

E. Menzel W. Mirandé I. Weingärtner

Technische Universität Braunschweig

Fourier-Optik und Holographie

Springer-Verlag Wien New York



Inhaltsverzeichnis

1. Interferenz und Kohärenz (Menzel)	1
1.1. Die ebene Lichtwelle	1
1.2. Interferenzen mit Doppelspalt	3
1.2-a. Intensitätsverteilung und Kontrast	3
1.2-b. Messungen an dünnen Schichten	6
1.3. Doppelspalt mit ausgedehnter Lichtquelle	7
1.3-a. Zwei Quellen verschwindender Ausdehnung, die Kohärenzbedingung	7
1.3-b. Quelle mit endlicher Ausdehnung, die spatiale Kohärenzfunktion	8
1.3-c. Das Michelsonsche Sterninterferometer	11
1.4. Einige allgemeine Beziehungen der Fourier-Optik	12
1.4-a. Die Dirac-Funktion	12
1.4-b. Fourier-Transformation und Koordinaten-Transformation	16
1.4-c. Kohärenzfunktion bei inkohärenter Beleuchtung	16
1.5. Nicht-monochromatische Zweistrahlinterferenzen	17
1.5-a. Die chromatische Kohärenzfunktion	17
1.5-b. Fourier-Spektroskopie	20
2. Beugung (Menzel)	22
2.1. Allgemeines	22
2.1-a. Skizze einer allgemeinen Theorie	22
2.1-b. Das Kirchhoff-Integral	22
2.2. Fresnel- und Fraunhofer-Beugung	24
2.2-a. Vereinfachungen des Kirchhoff-Integrals	24
2.2-b. Die Fresnelsche Näherung	26
2.2-c. Die Fraunhofersche Näherung	28
2.2-d. Eindimensionale Objekte	31
2.3. Fraunhofer-Beugung an ausgewählten eindimensionalen Objekten	31
2.3-a. Fourier-Darstellung von Gittern	31
2.3-b. Fourier-Spektrum allgemeiner Absorptionsobjekte	33
2.3-c. Harmonische Elementargitter	34
2.3-d. Absorptions- und Phasenobjekte	35
2.3-e. Harmonische Gitter mit großer Modulation	36
2.3-f. Der Dirac-Kamm	37
2.3-g. Echelette-Gitter	39
2.3-h. Beugung am Spalt	40
2.4. Fraunhofer-Beugung an ausgewählten zweidimensionalen Objekten	40
2.4-a. Allgemeines	40
2.4-b. Separierbare Objekte	41
2.4-c. Kreisblende	41
2.5. Abbildung eines Punkts als Fresnel-Beugung an besonderen Objekten	43
2.5-a. Die Linse	43
2.5-b. Die Fresnelsche Zonenplatte	44

2.6. Beugung an dreidimensionalen Objekten	46
2.6-a. Fraunhofer-Beugung in erster Bornscher Näherung	46
2.6-b. Entwicklung nach ebenen Wellen, Beugung im Nahfeld	49
2.6-c. Dicke und dünne Objekte	52
2.7. Intensität im Fraunhoferschen Beugungsbild bei kohärenter Beleuchtung; das Autokorrelationsintegral	53
2.8. Fraunhofer-Beugung bei ausgedehnter, inkohärenter Lichtquelle; die Faltung	55
2.8-a. Allgemeines	55
2.8-b. Faltung mit Dirac-Funktionen	56
2.8-c. Die Linsenblende bei der Abbildung inkohärenter Objekte	56
2.8-d. Der Faltungssatz	58
2.8-e. Spaltbreite bei Spektrometern, Entfaltung	58
2.9. Abbildung inkohärenter Objekte durch lineare Übertragung von Intensitäten	59
2.9-a. Das Duffieux-Integral	59
2.9-b. Das beugungsbegrenzte Kantenbild	62
2.9-c. Eigenschaften der Übertragungsfunktion	63
2.9-d. Lineare Ketten	64
2.9-e. Isoplanatische Bereiche	65
2.10. Fourier-Transformation von zusammengesetzten Funktionen	66
2.10-a. Das Moiré	66
2.10-b. Gitter mit endlicher Strichzahl	67
2.10-c. Apodisation	68
2.10-d. Apodisation bei der Fourier-Spektroskopie	69
2.10-e. Das Sampling-Theorem	69
2.10-f. Strukturamplitude von Beugungsgittern	71
2.10-g. Bewegungsunschärfe bei der inkohärenten Abbildung	71
3. Abbildung bei kohärenter Beleuchtung (Menzel)	73
3.1. Allgemeines	73
3.2. Die Lichterregung in der Pupille	73
3.3. Bildamplitude durch Integration über die Pupille	75
3.4. Intensitätsbilder von Objekten mit kleiner Modulation	77
3.5. Einige spezielle Pupillenfunktionen	79
3.5-a. Beugungsgrenze der Auflösung	79
3.5-b. Absorptionsobjekte im symmetrischen Hellfeld	80
3.5-c. Phasenobjekte im symmetrischen Hellfeld	82
3.5-d. Einseitenband-Übertragung	84
3.5-e. Extrafokale Abbildung von Phasenobjekten	84
3.5-f. Extrafokale Abbildung einer Kante	85
3.5-g. Phasenkontrast nach Zernike	87
3.6. Wellenflächen mit Aberrationen	88
3.6-a. Allgemeines	88
3.6-b. Aberrationen von Fresnelschen Zonenplatten	91
3.7. Die Phase von Lichterregungen, Interferenzen	95
3.7-a. Allgemeines	95
3.7-b. Interferenzkontrast	96
3.7-c. Interferenzstreifen	97
3.7-d. Differentialinterferenzen	98
3.8. Allgemeine Amplitudenübertragung durch Linsen (Weingärtner)	99
4. Felder von Zweistrahlinterferenzen (Menzel)	106
4.1. Punktquelle	106
4.2. Ausgedehnte Lichtquelle. Ort der Interferenzen	108

5. Räumliche Filterung (Menzel)	111
5.1. Übersicht	111
5.2. Kompensation von Aberrationen	112
5.2-a. Filterung bei inkohärenter Abbildung in Echtzeit	112
5.2-b. Filterung bei kohärenter Abbildung in Echtzeit	113
5.2-c. Nachträgliche Filterung photographischer Aufnahmen	115
5.2-d. Nachträgliche Amplitudenfilterung	117
5.2-e. Umsetzen einer Intensitätsverteilung in eine kohärente Amplitudenverteilung	117
5.3. Weitere Umformungen durch kohärente Filterung	118
5.3-a. Phasenkontrastverfahren	118
5.3-b. Optisches Differenzieren	118
5.3-c. Eliminierung von Objektfrequenzen aus dem Bild	119
5.3-d. Willkürlicher Ersatz des Objekts	119
5.4. Bildvervielfachung inkohärenter Objekte durch Gitterbeugung	120
5.5. Zeichenerkennung	120
5.5-a. Allgemeines	120
5.5-b. Das inverse Filter	121
5.5-c. Das Korrelationsfilter	121
5.5-d. Korrelation von Gradienten	122
5.5-e. Korrelationsfilterung mit inkohärenter Beleuchtung	123
6. Kohärenzfunktionen für spatiale und chromatische Teilkohärenz (Weingärtner)	124
6.1. Allgemeines	124
6.2. Spatiale Teilkohärenz	125
6.2-a. Die Kohärenzfunktion	125
6.2-b. Die Abbildung mit Kohärenzfunktionen	126
6.2-c. Die Kohärenzübertragungsfunktion	128
6.2-d. Kontrastübertragungsfunktion und Phasenkontrastfunktion bei kleiner Objektaussteuerung	129
6.3. Spatiale und chromatische Teilkohärenz	132
6.3-a. Die Kohärenzfunktion	132
6.3-b. Die Abbildung mit Kohärenzfunktionen	134
6.3-c. Die Kohärenzübertragungsfunktion	136
6.4. Realisierbarkeit von spatial inkohärenter Beleuchtung	138
7. Grundzüge und Anwendungen der Holographie (Menzel)	140
7.1. Vorgeschichte	140
7.2. Holographie von punktförmigen Objekten	141
7.2-a. Fourier-Holographie	141
7.2-b. Quasi-Fourier-Holographie	146
7.2-c. Fresnel-Holographie	148
7.3. Praktische Holographie	152
7.3-a. Rekonstruierte Wellenfronten	152
7.3-b. Das Intermodulationsbild	153
7.3-c. In-Line-Holographie	153
7.3-d. Off-Axis-Holographie	153
7.3-e. Eigenschaften der Hologrammplatte und nutzbarer Objektraum	156
7.3-f. Granulation	157
7.3-g. Dreidimensionale Speichermedien	160

7.4. Holographie von Objekten mit wohl definierter Amplitude	161
7.4-a. Abgrenzung	161
7.4-b. Fresnel-Holographie	162
7.4-c. Fresnel-In-Line-Holographie	166
7.4-d. Fourier-Holographie	166
7.4-e. Quasi-Fourier-Holographie	168
7.4-f. Bildebenen-Holographie	171
7.5. Holographie mit kohärenten, nicht homozentrischen Beleuchtungswellen	176
7.5-a. Allgemeines	176
7.5-b. Fourier-Holographie	176
7.5-c. Bildebenen-Holographie	178
7.5-d. Allgemeiner Fall	179
7.5-e. Kompensation von Inhomogenitäten der Objektbeleuchtung	180
7.6. Filterung bei der Holographie	181
7.6-a. Allgemeines	181
7.6-b. Orte für Fourier-Filter	182
7.6-c. Nicht-isoplanatische Eingriffe	182
7.6-d. Holographische Herstellung von Vander-Lugt-Filtern	183
7.7. Holographische Interferometrie	185
7.7-a. Allgemeines	185
7.7-b. Konventionelle Interferometrie mit Hologrammen	186
7.7-c. Das holographische Probeglas	189
7.7-d. Subtraktion von Amplituden	190
7.7-e. Eliminierung von überlagernden Phasenstrukturen	191
7.7-f. Konturen von rauen Objekten	195
7.7-g. Vielstrahl-Interferenzen	198
7.7-h. Verrückung und Deformation von Objekten mit rauher Oberfläche	199
7.7-i. Bewegte und schwingende Oberflächen	202
7.7-i-1. Zwei Objektpositionen	203
7.7-i-2. Stetig sich ändernde Objektpositionen, gemittelte Lichtamplituden	204
7.7-i-3. Stetig sich ändernde Objektpositionen, gemittelte Lichtintensität in Echtzeit	205
7.8. Multiplex-Holographie	207
7.8-a. Allgemeines	207
7.8-b. Einzelhologramme nebeneinander	208
7.8-c. Einzelhologramme übereinander (dünne photographische Schichten)	209
7.8-d. Einzelhologramme übereinander (dicke photographische Schichten)	211
7.8-e. Synthese von Hologrammen aus mehreren zweidimensionalen Aufnahmen	214
7.9. Hologrammaufnahme und Rekonstruktion mit verschiedenen Medien	215
7.9-a. Allgemeines	215
7.9-b. Akustische Holographie	215
7.9-c. Mikrowellen	217
7.9-d. Elektronen- und Röntgenstrahlen	217
7.9-e. Computer-Holographie	217
8. Aufnahmemedien für Hologramme (Mirandé)	219
8.1. Die photographische Emulsion	219
8.1-a. Die Schwärzungskurve	219
8.1-b. Die Amplitudentransparenz-Kennlinie	222
8.2. Der Beugungswirkungsgrad von Amplitudenhologrammen	224
8.2-a. Einfache Belichtung	224
8.2-b. Zusätzliche inkohärent überlagerte Belichtungen	228
8.2-b-1. Zusätzliche Belichtung mit homogener Intensitätsverteilung	228
8.2-b-2. Mehrfachbelichtung mit verschiedenen Interferenzmustern	229

8.3. Die Modulationsübertragungsfunktion der Photoschicht	231
8.3-a. Allgemeines	231
8.3-b. Die Messung der Modulationsübertragungsfunktion	233
8.4. Nichtlinearität des photographischen Prozesses	234
8.4-a. Punktojekt.	234
8.4-b. Allgemeine Objekte	238
8.5. „Dünne“ dielektrische Hologramme	246
8.5-a. Allgemeines	246
8.5-b. Der Beugungswirkungsgrad	248
8.6. Volumen hologramme	249
8.6-a. Allgemeines	249
8.6-b. Der Beugungswirkungsgrad	250
8.7. Spezielle Aufnahmemedien und Verfahren.	252
8.7-a. Allgemeines	252
8.7-b. Silberhalogenidhaltige Photoschichten	253
8.7-c. Bichromat-Gelatine	255
8.7-d. Photolacke und Photopolymere	256
8.7-e. Thermoplaste	256
8.7-f. Photochromes Glas	257
8.7-g. Ferroelektrische Kristalle	258
8.7-h. Synthetische Hologramme.	258
8.8. Nichtlinearitäten bei der Aufnahme von dünnen dielektrischen Hologrammen	260
9. Einfluß der Übertragungsfunktion der Photoschicht auf die Holographie (Weingärtner)	262
9.1. Allgemeines	262
9.2. Fourier- und Quasi-Fourier-Holographie	264
9.3. Bildebenen-Holographie	266
9.4. Fresnel-Holographie	267
10. Teilkohärente Holographie (Weingärtner)	272
10.1. Allgemeines	272
10.2. Verwaschungsfunktion und Übertragungsfunktion für Amplituden	273
10.3. Hologrammaufnahme bei spatialer Teilkohärenz	276
10.3-a. Grundgleichungen	276
10.3-b. Fresnel-Holographie	276
10.3-c. Fourier- und Quasi-Fourier-Holographie	281
10.3-d. Bildebenen-Holographie	285
10.3-d-1. Rekonstruktion	285
10.3-d-2. Hologrammaufnahme und allgemeine Beziehungen	286
10.3-d-3. Ideale Abbildungssysteme	289
10.3-d-4. Kompensation von Abbildungsfehlern bei kohärenter Beleuchtung	289
10.3-d-5. Kompensation von Aberrationen bei Teilkohärenz	290
10.3-d-6. Fehlerfreie beugungsbegrenzte Abbildung	290
10.4. Hologrammaufnahme bei chromatischer Teilkohärenz	291
10.4-a. Grundgleichungen	291
10.4-b. Fresnel-Holographie	292
10.4-c. Fourier- und Quasi-Fourier-Holographie	296
10.4-d. Bildebenen-Holographie	297

10.5. Hologrammaufnahme bei spatialer und chromatischer Teilkohärenz	300
10.5-a. Gabor-In-Line-Fresnel-Holographie	300
10.5-b. Übersicht über verschiedene Typen der Holographie	302
10.6. Diffus streuende Objekte	307
10.7. Rekonstruktion bei Teilkohärenz	310
10.7-a. Allgemeines	310
10.7-b. Spatiale Teilkohärenz	311
10.7-c. Chromatische Teilkohärenz	313
10.8. Spatial inkohärente Holographie	315
10.9. Verschiedene Anwendungen	318
10.9-a. Elektronen-Holographie	318
10.9-b. Röntgen-Holographie	323
10.10. Holographische Messung von Kohärenzfunktionen	324
10.10-a. Holographische Fourier-Spektroskopie	324
10.10-b. Holographische Messung spatialer Teilkohärenz	327
10.10-b-1. Homogene Kohärenzfunktionen	327
10.10-b-2. Inhomogene Kohärenzfunktionen	329
11. Anhang: Formeln und Sätze zur Fourier-Optik	335
11.1. Distributionen	335
11.2. Die Fourier-Transformierte einer reellen Funktion	336
11.3. Fourier-Reihen	338
11.4. Fourier-Transformationen spezieller Funktionen	339
11.5. Sätze	340
Literatur und Autorenverzeichnis	342
Sachverzeichnis	355