischen Physik noch von der vollständigen Beschreibbarkeit eines physikalischen Systems ausgegangen werden konnte, die letztendlich eine deterministische Vorhersagbarkeit physikalischer Prozesse erlaubte, werden in der Quantenphysik Wahrscheinlichkeiten wichtig, die keine eindeutigen Vorhersagen mehr erlauben. Wir werden deshalb mit der rein klassischen Behandlung der Optik beginnen, dann aber einen Übergang zur Quantenphysik entwickeln. Hierbei soll nur eine Einführung in die Welt der Quantenphänomene gegeben werden. Für ein vollständiges Verständnis der Quantenphysik ist eine ausführlichere und vertiefende Beschäftigung mit dieser Thematik notwendig, die sich im Rahmen der Vorlesungen zur Physik IV (Atome, Moleküle und Kerne) und der Quantenmechanik ergeben wird.

Dieses Skript ist zum Gebrauch neben der Vorlesung gedacht. Es enthält mehr Stoff, als man in einer vierstündigen Vorlesung behandeln kann. Es sind für die interessierten Studenten einige Fragestellungen detaillierter behandelt, als dies in einer einführenden Vorlesung möglich ist. Im Skript sind diese Teile als Vertiefungsthemen gekennzeichnet. Die zentralen Gebiete sind allerdings so ausgewählt, dass weiterführende Vorlesungen im Hauptstudium darauf aufbauen können. Natürlich ist die Stoffauswahl immer teilweise durch die individuelle Wichtung des Authors bestimmt. Der Author hofft, dass die hier getroffene Auswahl einen guten Überblick über den Themenbereich Optik und eine Einführung in die Welt der Quantenphänomene gibt.

Das vorliegende Skript ist eine Zusammenstellung des Stoffes zur Vorlesung **Physik III – Optik und Quantenphänomene**. Es ist für das 3. Semester eines Experimentalphysikkurses gedacht.

Das Skript entstand aus einer Vorlesung an der Technischen Universität München im WS 2001/2002 und WS 2002/2003.

Die Fertigstellung des Vorlesungsskripts wurde im Laufe der Vorlesung des Wintersemesters 2001/2002 begonnen und im WS 2002/2003 vervollständigt. Das Skript enthält in seiner derzeitigen Version 1.0 ohne Zweifel noch mehrere Fehler. Der Autor ist für Hinweise auf solche Fehler dankbar (e-mail: Rudolf.Gross@wmi.badw.de).

Garching, März 2003

R. Gross

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Vorbemerkungen

Das vorliegende Skript richtet sich an Studierende des 3. Semesters eines Experimentalphysikkurses. Der behandelte Stoff soll die Lücke zwischen der klassischen Elektrodynamik, die im Rahmen der Vorlesung Physik II behandelt wird, und der Atom- und Molekülphysik schließen. Im Rahmen der Vorlesung soll der Schritt von der klassischen Physik (klassische Mechanik: Physik I; klassische Elektrodynamik: Physik II) hin zur Quantenphysik gemacht werden. Dabei muss eine wesentliche Erweiterung in der Betrachtungsweise von physikalischen Phänomenen vorgenommen werden. Während in der klassischen Physik noch von einer vollständigen Beschreibbarkeit eines physikalischen Systems ausgegangen wird,¹ werden in der Quantenphysik Wahrscheinlichkeiten wichtig. Es sind jetzt keine genauen Voraussagen sondern nur noch Wahrscheinlichkeitsangaben möglich. Die Erweiterung der Betrachtungsweise auf dem Weg von der klassischen zur Quantenmechanik kann gut bei der Diskussion der Optik vorgenommen werden, da gerade von der Optik wesentliche Impulse zur Entwicklung der Quantenmechanik ausgegangen sind. Im Rahmen der Vorlesung Physik III soll deshalb neben der rein klassischen Behandlung der Optik der Übergang zur Quantenphysik vorgestellt werden. Es sei hier aber gleich darauf hingewiesen, dass die im hier gegebene knappe Diskussion nicht zu einem vollständigen Verständnis der Quantenphysik führen kann. Hierzu ist eine weitere, weit ausführlichere Beschäftigung mit dieser Thematik im Rahmen der Vorlesungen zur Atom- und Molekülphysik und zur Quantenmechanik notwendig.

1.2 Historischer Überblick

Die Optik spielte in der geschichtlichen Entwicklung der Naturwissenschaften immer eine wichtige Rolle, da das wichtigste Wahrnehmungsorgan des Menschen wohl das Auge ist. Es erlaubt uns, unsere Umgebung wahrzunehmen. Der Sehvorgang und die Eigenschaften des beteiligten Lichts haben deshalb seit dem Altertum die Neugierde des Menschen geweckt. Das Verständnis der Natur des Lichts und die Ausnutzung von Gesetzmäßigkeiten der Optik für die Entwicklung optischer Instrumente standen immer im Mittelpunkt wissenschaftlichen Interesses. In der Geschichte der Naturwissenschaften hat die Optik immer eine zweifache Rolle gespielt: Einerseits war sie die Wegbereiterin neuer Vorstellungen vor allem in der Physik (z.B. Quantentheorie). Zum anderen stellte sie wichtige Hilfsmittel für die Entwicklung anderer Gebiete der Naturwissenschaften zur Verfügung. Viele Entwicklungen in der Biologie oder der Medizin wären ohne den Einsatz optischer Geräte nicht möglich gewesen.

¹Bei Kenntnis der genauen Anfangsbedingungen (z.B. Ort und Impuls eines Massenpunktes) kann in einer klassischen Betrachtungsweise das Verhalten eines physikalischen Systems genau vorhergesagt werden: man spricht von einer deterministischen Vorhersagbarkeit von Vorgängen.

Heute wissen wir, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist und das menschliche Auge nur für einen winzigen Anteil des Spektrums elektromagnetischer Wellen empfindlich ist. Der sichtbare Spektralbereich erstreckt sich vom tief Dunkelroten mit einer Frequenz von 385 THz bis zum Violetten mit einer Frequenz von 770 THz.² In der Praxis ist die Optik allerdings nicht auf diesen Bereich beschränkt. Die Gesetzmäßigkeiten der Optik sind vielmehr auf einen viel breiteren Bereich von den Radiowellen bis hin zum Röntgenlicht anwendbar.

Es stellt sich immer die Frage, wieso man sich eigentlich mit der geschichtlichen Entwicklung einer wissenschaftlichen Disziplin auseinandersetzen soll und nicht stattdessen einfach von dem heutigen Kenntnisstand aus starten soll. Die Antwort darauf lautet: Wissenschaftliche Konzeptionen und Theorien haben ihre eigene Entstehungsgeschichte, die oft zum Verständnis ganz wesentlich beitragen kann. Sich nur mit der Gegenwart zu beschäftigen und das historische, zweifellos manchmal auch irreführende Material ganz beiseite zu lassen, käme dem Versuch nahe, ein Schaubild nur mit Hilfe eines Stützpunktes zeichnen zu wollen. Es ist zudem interessant zu erfahren, wie einige der großen Ideen geboren wurden, und dadurch vielleicht einen Einblick in die Gedanken und Vorgehensweisen einiger großer Physiker zu erhalten.

Die Geschichte der Optik folgt generell zwei verschiedenen Pfaden. Der eine beschäftigt sich mit dem Verständnis der *Natur des Lichts*. Eine ganz wichtige Frage ist dabei, ob Licht aus Teilchen besteht, die der Newton'schen Mechanik gehorchen, oder ob es eine Wellenerscheinung ist. Falls letzteres zutrifft, in welchem Medium breitet sich dann diese Welle aus? Im Laufe der Geschichte ist das Pendel mal mehr zur einen, mal mehr zur anderen Sichtweise ausgeschlagen. Der Welle-Korpuskel-Streit ist auch heute noch gegenwärtig und viele grundsätzlichen Fragen werden vor dem Hintergrund dieses Dualismus gestellt. Der zweite Pfad verfolgt die Anwendungen der Optik. Beginnend mit einigen einfachen lichtbrechenden Geräten, die gut im Rahmen der Korpuskulartheorie erklärt werden konnten, wurde die Wellennatur des Lichts immer wichtiger, je komplexer die optischen Geräte wurden. Schließlich wurde klar, dass aufgrund der Wellennatur eine grundsätzliche Schranke für die Leistungsfähigkeit optischer Geräte existiert. Aber auch die Wellentheorie ist nicht ausreichend, um die Empfindlichkeitsgrenze optischer Geräte vollständig zu beschreiben, die letztendlich durch die Quantentheorie gegeben ist.

1.2.1 Die Ursprünge

Die optische Technologie lässt sich bis in die Antike zurückverfolgen. Bereits mehr als 1000 v. Chr. wurden Spiegel aus poliertem Kupfer oder Bronze hergestellt, später dann aus Spiegelmetall, einer zinnreichen Kupferlegierung. Einzelne Stücke aus dem alten Ägypten sind bis heute erhalten geblieben, u.a. ein Spiegel, den man zusammen mit anderen Geräten nahe der Pyramide von Sesostris dem Zweiten (ca. 1900 v. Chr.) im Niltal ausgrub.

Die griechischen Philosophen **Pythagoras**, **Demokrit**, **Plato** und **Aristoteles** entwickelten mehrere Theorien der Natur des Lichts. Die Vorstellungen des Aristoteles finden sich dabei in ähnlicher Weise in den Äther-Vorstellungen des 19. Jahrhunderts wieder. Dass Licht sich geradlinig ausbreitet war ebenso bekannt wie das Reflexionsgesetz, das **Euklid** 300 v. Chr. in seinem Buch *Katoptrik* beschrieb. Im 1. Jahrhundert v. Chr. stellte **Heron von Alexandria** für die Lichtausbreitung ein Prinzip des kürzesten Weges auf. Aus den Aufschreibungen des Geschichtsschreibers Plinius (23 bis 79 n. Chr.) wissen wir, dass auch die Römer das Brennglas kannten. In römischen Ruinen fand man Glas- und Kristallkugeln, in Pompeji eine plankonvexe Linse.

Nach dem Niedergang des weströmischen Reiches (475 n. Chr.) waren in Europa für lange Zeit kaum wissenschaftliche Erfolge zu verzeichnen. Das Zentrum der Gelehrsamkeit verschob sich in den arabischen Raum, wo insbesondere **Alhazen** (1000 n. Chr.) am Reflexionsgesetz arbeitete. Er beschäftigte sich mit Kugel- und Parabolspiegeln und beschrieb das menschliche Auge.

²1 THz = 10¹² Hz.

In Europa gab es erst gegen Ende des 13. Jahrhunderts wieder wissenschaftliche Erfolge zu vermelden. Der Franziskaner **Roger Bacon** (1215 - 1294) kam wahrscheinlich als erster auf die Idee, Linsen zur Korrektur des Sehvermögens zu verwenden. Durch die Erfindung von flüssigem Zinnamalgame wurde der moderne Spiegel geboren. **Leonardo da Vinci** (1452 - 1519) beschrieb die "Camera Obscura, die durch die Arbeiten von **Giovanni Battista Della Porta** auch der Allgemeinheit zugänglich gemacht wurde. Letzterer erläuterte 1589 in seiner Schrift "Magia naturalis" Mehrfachspiegel und Kombinationen von Sammel- und Zerstreuungslinsen.

1.2.2 Frühes Wissen

Die wichtigsten Prinzipien der geometrischen Optik und die darauf basierenden Instrumente wurden im 17. Jahrhundert entwickelt und führten zu einer Revolution des damaligen Weltbilds. Was wusste man über das Licht zu Beginn des 17. Jahrhunderts. Erstens, dass es sich geradlinig ausbreitet. Zweitens, dass es von glatten Oberflächen reflektiert wird. Drittens, dass es seine Ausbreitungsrichtung beim Übergang von einem Medium zum anderen ändert (Brechung). Die Regeln für dieses Phänomen wurden von **Snelius** (1591 - 1626) im Jahr 1621 entdeckt und später von **Descartes** (1596 - 1650) bestätigt. Viertens kann man das Phänomen der Fresnel'schen Beugung. Es wurde von **Grimaldi** (1618 - 1663) und **Hooke** (1635 - 1703) beobachtet. Schließlich wurde auch die Doppelbrechung von **Bartholinus** (1625 - 1698) entdeckt. Eine Theorie des Lichtes musste all diese Phänomene erklären. Viele Phänomene wie das Auftreten von Beugungserscheinungen oder die Erzeugung von Doppelbildern durch Kalkspatkristalle sorgten damals für viel Verwirrung und Diskussionen zur Frage der Natur des Lichts.

Im Jahr 1608 wurde von **Hans Lippershey** (1587 - 1619) das erste Fernrohr zum Patent angemeldet, das dann von **Galileo Galilei** (1564 - 1642) und **Johannes Kepler** (1571 - 1630) weiterentwickelt wurde. Dadurch wurde eine stürmische Entwicklung auf dem Gebiet der optischen Instrumente eingeleitet.

1.3 Die Natur des Lichts

Welle oder Teilchen

Im 17. Jahrhundert entbrannte ein Streit über die Natur des Lichts, der aufgrund unzureichender experimenteller Daten lang nicht beigelegt werden konnte. **Isaac Newton** (1642 - 1727) unterstützte mit seiner ganzen Autorität die *Teilchenhypothese*. Er postulierte ferner, dass die Gravitation nicht auf die Lichtteilchen wirkt. Doppelbrechung erklärte er durch eine Asymmetrie der Teilchen, wodurch die Ausbreitungsrichtung davon abhängig wurde, ob die Teilchen aufrecht oder auf der Seite liegend einen Kristall durchquerten. Da er die Vorstellung der Teilchen als kleine Magnete hatte, wurde der Name "Polarisation" eingeführt, das wir bis heute benutzen, obwohl die ursprüngliche Erklärung längst überholt ist.

Eine Erklärung für die *Beugungsphänomene* zu finden, war allerdings sehr schwer. Als Newton von ihm zu Beugungsphänomenen durchgeführte Experimente nicht im Rahmen der von ihm favorisierten Korpuskulartheorie erklären konnte, soll er diese Experimente mit der Begründung, er habe zu viel zu tun, eingestellt haben. Eine Tatsache, die Newton sehr irritierte, war auch die teilweise Reflexion und Transmission von Licht an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien. Wieso sollte ein Teilchen teilweise transmittiert und teilweise reflektiert werden.

Christiaan Huygens (1629 - 1695) war ein Vertreter der *Wellentheorie* des Lichts. Damit konnte er Beugungsphänomene und die Doppelbrechung beschreiben, ohne aber den tieferen Grund für die beiden Strahlen erklären zu können. Der Grund dafür war, dass sowohl Huygens als auch Newton damals glaubten, dass Lichtwellen, falls sie existieren sollten, wie Schallwellen longitudinale Wellen sein müssten, die sich im den Raum ausfüllenden Äther ausbreiten. Hätten sie damals an Transversalwellen gedacht, so hätten sie dieses Problem lösen können.

Der Triumph des Wellenbildes

Aufgrund der Autorität Newtons blieb die Korpuskulartheorie bis zum 18. Jahrhundert aktuell. Dann wurden die experimentelle Fakten aber so eindeutig, dass diese Theorie nicht mehr haltbar war. Im Jahr 1801 erzeugte **Thomas Young** (1773 - 1829) seine Beugungsmuster am Doppelspalt. Dieses Experiment war einfach auszuführen und seine Resultate deshalb nicht anzuzweifeln. 1815 erarbeitete **Augustin Jean Fresnel** (1788 - 1827) eine auf dem Wellenbild basierende Beugungstheorie und 1821 erzeugte **Joseph Fraunhofer** (1787 - 1826) Beugungsmuster mit parallelem Licht, bei denen die theoretische Interpretation viel einfacher war. Diese drei Wissenschaftler legten den Grundstein für die Wellentheorie des Lichts, die die Grundlage der heutigen Wellenoptik bildet.

Das endgültige Aus für die Korpuskulartheorie kam im Jahr 1818, in dem Fresnel einen wichtigen Aufsatz zur Lichtbeugung schrieb. Aufgrund diesen Aufsatzes erdachte **Poisson** (1781 - 1840) ein Experiment, das die Wellentheorie widerlegen sollte. Es schlug vor, eine punktförmige Quelle zu betrachten, die einen Schattenwurf eines perfekt runden Objekts erzeuge. Da entlang des Objektumfangs alle Wellen in Phase sind, müssten sie auch im Zentrum des Schattens hinter dem Objekt in Phase sein. Es müsste dann dort ein heller Punkt entstehen, was er für völlig absurd hielt. **Fresnel** und **Arago** (1786 - 1853) führten das Experiment durch und fanden tatsächlich den hellen Fleck im Zentrum des Schattens. Der Triumph der Wellentheorie schien vollständig. Die endgültige Bestätigung der Wellentheorie erreichte **James Clerk Maxwell** (1788 - 1827), als er Licht mit den Wellenlösungen der Maxwell-Gleichungen identifizierte. Der erste experimentelle Nachweis dieser Wellen gelang **Heinrich Hertz** (1857 - 1894). Am Ende des 19. Jahrhunderts schienen sämtliche Problem der Propagation von Licht gelöst. Gleichzeitig traten aber immer mehr Probleme bei der Beschreibung der Erzeugung und Absorption von Licht in den Vordergrund. Dieser Triumph der Wellentheorie begann zu Bröckeln und dauerte also nur bis zur Einführung der Quantentheorie im 20. Jahrhundert, auf die wir unten noch zu sprechen kommen.

1.4 Transversale oder longitudinale Wellen ?

Der Unterschied zwischen longitudinalen und transversalen Wellen wurde in der Geschichte der Physik bereits früh erkannt. Während Schallwellen longitudinale Wellen sind, sind Wasserwellen offensichtlich transversale Wellen. Im Falle des Lichts ermöglichten Experimente zur Polarisierung von Licht und die Doppelbrechung eine Entscheidung darüber, ob es sich nun bei Licht um longitudinale oder transversale Wellen handelt.

Als **Huygens**, **Young** und **Fresnel** die Wellentheorie des Lichts entwickelten, kam für sie nur die Vorstellung elastischer Wellen in einem das Weltall erfüllenden Medium, dem so genannten Äther, in Frage. Sie glaubten, dass es sich bei dem Äther nur um eine sehr feine Flüssigkeit oder ein Gas, keinesfalls aber um einen festen Körper handeln könnte. Da Gase oder Flüssigkeiten keine Scherwellen zulassen, sind nur elastische Longitudinalwellen möglich, d.h. **Huygens**, **Young** und **Fresnel** fassten die Lichtwellen – genau wie Schallwellen – als Longitudinalwellen auf. Bei longitudinalen Wellen gehen die Verschiebungen in Fortpflanzungsrichtung vor sich. Dadurch herrscht um die Fortpflanzungsrichtung herum völlige Symmetrie. Bei Transversalwellen erfolgen die Verschiebungen dagegen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung, wodurch diese Symmetrie nicht mehr gewährleistet sein muss. Da man zunächst bei Licht, das von natürlichen Strahlungsquellen ausging, keine Anzeichen für eine Abweichung von einer Symmetrie um die Ausbreitungsrichtung gefunden hatte, war die Annahme von Longitudinalwellen völlig natürlich. Die Annahme von longitudinalen Lichtquellen schien gut begründet, bis im Jahr 1808 der französische Physiker **E. L. Malus** (1775 - 1812) eine für die Optik folgenschwere Beobachtung machte, die eine Asymmetrie um die Ausbreitungsrichtung, das heißt, eine *Polarisation* des Lichtes offenbarte. Die Malus'sche Beobachtung führte zu der Feststellung, dass Licht, das an einem durchsichtigen Medium

reflektiert worden ist, seine Symmetrie um die Fortpflanzungsrichtung verloren hat. Das heißt, Licht musste eine transversale Welle sein.

Der große Schritt in Richtung eines tieferen Verständnisses für die Tatsache, dass es sich bei Licht um transversale Wellen handelt, kam dann aus den Studien zur Theorie der Elektrizität und des Magnetismus, die von Maxwell in den nach ihm benannten Maxwell'schen Gleichungen zusammengefasst wurde. Bei der Bearbeitung der Formeln wurde klar, dass man diese in Form einer transversalen Wellengleichung darstellen konnte. Die Geschwindigkeit der Wellen konnte von den bekannten magnetischen und elektrischen Konstanten abgeleitet werden. Abschätzungen dieser Geschwindigkeit zeigten, dass sie gleich der Lichtgeschwindigkeit war. Licht konnte also als transversale elektromagnetische Welle aufgefasst werden.

1.5 Die Quantentheorie

Ende des 19. Jahrhunderts schienen keine weiteren Regeln zur Erklärung der Lichtphänomene notwendig. Allerdings blieben auch einige wichtige Fragen unbeantwortet. Eine dieser Fragen war, wieso Festkörper bei einer Temperatur von etwa 600°C rot glühen und mit steigender Temperatur dann immer weißer werden. Viele Wissenschaftler wie z.B. **Kelvin** (1824 - 1907) beschäftigten sich mit diesem Problem aber erst **Max Karl Ernst Ludwig Planck** (1858 - 1947) schlug quasi aus einer Notlage heraus eine Lösung vor. Er postulierte am 19. Oktober 1900 in einem Vortrag vor der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Berlin eine Quantenhypothese und begründete damit die moderne Quantentheorie.

Planck's Grundidee war die Aufteilung der Wellenenergie in kleine Pakete (Quanten), deren Energie proportional zur Frequenz der Welle sein sollte. Niederfrequente Quanten lassen sich damit leichter erzeugen (man braucht weniger Energie) als hochfrequente. Die Quantenhypothese wurde anfangs sehr skeptisch aufgenommen, aber bald wurden die Zweifel durch viele experimentelle Hinweise ausgeräumt. Ab etwa 1920 war die Quantentheorie allgemein akzeptiert, vor allem aufgrund **Albert Einstein's** (1879 - 1955) Arbeiten zum photoelektrischen Effekt und **Compton's** (1892 - 1962) Erklärung der Energie- und Impulserhaltung bei der Streuung von Röntgenstrahlen (1923). Die Quantentheorie beschreibt auch die Art und Weise wie Licht von Atomen emittiert und absorbiert wird.

Der Welle-Teilchen-Dualismus

Mit der Entwicklung der Quantentheorie hat sich gezeigt, dass Licht sowohl Teilchen als auch Welle ist. Die Konzepte von Welle und Teilchen, die einander in der makroskopischen Welt so offensichtlich widersprechen, verschmelzen offensichtlich in einem mikroskopischen Bereich miteinander. Die gleichberechtigte Darstellung von Licht als Welle und Teilchen wird aber immer für denjenigen schwierig bleiben, der intuitiv zugängliche Vorstellungen in der Physik bevorzugt.

Materiewellen

Aus einem Bedürfnis nach Symmetrie in der Natur heraus postulierte im Jahr 1924 **Louis de Broglie** (1892 - 1987), dass Teilchen Wellencharakter besitzen sollten, ähnlich wie Wellen Teilchencharakter besitzen. Innerhalb von nur 3 Jahren wurde seine kühne Idee durch Experimente **Davisson** (1881 - 1958) und **Germer** (1899 - 1971) sowie von **G. P. Thomson** (1892 - 1975) zu Beugungseffekten von Materiewellen (Elektronenbeugung) bestätigt. Seither wurden solche Experimente auch mit Neutronen, Protonen und Atomen durchgeführt. Aufgrund dieser Experimente stellte **Erwin Schrödinger** (1887 - 1961) im Jahr 1928 eine allgemeine Wellentheorie der Materie auf, die zumindest bis hin zu atomaren Dimensionen die Verhältnisse richtig beschreibt.

1.6 Optische Instrumente

Wer das Linsenfernrohr tatsächlich erfand, wissen wir nicht genau. Sicher ist nur, dass **Hans Lippershey** (1587 - 1619), ein holländischer Brillenhersteller, am 2. Oktober 1608 ein solches Gerät zum Patent angemeldet hat. **Galileo Galilei** hörte in Padua von dieser Erfindung und baute das innerhalb von wenigen Monaten mit selbstgeschliffenen Linsen nach. Er begann mit seinem Teleskop wichtige Entdeckungen zu machen – die Jupitermonde und die Saturnringe – die die Astronomie grundlegend ändern sollten.

Fast genau zur selben Zeit wurde das Mikroskop erfunden, wahrscheinlich vom Holländer **Zacharias Janssen** (1588 - 1632). **Francisco Fontana** (1580 - 1656) ersetzte das konkave Okular des Mikroskops durch ein konvexe Linse. In ähnlicher Weise wandelte **Johannes Kepler** (1571 - 1630) das Teleskop ab. 1611 veröffentlichte Kepler sein Werk "Dioptrik". Er hatte die innere Totalreflexion entdeckt und kam dadurch zu einer für kleine Winkel gültigen Formulierung des Brechungsgesetzes.

Um eine theoretische Basis für das Design von optischen Geräten zu haben, wurde das Gebiet der geometrischen Optik begründet. Es basierte auf der geradlinigen Ausbreitung von Lichtstrahlen und deren Brechung an Grenzflächen zwischen unterschiedlichen Medien. Auf diesen Grundüberlegungen wurden Regeln formuliert, um die Leistungsfähigkeit von Linsen und Spiegeln zu erhöhen. Der Glaube der geometrischen Optik, dass die Qualität eines optischen Instruments nur vom Können der Hersteller abhängt, wurde von **Abbe** (1840 - 1905) im Jahr 1873 beendet. Er zeigte, dass die Theorie der geometrischen Optik – so nützlich sie bei der Entwicklung von optischen Geräten ist – unvollständig ist, da sie die Wellennatur des Lichts nicht berücksichtigt. Er formulierte eine andere Sicht der Bildentstehung, die auf zwei aufeinander folgenden Beugungsprozessen beruht. Als Resultat können Details, die kleiner als eine halbe Wellenlänge sind, auch mit einem perfekt korrigierten optischen System nicht mehr aufgelöst werden.

Um eine weitere Verbesserung des Auflösungsvermögens von optischen Geräten zu erhalten, muss man nach der Theorie von Abbe für die Abbildung Wellen mit kleinerer Wellenlänge benutzen. Dies wird heute in der Röntgenmikroskopie oder der Elektronenmikroskopie getan (hier werden Materiewellen zur Abbildung verwendet). Mit Elektronenmikroskopen wird heute eine Auflösung im Bereich von 0.1 nm erreicht.

1.7 Der Laser

Durch die Erfindung des Lasers im Jahr 1960 durch **Townes, Basov** und **Prokharov** haben wir heute sehr intensive Quellen kohärenten Lichts zur Verfügung. Mit der Erfindung des Lasers und dem theoretischen Konzept der Kohärenz haben sich der Optik zahlreiche neue Entwicklungspfade eröffnet. Der Laser hat mittlerweile auch in unserer Alltagswelt eine große Verbreitung gefunden. In den verschiedenen Gebieten der Physik hat der Laser im Bereich der optische Messmethoden eine große Bedeutung erlangt. So ist z.B. die optische Spektroskopie mit einer Frequenzauflösung von besser als 1 Hz ebenso möglich geworden wie die direkte Beobachtung von sehr schnellen Vorgängen auf einer Zeitskala von wenigen fs.³

³1 fs = 10⁻¹⁵s.