

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur dritten Auflage XIX

Vorwort zur zweiten Auflage XXIII

Teil I Optik 1

1	Strahlenoptik 3
1.1	Postulate der Strahlenoptik 4
1.1.1	Ausbreitung in einem homogenen Medium 5
1.2	Einfache optische Komponenten 6
1.2.1	Spiegel 6
1.2.2	Ebene Grenzflächen 8
1.2.3	Sphärische Grenzflächen und Linsen 10
1.2.4	Lichtleiter 13
1.3	Gradientenindexoptik 14
1.3.1	Die Strahlengleichung 14
1.3.2	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex 15
1.3.3	Die Eikonalgleichung 18
1.4	Matrizenoptik 19
1.4.1	Die Strahltransfermatrix 19
1.4.2	Matrizen einfacher optischer Komponenten 20
1.4.3	Matrizen von hintereinander geschalteten optischen Komponenten 21
1.4.4	Periodische optische Systeme 23
2	Wellenoptik 29
2.1	Die Postulate der Wellenoptik 30
2.1.1	Die Wellengleichung 30
2.2	Monochromatische Wellen 31
2.2.1	Komplexe Darstellung und die Helmholtzgleichung 31
2.2.2	Einfache Wellen 32
2.2.3	Paraxiale Wellen 34
2.3	Die Beziehung zwischen Wellenoptik und Strahlenoptik 35
2.3.1	Die Eikonalgleichung 36
2.4	Einfache optische Komponenten 36
2.4.1	Reflexion und Brechung 36
2.4.2	Durchgang durch optische Komponenten 37
2.4.3	Optische Komponenten mit variablem Brechungsindex 41

2.5	Interferenz	42
2.5.1	Interferenz zweier Wellen	42
2.5.2	Vielwelleninterferenz	45
2.6	Polychromatisches und gepulstes Licht	49
2.6.1	Zeitliche und spektrale Beschreibung	49
2.6.2	Lichtschwebung	51
3	Optik von Strahlbündeln	57
3.1	Der Gaußstrahl	57
3.1.1	Die komplexe Amplitude eines Gaußstrahls	57
3.1.2	Eigenschaften von Gaußstrahlen	58
3.1.3	Die Qualität eines Strahlbündels	64
3.2	Durchgang durch optische Komponenten	64
3.2.1	Durchgang durch eine dünne Linse	64
3.2.2	Formung eines Strahlbündels	66
3.2.3	Reflexion an einem Kugelspiegel	67
3.2.4	Durchgang durch ein beliebiges optisches System	68
3.3	Hermite-Gauß-Strahlen	70
3.3.1	Die komplexe Amplitude	71
3.3.2	Intensitätsverteilung	71
3.4	Laguerre-Gauß-Strahlen	72
3.4.1	Laguerre-Gauß-Strahlen	72
3.4.2	Optische Wirbel	73
3.4.3	Ince-Gauß-Strahlen	73
3.5	Nichtbeugende Strahlen	74
3.5.1	Besselstrahlen	74
3.5.2	Airystrahlen	75
4	Fourieroptik	79
4.1	Lichtausbreitung im Vakuum	80
4.1.1	Räumliche harmonische Funktionen und ebene Wellen	80
4.1.2	Die Übertragungsfunktion des Vakuums	85
4.1.3	Die Impulsantwortfunktion des Vakuums	87
4.1.4	Huygens-Fresnel-Prinzip	88
4.2	Die optische Fouriertransformation	88
4.2.1	Fouriertransformation im Fernfeld	88
4.2.2	Fouriertransformation mithilfe einer Linse	89
4.3	Lichtbeugung	91
4.3.1	Fraunhoferbeugung	92
4.3.2	Fresnelbeugung	94
4.3.3	Nichtbeugende Wellen	97
4.4	Bildentstehung	98
4.4.1	Strahlenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	98
4.4.2	Wellenoptische Beschreibung eines $4f$ -Systems	99
4.4.3	Wellenoptische Beschreibung eines einlinsigen abbildenden Systems	101
4.4.4	Abbildung im Nahfeld	104
4.5	Holographie	105
4.5.1	Die holographische Codierung	106
4.5.2	Holographie außerhalb der optischen Achse	107
4.5.3	Fouriertransformations-Holographie	108
4.5.4	Holographische Ortsfilter	109
4.5.5	Die holographische Apparatur	109
4.5.6	Volumenholographie	110

5	Elektromagnetische Optik	117
5.1	Die elektromagnetische Theorie des Lichts	118
5.1.1	Die maxwellschen Gleichungen im Vakuum	118
5.1.2	Die Wellengleichung	118
5.1.3	Die maxwellschen Gleichungen in Medien	119
5.1.4	Randbedingungen	120
5.1.5	Intensität, Leistung und Energie	120
5.1.6	Impuls	120
5.2	Elektromagnetische Wellen in Dielektrika	121
5.2.1	Definitionen	121
5.2.2	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	121
5.2.3	Nichtlineare, dispersive, inhomogene oder anisotrope Medien	122
5.3	Monochromatische elektromagnetische Wellen	124
5.3.1	Die maxwellschen Gleichungen in einem Medium	125
5.3.2	Intensität und Leistung	125
5.3.3	Lineare, nichtdispersive, homogene und isotrope Medien	125
5.3.4	Inhomogene Medien	125
5.3.5	Dispersive Medien	125
5.4	Einfache elektromagnetische Wellen	126
5.4.1	Ebene, Dipol- und gaußsche elektromagnetische Wellen	126
5.4.2	Die Beziehung zwischen elektromagnetischer Optik und skalarer Wellenoptik	129
5.4.3	Vektor-Strahlbündel	130
5.5	Absorption und Dispersion	130
5.5.1	Absorption	130
5.5.2	Dispersion	132
5.5.3	Resonante Medien	134
5.6	Die Streuung elektromagnetischer Wellen	137
5.6.1	Die bornsche Näherung	138
5.6.2	Rayleighstreuung	138
5.6.3	Miestreuung	141
5.6.4	Dämpfung in einem streuenden Medium	142
5.7	Pulsausbreitung in dispersiven Medien	143
5.7.1	Die Gruppengeschwindigkeit	143
5.7.2	Die Dispersion der Gruppengeschwindigkeit	144
6	Polarisationsoptik	151
6.1	Die Polarisation des Lichts	152
6.1.1	Die Polarisation	152
6.1.2	Die Matrixdarstellung der Polarisation	155
6.2	Reflexion und Brechung	159
6.2.1	TE-Polarisation	160
6.2.2	TM-Polarisation	161
6.3	Die Optik anisotroper Medien	163
6.3.1	Der Brechungsindex	163
6.3.2	Ausbreitung entlang einer Hauptachse	165
6.3.3	Ausbreitung entlang beliebiger Richtungen	166
6.3.4	Die Dispersionsrelation, Strahlen, Wellenfronten und Energietransport	168
6.3.5	Doppelbrechung	170
6.4	Optische Aktivität und Magnetooptik	172
6.4.1	Optische Aktivität	172
6.4.2	Magnetooptik: Der Faradayeffekt	174

6.5	Optik von Flüssigkristallen	175
6.5.1	Die Struktur von Flüssigkristallen	175
6.5.2	Optische Eigenschaften von verdrillten nematischen Flüssigkristallen	176
6.6	Polarisierende Bauelemente	177
6.6.1	Polarisatoren	177
6.6.2	Retarder	178
6.6.3	Polarisationsrotatoren	179
6.6.4	Nichtreziproke polarisierende Bauelemente	179
7	Optik photonischer Kristalle	185
7.1	Optik von dielektrischen Schichtmedien	187
7.1.1	Matrixtheorie der Optik von Schichtmedien	187
7.1.2	Das Fabry-Pérot-Etalon	192
7.1.3	Das Bragggitter	194
7.2	Eindimensionale photonische Kristalle	200
7.2.1	Blochmoden	201
7.2.2	Matrizenoptik periodischer Medien	203
7.2.3	Fourieroptik periodischer Medien	208
7.2.4	Grenzflächen zwischen periodischen und homogenen Medien	210
7.3	Zwei- und dreidimensionale photonische Kristalle	211
7.3.1	Zweidimensionale photonische Kristalle	212
7.3.2	Dreidimensionale photonische Kristalle	213
8	Optik von Metallen und Metamaterialien	221
8.1	Einfach- und doppelt-negative Medien	223
8.1.1	Wellenausbreitung in einfach- und doppelt-negativen Medien	224
8.1.2	Wellen an Grenzflächen zwischen DP-, EN- und DP-Medien	226
8.1.3	Hyperbolische Medien	232
8.2	Optik von Metallen: Plasmonik	234
8.2.1	Die optischen Eigenschaften von Metallen	234
8.2.2	Die Grenzfläche zwischen Metall und Dielektrikum: Oberflächenplasmonpolaritonen	239
8.2.3	Metallische Nanokugeln: Lokalisierte Oberflächenplasmonen	241
8.2.4	Optische Antennen	244
8.3	Optik von Metamaterialien	245
8.3.1	Metamaterialien	246
8.3.2	Metaoberflächen	251
8.4	Transformationsoptik	253
8.4.1	Transformationsoptik	253
8.4.2	Tarnumhänge	255
9	Wellenleiteroptik	261
9.1	Wellenleiter aus ebenen Spiegeln	262
9.1.1	Wellenleitermoden	262
9.1.2	Ausbreitungskonstanten	263
9.1.3	Feldverteilungen	264
9.1.4	Die Zahl der Moden	265
9.1.5	Die Dispersionsrelation	265
9.1.6	Gruppengeschwindigkeiten	265
9.1.7	TM-Moden	266
9.1.8	Vielmodenfelder	267
9.2	Ebene dielektrische Wellenleiter	267
9.2.1	Wellenleitermoden	268

9.2.2	Feldverteilungen	270
9.2.3	Dispersionsrelation und Gruppengeschwindigkeiten	271
9.3	Zweidimensionale Wellenleiter	273
9.3.1	Der rechteckige Spiegelwellenleiter	273
9.3.2	Der rechteckige dielektrische Wellenleiter	274
9.3.3	Die Geometrie von Kanalwellenleitern	274
9.3.4	Materialien	275
9.4	Optische Kopplung in Wellenleitern	276
9.4.1	Einkopplung	276
9.4.2	Gekoppelte Wellenleiter	277
9.4.3	Wellenleiterarrays	281
9.5	Photonische Kristalle als Wellenleiter	282
9.5.1	Braggitter als Wellenleiter	282
9.5.2	Bragg-Gitterwellenleiter als photischer Kristall mit einer Defektschicht	283
9.5.3	Zweidimensionale Wellenleiter aus photonischen Kristallen	283
9.6	Plasmonische Wellenleiter	283
10	Faseroptik	289
10.1	Geführte Strahlen	290
10.1.1	Stufenindexfasern	290
10.1.2	Gradientenindexfasern	292
10.2	Geführte Wellen	293
10.2.1	Helmholtzgleichung	293
10.2.2	Stufenindexfasern	294
10.2.3	Einmodenfasern	298
10.2.4	Quasi-ebene Wellen in Stufen- und Gradientenindexfasern	300
10.2.5	Mehrkerntfasern und Faserkoppler	304
10.3	Dämpfung und Dispersion	306
10.3.1	Dämpfung	306
10.3.2	Dispersion	307
10.4	Hohlkerntfasern und Fasern aus photonischen Kristallen	314
10.4.1	Führung durch effektiven Brechungsindex	314
10.4.2	Führung durch photonische Bandlücke	315
10.4.3	Anwendungen	315
10.5	Materialien für optische Fasern	316
10.5.1	Fasern für das mittlere Infrarot	316
10.5.2	Hybrid- und Multifunktionsfasern	317
11	Resonatoroptik	321
11.1	Resonatoren aus ebenen Spiegeln	323
11.1.1	Resonatormoden	323
11.1.2	Schief einfallende Resonatormoden	329
11.2	Kugelspiegelresonatoren	330
11.2.1	Strahleingrenzung	330
11.2.2	Gaußmoden	332
11.2.3	Resonanzfrequenzen	334
11.2.4	Hermite-Gauß-Moden	335
11.2.5	Endliche Blenden und Beugungsverluste	336
11.3	Zwei- und dreidimensionale Resonatoren	337
11.3.1	Zweidimensionale rechteckige Resonatoren	337
11.3.2	Kreisförmige Resonatoren und Flüstergaleriemoden	338
11.3.3	Dreidimensionale rechteckige Hohlräumresonatoren	339

11.4	Mikro- und Nanoresonatoren	340
11.4.1	Rechteckige Mikroresonatoren	341
11.4.2	Mikrosäulen-, Mikrodisk- und Mikroringresonatoren	342
11.4.3	Mikrokugeln	343
11.4.4	Mikroresonatoren aus photonischen Kristallen	344
11.4.5	Plasmonische Resonatoren: Metallische Nanodisks und Nanokugeln	345

12 Statistische Optik 349

12.1	Statistische Eigenschaften von stochastischem Licht	350
12.1.1	Optische Intensität	350
12.1.2	Zeitliche Kohärenz und Spektrum	351
12.1.3	Räumliche Kohärenz	355
12.1.4	Longitudinale Kohärenz	358
12.2	Interferenz von partiell kohärentem Licht	359
12.2.1	Interferenz zweier partiell kohärenter Wellen	359
12.2.2	Interferometrie und zeitliche Kohärenz	360
12.2.3	Interferometrie und räumliche Kohärenz	362
12.3	Transmission von partiell kohärentem Licht durch optische Systeme	364
12.3.1	Ausbreitung von partiell kohärentem Licht	364
12.3.2	Bildentstehung mit inkohärentem Licht	365
12.3.3	Verstärkung der räumlichen Kohärenz durch Ausbreitung	367
12.4	Partielle Polarisation	370
12.4.1	Die Kohärenzmatrix	371
12.4.2	Stokesparameter und Poincarékugeldarstellung	371
12.4.3	Unpolarisiertes Licht	372
12.4.4	Polarisiertes Licht	372

13 Photonenoptik 377

13.1	Das Photon	378
13.1.1	Licht in einem Resonator	378
13.1.2	Die Energie eines Photons	379
13.1.3	Die Polarisation von Photonen	380
13.1.4	Der Ort eines Photons	382
13.1.5	Der Impuls eines Photons	383
13.1.6	Die Interferenz von Photonen	384
13.1.7	Die Zeit eines Photons	385
13.2	Photonenströme	387
13.2.1	Der Photonenstrom	387
13.2.2	Stochastische Eigenschaften des Photonenflusses	389
13.2.3	Photonenzahlstatistik	390
13.2.4	Die zufällige Aufteilung von Photonenströmen	394
13.3	Quantenzustände des Lichts	396
13.3.1	Quantentheorie des harmonischen Oszillators	396
13.3.2	Die Analogie zwischen einer optischen Mode und einem harmonischen Oszillator	397
13.3.3	Kohärente Zustände	397
13.3.4	Quadraturgequetschtes Licht	398
13.3.5	Photonenzahlgequetschtes Licht	399
13.3.6	Zweiphotonenlicht	400

Teil II Photonik 411

14	Licht und Materie 413
14.1	Energieniveaus 413
14.1.1	Atome 414
14.1.2	Ionen und dotierte Dielektrika 418
14.1.3	Moleküle 422
14.1.4	Festkörper 424
14.2	Die Besetzung von Energieniveaus 428
14.2.1	Die Boltzmannverteilung 428
14.2.2	Die Fermi-Dirac-Verteilung 429
14.3	Die Wechselwirkung von Photonen mit Atomen 430
14.3.1	Die Wechselwirkung von Einmodenlicht mit einem Atom 430
14.3.2	Spontane Emission 432
14.3.3	Induzierte Emission und Absorption 433
14.3.4	Linienverbreiterung 436
14.3.5	Verstärkte spontane Emission 439
14.3.6	Laserkühlung, Einschluss von Atomen und Atomoptik 440
14.4	Thermisches Licht 443
14.4.1	Das thermische Gleichgewicht zwischen Photonen und Atomen 443
14.4.2	Das Spektrum des schwarzen Strahlers 444
14.5	Lumineszenz und Lichtstreuung 446
14.5.1	Formen der Lumineszenz 447
14.5.2	Photolumineszenz 448
14.5.3	Lichtstreuung 451
15	Laserverstärker 457
15.1	Theorie der Laserverstärkung 459
15.1.1	Gewinn und Bandbreite 459
15.1.2	Phasenverschiebung 460
15.2	Pumpen des Verstärkers 461
15.2.1	Geschwindigkeitsgleichungen 462
15.2.2	Pumpschemata 464
15.3	Verbreitete Laserverstärker 468
15.3.1	Rubin 469
15.3.2	Neodymdotiertes Glas 470
15.3.3	Erbiumdotierte Quarzglasfasern 472
15.3.4	Raman-Faserverstärker 474
15.3.5	Die Eigenschaften ausgewählter Laserübergänge 475
15.4	Die Nichtlinearität von Verstärkern 476
15.4.1	Der Gewinn bei Sättigung in homogen verbreiterten Medien 476
15.4.2	Gewinn bei Sättigung in inhomogen verbreiterten Medien 478
15.5	Verstärkerrauschen 480
15.5.1	Photonenstatistik nach Verstärkung 481
16	Laser 485
16.1	Theorie der Laseroszillation 486
16.1.1	Optische Verstärkung und Rückkopplung 486
16.1.2	Bedingungen für die Laseroszillation 488
16.2	Die Eigenschaften der Laserstrahlung 490
16.2.1	Leistung 490
16.2.2	Die spektrale Verteilung 493

16.2.3	Räumliche Verteilung und Polarisation	497
16.2.4	Modenselektion	498
16.3	Bauarten von Lasern	500
16.3.1	Festkörperlaser	501
16.3.2	Faserlaser	506
16.3.3	Raman-Faserlaser	510
16.3.4	Chäotische Laser	512
16.3.5	Gas- und Farbstofflaser	513
16.3.6	Röntgen- und Freie-Elektronen-Laser	515
16.3.7	Tabelle ausgewählter Eigenschaften	523
16.4	Gepulste Laser	523
16.4.1	Methoden zur Erzeugung von Laserpulsen	525
16.4.2	Die Analyse von Einschwingvorgängen	526
16.4.3	Die Gütemodulation	528
16.4.4	Modenkopplung	531
16.4.5	Optische Frequenzkämme	535
17	Halbleiteroptik	543
17.1	Halbleiter	544
17.1.1	Energiebänder und Ladungsträger	544
17.1.2	Halbleitermaterialien	547
17.1.3	Die Konzentrationen von Elektronen und Löchern	554
17.1.4	Erzeugung, Rekombination und Injektion	559
17.1.5	Halbleiterübergänge	561
17.1.6	Heteroübergänge	564
17.1.7	Quantenbeschränkte Strukturen	565
17.2	Wechselwirkungen von Photonen mit Ladungsträgern	569
17.2.1	Photonenwechselwirkungen in Volumenhalbleitern	570
17.2.2	Interbandübergänge in Volumenhalbleitern	571
17.2.3	Absorption, Emission und Gewinn in Volumenhalbleitern	574
17.2.4	Photonenwechselwirkungen in quantenbeschränkten Strukturen	578
17.2.5	Quantenpunkt-Einzelphotonenemitter	579
17.2.6	Der Brechungsindex	580
18	LED und Laserdioden	585
18.1	Lichtemittierende Dioden (LED)	586
18.1.1	Injectionelektrolumineszenz	586
18.1.2	Die Eigenschaften von LED	590
18.1.3	Materialien und Aufbau von Bauelementen	596
18.1.4	Siliciumphononik	600
18.1.5	Organische LED	601
18.1.6	LED-Beleuchtungen	603
18.2	Optische Halbleiterverstärker	607
18.2.1	Gewinn und Bandbreite	608
18.2.2	Der Pumpvorgang	612
18.2.3	Heterostrukturen	613
18.2.4	Quantenschichtstrukturen	614
18.2.5	Superlumineszenzdioden	617
18.3	Laserdioden	618
18.3.1	Verstärkung, Rückkopplung und Schwingung	618
18.3.2	Leistung und Wirkungsgrad	621
18.3.3	Spektrale und räumliche Eigenschaften von Laserdioden	624

- 18.4 Quanteneinschlusslaser 627
 - 18.4.1 Einfach- und Mehrfachquantenschichtlaser 628
 - 18.4.2 Quantendraht- und Mehrfachquantendrahtlaser 631
 - 18.4.3 Quantenpunkt- und Mehrfachquantenpunkt laser 632
 - 18.4.4 Quantenkaskadenlaser 633
- 18.5 Mikroresonatorlaser 636
 - 18.5.1 Oberflächenemitter 637
 - 18.5.2 Mikrodisk- und Mikroringlaser 640
 - 18.5.3 Mikroresonatorlaser aus photonischen Kristallen 641
- 18.6 Nanoresonatorlaser 642

- 19 Photodetektoren 651**
 - 19.1 Photodetektoren 652
 - 19.1.1 Äußerer und innerer Photoeffekt 652
 - 19.1.2 Allgemeine Eigenschaften 655
 - 19.2 Photoleiter 660
 - 19.2.1 Intrinsische Materialien 660
 - 19.2.2 Dotierte Materialien 661
 - 19.2.3 Heterostrukturen 662
 - 19.3 Photodioden 663
 - 19.3.1 Die pn-Photodiode 663
 - 19.3.2 Die pin-Photodiode 665
 - 19.3.3 Heterostrukturen 666
 - 19.4 Lawinenphotodioden 669
 - 19.4.1 Konventionelle Lawinenphotodioden 669
 - 19.4.2 Dioden mit positions- und verlaufsabhängigen Parametern 675
 - 19.4.3 Einzelphotonen- und photonenzahlauf lösende Detektoren 676
 - 19.5 Arraydetektoren 679
 - 19.5.1 Photodetektoren 679
 - 19.5.2 Ausleseelektronik 680
 - 19.6 Rauschen in Photodetektoren 681
 - 19.6.1 Photoelektronenrauschen 682
 - 19.6.2 Gewinnrauschen 685
 - 19.6.3 Schaltungrauschen 690
 - 19.6.4 Signal/Rausch-Verhältnis und Empfindlichkeit analoger Empfänger 692
 - 19.6.5 Bitfehlerrate und Empfindlichkeit digitaler Empfänger 696

- 20 Akustooptik 705**
 - 20.1 Die Wechselwirkung von Licht und Schall 706
 - 20.1.1 Braggsche Beugung 706
 - 20.1.2 Die Theorie gekoppelter Wellen 711
 - 20.1.3 Braggsche Beugung von Strahlen 712
 - 20.2 Akustooptische Bauelemente 714
 - 20.2.1 Modulatoren 715
 - 20.2.2 Scanner 716
 - 20.2.3 Räumliche Schalter 718
 - 20.2.4 Filter, Frequenzschieber und Isolatoren 720
 - 20.3 Akustooptik von anisotropen Medien 721
 - 20.3.1 Akustische Wellen in anisotropen Materialien 721

21	Elektrooptik	727
21.1	Grundlagen der Elektrooptik	728
21.1.1	Pockels- und Kerreffekt	728
21.1.2	Elektrooptische Modulatoren und Schalter	729
21.1.3	Scanner	732
21.1.4	Richtkoppler	733
21.1.5	Räumliche Lichtmodulatoren	735
21.2	Elektrooptik anisotroper Medien	737
21.2.1	Kristalloptik: Eine kurze Wiederholung	737
21.2.2	Pockels- und Kerreffekt	737
21.2.3	Modulatoren	741
21.3	Elektrooptik von Flüssigkristallen	742
21.3.1	Phasenschieber und Modulatoren	742
21.3.2	Räumliche Lichtmodulatoren und Displays	746
21.4	Photorefraktivität	749
21.4.1	Vereinfachte Theorie der Photorefraktion	750
21.5	Elektroabsorption	753
22	Nichtlineare Optik	759
22.1	Nichtlineare optische Medien	760
22.1.1	Die nichtlineare Wellengleichung	762
22.2	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung	763
22.2.1	Frequenzverdopplung und Gleichrichtung	763
22.2.2	Der elektrooptische Effekt	765
22.2.3	Dreiwellenmischung	766
22.2.4	Phasenbedingung und Abstimmungskurven	769
22.2.5	Quasi-Phasenanpassung	773
22.3	Nichtlineare Optik dritter Ordnung	775
22.3.1	Die Erzeugung der dritten Harmonischen und der optische Kerreffekt	775
22.3.2	Selbstphasenmodulation, Selbstfokussierung und räumliche Solitonen	776
22.3.3	Kreuzphasenmodulation	778
22.3.4	Vierwellenmischung	778
22.3.5	Optische Phasenkonjugation	780
22.4	Nichtlineare Optik zweiter Ordnung: Die Theorie gekoppelter Wellen	782
22.4.1	Die Gleichungen gekoppelter Wellen	782
22.4.2	Frequenzverdopplung	784
22.4.3	Optische Frequenzkonversion	786
22.4.4	Optische parametrische Verstärkung und Oszillation	787
22.5	Nichtlineare Optik dritter Ordnung: Die Theorie gekoppelter Wellen	789
22.5.1	Vierwellenmischung	789
22.5.2	Dreiwellenmischung und Erzeugung der dritten Harmonischen	791
22.5.3	Optische Phasenkonjugation	792
22.6	Anisotrope nichtlineare Medien	794
22.6.1	Dreiwellenmischung in anisotropen nichtlinearen Medien zweiter Ordnung	795
22.7	Dispersive nichtlineare Medien	796
22.7.1	Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Integraltransformation	796
22.7.2	Beschreibung dispersiver nichtlinearer Medien durch eine Differentialgleichung	797

23	Ultraschnelle Optik	803
23.1	Eigenschaften von Pulsen	804
23.1.1	Zeitliche und spektrale Eigenschaften	804
23.1.2	Gaußpulse und gechirpte Gaußpulse	807
23.1.3	Räumliche Eigenschaften	808
23.2	Pulsformung und Kompression	810
23.2.1	Chirpfilter	810
23.2.2	Ausführungen von Chirpfiltern	816
23.2.3	Pulskompression	819
23.2.4	Pulsformung	819
23.3	Pulsausbreitung in optischen Fasern	821
23.3.1	Die optische Faser als Chirpfilter	821
23.3.2	Ausbreitung eines Gaußpulses in einer optischen Faser	823
23.3.3	Diffusionsgleichung für langsam variierende Einhüllende	827
23.3.4	Analogie zwischen Dispersion und Beugung	828
23.4	Ultraschnelle lineare Optik	831
23.4.1	Strahlenoptik	831
23.4.2	Wellen- und Fourieroptik	832
23.4.3	Optik von Strahlbündeln	834
23.5	Ultraschnelle nichtlineare Optik	838
23.5.1	Gepulste parametrische Prozesse	838
23.5.2	Optische Solitonen	842
23.5.3	Superkontinuumslicht	848
23.5.4	Die Erzeugung höherer Harmonischer und Attosekundenoptik	850
23.6	Pulsdetektion	854
23.6.1	Die Messung der Intensität	854
23.6.2	Die Messung der spektralen Intensität	858
23.6.3	Die Messung der Phase	859
23.6.4	Messung des Spektrogramms	861
24	Optische Verbindungen und Schalter	869
24.1	Optische Verbindungen	871
24.1.1	Die Verbindungsmatrix	871
24.1.2	Nichtreziproke Verbindungen: Isolatoren und Zirkulatoren	872
24.1.3	Brechende und beugende Verbindungen im freien Raum	873
24.1.4	Wellenleiterverbindungen	875
24.1.5	Nichtreziproke optische Verbindungen	876
24.1.6	Optische Verbindungen in Mikroelektronik und Computertechnik	876
24.2	Passive optische Router	881
24.2.1	Wellenlängenbasierte Router	881
24.2.2	Polarisations-, phasen- und intensitätsbasierte Router	885
24.3	Photonische Schalter	887
24.3.1	Ausführungen von räumlichen Schaltern	887
24.3.2	Realisierungen von photonischen räumlichen Schaltern	889
24.3.3	Volloptische räumliche Schalter	895
24.3.4	Wellenlängenempfindliche Schalter	902
24.3.5	Zeitbereichsschalter	904
24.3.6	Code- oder Paketschalter	906
24.4	Photonische Logikgatter	908
24.4.1	Bistabile Systeme	908
24.4.2	Das Prinzip der optischen Bistabilität	910
24.4.3	Bistabile optische Bauelemente	912

25	Faseroptische Kommunikation	919
25.1	Faseroptische Komponenten	920
25.1.1	Optische Fasern	920
25.1.2	Quellen für optische Sender	925
25.1.3	Optische Verstärker	926
25.1.4	Detektoren für optische Empfänger	928
25.1.5	Integriert-photonische Schaltkreise	930
25.2	Faseroptische Nachrichtensysteme	931
25.2.1	Entwicklungsgeschichte faseroptischer Nachrichtensysteme	932
25.2.2	Die Leistungsfähigkeit von faseroptischen Systemen	935
25.2.3	Dämpfungs- und dispersionsbegrenzte Systeme	937
25.2.4	Kompensation und Management von Dämpfung und Dispersion	942
25.2.5	Solitonoptische Kommunikation	944
25.3	Modulation und Multiplexing	945
25.3.1	Modulation	945
25.3.2	Multiplexing	947
25.3.3	Wellenlängenmultiplexing	948
25.3.4	Raummultiplexing	950
25.4	Kohärente optische Kommunikation	952
25.4.1	Der Heterodynendetektor	953
25.4.2	Der symmetrische Homodynendetektor	954
25.4.3	Kohärente Systeme	955
25.5	Faseroptische Netze	958
25.5.1	Netztopologien und Vielfachzugriff	958
25.5.2	Wellenlängenmultiplexnetze	961

Anhang A Die Fouriertransformation 969

A.1	Die eindimensionale Fouriertransformation	969
A.1.1	Eigenschaften der Fouriertransformation	969
A.1.2	Beispiele	970
A.2	Zeitliche und spektrale Breite	970
A.2.1	Die quadratisch gemittelte Breite	970
A.2.2	Die leistungsäquivalente Breite	972
A.2.3	1/e-, Halbwerts- und 3-dB-Breite	973
A.3	Die zweidimensionale Fouriertransformation	973
A.3.1	Eigenschaften	974

Anhang B Lineare Systeme 977

B.1	Eindimensionale lineare Systeme	977
B.1.1	Lineare Systeme	977
B.2	Zweidimensionale lineare Systeme	979

Anhang C Die Moden linearer Systeme 981

C.1	Die Moden eines diskreten linearen Systems	982
C.2	Die Moden eines kontinuierlichen durch einen Integraloperator beschriebenen Systems	982
C.2.1	Translationssymmetrie und harmonische Moden	983
C.3	Die Moden eines durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschriebenen Systems	983
C.4	Die Moden eines durch eine partielle Differentialgleichung beschriebenen Systems	984
C.4.1	Die Moden des Feldes/der Welle in einem homogenen Medium mit Randbedingungen	984
C.4.2	Moden von Feldern/Wellen in einem periodischen Medium	985

	Lösungen zu den Übungen	987
1	Strahlenoptik	987
2	Wellenoptik	992
3	Optik von Strahlbündeln	994
4	Fourieroptik	996
5	Elektromagnetische Optik	998
6	Polarisationsoptik	998
7	Optik photonischer Kristalle	999
9	Wellenleiteroptik	999
10	Faseroptik	1000
11	Resonatoroptik	1002
12	Statistische Optik	1003
13	Photonenoptik	1004
14	Licht und Materie	1005
15	Laserverstärker	1006
16	Laser	1008
17	Halbleiteroptik	1010
18	LED und Laserdioden	1012
19	Photodetektoren	1014
20	Akustooptik	1015
21	Elektrooptik	1016
22	Nichtlineare Optik	1016
23	Ultraschnelle Optik	1020
24	Optische Verbindungen und Schalter	1020
	Stichwortverzeichnis	1023

